

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ  
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYYI TAVRIA STATE  
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**Таврійського державного**  
**агротехнологічного університету**  
*Технічні науки*

**SCIENTIFIC BULLETIN OF TAVRIA STATE**  
**AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**  
*Technical sciences*

*Виходить 2 рази на рік*  
*Видається з 2011 р.*

**Випуск 15, том 2**  
**Issue 15, volume 2**

**WEB:** <https://oj.tsatu.edu.ua>

**DOI:** 10.32782/2220-8674-2025-15-2



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2025



**УДК** [631.3+621.3+004+663/664]

Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 2. 348 с.

**ISSN 2220-8674**

Представлені результати наукових досліджень вчених у галузях галузевого машинобудування, енергетики, електротехніки, електромеханіки, харчових технологій, комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Видання призначене для наукових працівників, викладачів, інженерно-технічного персоналу і здобувачів вищої освіти, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

**Реферативні бази:** Crossref, Google Scholar, «Україна наукова», НБУ ім. В. І. Вернадського

**Головний редактор**

Кюрчев В. М., чл.-кор. НААН України,  
д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Editor in chief**

Kyurchev V., corresponding member of NAAS of Ukraine,  
Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**Заступники головного редактора**

Надикто В. Т., чл.-кор. НААН України, д-р техн. наук,  
проф. (Україна)  
Панченко А. І., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Deputy editors in chief**

Nadykto V., corresponding member of NAAS of Ukraine,  
Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Panchenko A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**Відповідальний секретар**

Волошина А. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**Executive secretary**

Voloshina A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**Технічний секретар**

Погорельцева Д. О. (Україна)

**Technical secretary**

Pogoreltseva D. (Ukraine)

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ**

Белоев Христо, д-р техн. наук, проф. (Болгарія)  
Даманаускас Відас, д-р техн. наук, проф. (Литва)  
Івановс Семјонс, д-р техн. наук (Латвія)  
Ольт Юрі, PhD, д-р техн. наук, проф. (Естонія)  
Паскуцці Сімоні, PhD, доц. (Італія)  
Финдура Павол, PhD, проф. (Словачія)  
Вершков О. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Дідур В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Журавель Д. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Кувачов В. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Кюрчев С. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Скляр О. Г., канд. техн. наук, проф. (Україна)  
Скляр Р. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Тітова О. А., д-р пед. наук, проф. (Україна)

**SECTORAL MACHINE BUILDING**

Beloev Hristo, Dr. Sci. Tech., Prof. (Bulgaria)  
Damauskas Vidas, Dr. Sci. Tech. (Lithuania)  
Ivanovs Semjons, Dr. Sci. Tech. (Latvia)  
Olt Juri, PhD, Dr. Sci. Tech., Prof. (Estonia)  
Pascuzzi Simone, PhD, Assoc. Prof. (Italia)  
Pavol Findura, PhD, Prof. (Slovakia)  
Vershkov O, Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Didur V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Zhuravel D., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Kuvachov V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Kiurchev S., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Scljar O., Cand. Sci. Tech, Prof. (Ukraine)  
Scljar R., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Titova O., Dr. Sci. Ped., Prof. (Ukraine)

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА  
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

Шафранець Анджей, д-р техн. наук, проф. (Польща)  
Кавакзех Мохаммед, PhD, проф. (Йорданія)  
Бур'ян С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Галько С. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Карпалюк І. Т., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Квітка С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Кузнєцов М. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Лисенко О. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Мірошник О. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Мороз О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Плюгін В. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**ELECTRICAL POWER ENGINEERING,  
ELECTRICAL ENGINEERING AND  
ELECTROMECHANICS**

Szafraniec Andrzej, Dr. Sci. Tech., Prof. (Poland)  
Qawaqzeh Mohamed, PhD, Prof. (Jordan)  
Burian S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Halko S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Karpaliuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Kvitka S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Kuznietsov M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Lysenko O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Miroshnyk O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Moroz O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Pliuhin V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ**

Гавриленко Є. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Гнатушенко В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Гумен О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Дашкевич А. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Лубко Д. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Ляковська С. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Малкіна В. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Мацулевич О. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Холодник Ю. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)  
Яблонський П. М., канд. техн. наук, доц. (Україна)

**ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Дейниченко Г. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Євлаш В. В., д-р техн. наук проф. (Україна)  
Ломейко О. П., канд. техн. наук, доц (Україна)  
Паламарчук І. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Пилипенко Л. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Пріс О. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Самойчук К. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Сердюк М. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)  
Ялпачик В. Ф., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**Таврійського державного**  
**агротехнологічного університету**

Випуск 15, том 2

**Засновник**

Таврійський державний агротехнологічний  
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 2011 році

Рішення Національної ради України з питань  
телебачення і радіомовлення № 2623 від 04.12.2025 року.

Ідентифікатор медіа: R 40-06698

Суб'єкт у сфері онлайн-медіа – Таврійський державний  
агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного  
(просп. Богдана Хмельницького, буд. 18, м. Мелітополь,

Запорізька обл., 72312, office@tsatu.edu.ua,  
тел. (099) 614-83-02)

Виходить 2 рази на рік

Рекомендовано до публікації вченою радою  
Таврійського державного агротехнологічного  
університету імені Дмитра Моторного  
Протокол № 4 від 25.11.2025 р.

«Науковий вісник ТДАТУ» включено до **Категорії Б**  
Переліку наукових фахових видань України (технічні науки)  
на підставі Наказів МОН України від 17 березня 2020 року  
№ 409 (Додаток № 1); від 2 липня 2020 року № 886 (Додаток  
№ 4); від 24 вересня 2020 року № 1188 (Додаток № 5).

**Адреса редакції**

Юридична: 72312, Запорізька обл.  
м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18  
Фактична: 69600, Запорізька обл. м. Запоріжжя,  
вул. Жуковського, 66  
<https://oj.tsatu.edu.ua>,  
DOI: 10.32782/2220-8674-2025-15-2

**COMPUTER SCIENCES**

Havrylenko Ye., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Hnatushenko V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Humen O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Dashkevych A., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Lubko D., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Liaskovska S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Malkina V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Matsulevych O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Kholodniak Y., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Yablonskyi P., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)

**FOOD TECHNOLOGIES**

Deynichenko G., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Evlash V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Lomeiko O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)  
Palamarchuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Pylypenko L., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Priss, O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Samoichuk K., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Serdyuk M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)  
Yalpachik V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

**SCIENTIFIC BULLETIN OF TAVRIA STATE**  
**AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

Issue 15, volume 2

**Founder**

Dmytro Motornyi Tavria State  
Agrotechnological University

Founded in 2011

Decision of the National Council of Ukraine  
on Television and Radio Broadcasting No. 2623 of 04.12.2025.  
Media ID: R 40-06698

Media entity: Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological  
University (ave. B. Khmelnytskyi, 18, Melitopol,  
Zaporizhzhia region, 72312, office@tsatu.edu.ua,  
tel. (099) 614-83-02)

Published 2 times a year

Recommended for publication by the Academic  
Board of Dmytro Motornyi Tavria State  
Agrotechnological University  
Record No. 4 dated November 25, 2025

Scientific bulletin of TSATU is included in the List of scientific  
professional editions of Ukraine (technical sciences), **category**  
**B** (on the basis of the Orders of the MES of Ukraine dated  
March 17, 2020 No. 409 (Appendix No. 1); dated July 2, 2020  
No. 886 (Appendix No. 4); dated September 24, 2020 No. 1188  
(Appendix No. 5).

**Address of the Editorial office**

Legal adress: 72312, Zaporizhzhia region  
Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave.  
Actual address: 69600, Zaporizhzhia region Zaporizhzhia, 66,  
Zhukovskiy Str.  
<https://oj.tsatu.edu.ua>,  
DOI: 10.32782/2220-8674-2025-15-2



## ЗМІСТ

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<b>G. V. Deynichenko, D. V. Dmytrevskiy, D. O. Honchar, O. A. Piddubnyi, V. V. Lavreniuk.</b> Increasing the efficiency of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices.....	10
<b>Б. В. Болтянський.</b> Дослідження залежності щільності деревних брикетів від розміру частинок сировини.....	17
<b>О. О. Дереза, О. Є. Мацулевич, О. О. Вершков, А. П. Чаплінський.</b> Автоматизація проектування технологічних процесів виготовлення різьбонарізного інструменту на прикладі плашки.....	22
<b>В. В. Дідур, Я. В. Білокінь, О. В. В'юник, Г. І. Дашивець.</b> Теплофізична модель процесу прес-екструзії олійних культур.....	32
<b>В. В. Дідур, Д. П. Журавель, І. А. Колесніченко, Є. А. Петриченко.</b> Моделювання теплової обробки насіння олійних культур високотемпературним теплоносієм.....	37
<b>Д. П. Журавель, В. В. Дідур, М. В. Шевчук.</b> Обґрунтування триботехнічних властивостей біологічних оливок для гідросистем сільськогосподарської техніки.....	45
<b>С. В. Коробка, Р. В. Скляр, І. Г. Стукалець, Р. Є. Кригуль, І. О. Дудко.</b> Обґрунтування методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки й метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів.....	54
<b>В. П. Кувачов, В. М. Дружич, С. О. Шевченко, К. О. Зеленов, С. А. Інува.</b> Механіко-технологічні аспекти процесу підбирання і змішування біомаси для органічних добрив.....	70
<b>В. П. Кувачов, О. О. Червоткіна.</b> Експериментальне дослідження раціонального діапазону вологості сировини для брикетування.....	77
<b>В. Б. Мітков.</b> Використання роботизованих систем у рослинництві: аналіз практик прецизійного землеробства скандинавських країн.....	83
<b>В. Т. Надикто, І. О. Жокін.</b> Вплив кута повороту керованих коліс трактора на коефіцієнт кінематичної невідповідності приводу його мостів.....	93
<b>В. Т. Надикто, В. М. Кюрчев, С. П. Погорілий.</b> Визначення впливу рівня енергонасиченості колісного трактора на силу опору його коченню.....	99
<b>Д. Г. Одновол, А. Ф. Дяденчук.</b> Оптимізація розмірів балкових елементів рами трактора в середовищі matlab: аналітичний, чисельний та робастний підходи для суцільних і порожнистих перерізів.....	105
<b>Н. О. Паляничка, В. Ф. Ялпачик, О. О. Ковальов, О. О. Червоткіна, О. П. Прокопенко.</b> Інноваційні технології контролю якості плодів під час холодильного зберігання.....	120
<b>А. І. Панченко, А. А. Волошина, О. С. Ковязін, І. А. Панченко, А. А. Волошин.</b> Зміна функціональних параметрів мехатронних систем з планетарними гідромоторами за різних умов експлуатації.....	127



- А. І. Панченко, А. А. Волошина, І. А. Панченко, І. М. Холод, А. А. Волошин.** Вплив конструктивних особливостей циклоїдального зачеплення на геометричні на функціональні параметри планетарного гідромотора.....136
- С. П. Сокол, І. А. Волик, Є. І. Лепеть.** Аналітичний огляд фундаментальних математичних моделей землеробської механіки та їх аналіз щодо використання на проектному етапі розробки ґрунтообробних машин.....149

### ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

- О. Ю. Вовк.** Ресурсозберігаюче регулювання напруги асинхронних двигунів зі зниженням навантаження.....157
- О. Ю. Вовк, І. О. Попова.** Аналіз несиметричних трифазних кіл за допомогою методу контурних струмів.....166
- В. Б. Гулевський, Ю. О. Постол, К. Г. Петренко.** Проектування розумних та енергоефективних рішень для освітлення.....175
- С. П. Денисюк, М. Ф. Сопель, О. В. Сподинський, Ю. М. Довгодько.** Синхрофазори в сучасних енергосистемах: визначення, вимірювання та архітектура WAMS.....181
- Р. Є. Кригуль, С. П. Шаповал, С. В. Сиротюк, М. Є. Касинець, Т. О. Станицький, І. О. Дудко.** Система енергопостачання теплиці з використанням відновлюваних джерел енергії.....188
- Ю. В. Маслов.** Техніко-економічне моделювання виробництва «зеленого» аміаку на основі електролізного водню: оцінка ефективності ретрофіту заводів у дії.....197
- К. Г. Петренко, Ю. О. Постол, В. Б. Гулевський, О. О. Ковальов.** Енергоефективне освітлення з автоматизованим керуванням.....205
- О. Ю. Юрченко, Г. В. Барсукова, К. В. Мороз, М. С. Новіков, М. О. Щebetенко.** Теоретично про конструктив обмоток електричних двигунів з можливістю покращення їх характеристик.....213

### КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

- О. О. Вершков, О. Є. Мацулевич, О. Ю. Михайленко, І. Р. Тетервак.** Програмний модуль «база інженерних знань для структурного синтезу газодувок».....220
- Є. А. Гавриленко, О. Є. Мацулевич, Г. В. Антонова, М. В. Супрун.** Аналіз можливостей використання сам/cad-систем delcam для виробництва пресованих деталей.....227
- Г. В. Гешева.** Аналітичний огляд результатів моніторингового дослідження адаптації першокурсників спеціальності «комп'ютерні науки».....235
- А. Ф. Дяденчук.** Чисельне моделювання фотоперетворювальної гетероструктури CuO/porous-Si/Si.....241
- О. Г. Зінов'єва.** застосування апарату нечіткої логіки для оптимізації систем зрошення в сільському господарстві.....248
- А. Ю. Коляда.** Переваги системного аналізу в проектному менеджменті.....254



<b>О. Є. Мацулевич, О. Ю. Михайленко, М. В. Супрун.</b> Дискретна інтерполяція спіралеподібних дискретно представлених кривих на основі нелінійного закону зміни кутів суміжності.....	260
--	-----

### ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<b>Iu. A. Goriainova, O. O. Simakova.</b> Study of the influence of white and black mulberry additives on the state of the protein-proteinase complex of wheat flour.....	266
<b>А. В. Антоненко, Л. В. Баль-Прилипко.</b> Технологічні аспекти виробництва порошків з баклажанів.....	272
<b>О. В. Василюшина, А. Ю. Токар, І. Л. Заморська, І. В. Гайдай, К. В. Калайда, Л. М. Худік.</b> Розроблення і оцінка якості плодкових напоїв із підвищеним вмістом біологічно активних речовин.....	283
<b>Є. А. Гавриленко, О. Ю. Михайленко.</b> Розв'язання задач інтерполяції у САD-системі solidworks.....	290
<b>В. С. Калина, В. О. Троєкурова, Д. П. Закопай.</b> Дослідження технології виробництва амарантово-житнього хліба як функціонального продукту з підвищеною харчовою цінністю.....	302
<b>В. С. Калина, В. О. Троєкурова.</b> Порівняльний аналіз впливу розпушувачів на лужність печива.....	308
<b>І. М. Калугіна.</b> Удосконалення технології сорбету з фейхоа для закладів ресторанного господарства.....	313
<b>В. І. Пономаренко, О. Ю. Кошель.</b> Вплив натуральних барвників на фізико-хімічні показники кондитерських виробів.....	320
<b>О. П. Прісс, О. І. Яковер, Т. І. Колісниченко, П. О. Булгаков.</b> Зміни вмісту біологічно активних сполук бебі-шпинату під час зберігання.....	326
<b>Т. П. Синенко, Н. В. Болгова, О. Ю. Кошель.</b> Визначення якісних показників молока-сировини від корів із різними генотипами $\beta$ -казеїну.....	334



## CONTENTS

## SECTORAL MACHINE BUILDING

<b>G. Deynichenko, D. Dmytrevskiy, D. Honchar, O. Piddubnyi, V. Lavreniuk.</b> Increasing the efficiency of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices.....	10
<b>B. Boltianskiy.</b> Study of the dependence of the density of wood bricks on the size of raw material particles.....	17
<b>O. Dereza, O. Matsulevych, O. Vershkov, A. Chaplinskiy.</b> Automation of the design of technological processes for the manufacture of thread cutting tools using the example of a die.....	22
<b>V. Didur, J. Bilokin, O. Viunyk, H. Dashyvets.</b> Thermophysical model of the press-extrusion process of oil crops.....	32
<b>V. Didur, D. Zhuravel, I. Kolesnichenko, I. Petrychenko.</b> Modeling of heat treatment of oilcrop seeds with high-temperature heat transfer.....	37
<b>D. Zhuravel, V. Didur, M. Shevchuk.</b> Justification of tribotechnical properties of biological oils for hydrosystems of agricultural equipment.....	45
<b>S. Korobka, R. Skliar, I. Stukalets, R. Krygul, I. Dudko.</b> Justification of the methodology for investigating the energy characteristics of a solar dryer and the metrological properties of means for measuring thermal parameters.....	54
<b>V. Kuvachov, V. Druzhych, S. Shevchenko, K. Zelenov, S. Inuva.</b> Mechanical and technological aspects of the biomass picking and mixing process for organic fertilizers.....	70
<b>V. Kuvachov, O. Chervotkina.</b> Experimental study of the rational moisture range of raw materials for bricking.....	77
<b>V. Mitkov.</b> Use of robotic systems in agriculture: analysis of precision farming practices in scandinavian countries.....	83
<b>V. Nadykto, I. Zhokin.</b> Influence of the tractor turning angle steered wheels on the kinematic discrepancy coefficient of its drive axles.....	93
<b>V. Nadykto, V. Kyurchev, S. Pohorilyi.</b> Determining the influence of the wheeled tractor energy saturation level on its rolling resistance.....	99
<b>D. Odnovol, A. Dyadenchuk.</b> Optimization of tractor frame beam dimensions in matlab environment: analytical, numerical, and robust approaches for solid and hollow cross-sections.....	105
<b>N. Palianychka, V. Yalpachyk, A. Kovalov, O. Chervotkina, O. Prokopenko.</b> Innovative technologies for fruit quality control during refrigerated storage.....	120
<b>A. Panchenko, A. Voloshina, O. Koviazin, I. Panchenko, A. Voloshin.</b> Changing the functional parameters of mechatronic systems with planetary hydraulic motors under various operating conditions.....	127



- A. Panchenko, A. Voloshina, I. Panchenko, I. Kholod, A. Voloshin.** Influence of design features of cycloidal engagement on the geometric and functional parameters of a planetary hydraulic motor.....136
- S. Sokol, B. Volyk, Ye. Lepet.** Analytical review of fundamental mathematical models of earth mechanics and their analysis for conditions of use at the design stage of soil processing machines.....149

### ELECTRICAL POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

- O. Vovk.** Resource-saving voltage regulation of asynchronous motors when reducing load.....157
- O. Vovk, I. Popova.** Analysis of asymmetrical three-phase circuits using the contour current method.....166
- V. Hulevskiy, Yu. Postol, K. Petrenko.** Design of smart and energy-efficient lighting solutions...175
- S. Denysiuk, M. Sopel, O. Spodynskiy, Yu. Dovgodko.** Synchrophasors in Modern Power Systems: Definition, Measurement, and WAMS Architecture.....181
- R. Krygul, S. Shapoval, S. Syrotyuk, M. Kasynets, T. Stanytskyy, I. Dudko.** Greenhouse power supply system using renewable energy sources.....188
- Yu. Maslov.** Techno-economic modelling of “green” ammonia production based on electrolytic hydrogen: evaluation of retrofit efficiency for existing plants.....197
- K. Petrenko, Yu. Postol, V. Hulevskiy, A. Kovalyov.** Energy-efficient lighting with automated control.....205
- O. Yurchenko, H. Barsukova, K. Moroz, M. Novikov, M. Shchebetenko.** Theoretically about the design of electric motor windings with the possibility of improving their characteristics.....213

### COMPUTER SCIENCES

- O. Vershkov, O. Matsulevych, O. Mykhaylenko, I. Tetervak.** Software module “engineering knowledge base for structural synthesis of gas pipes”.....220
- Ye. Havrylenko, O. Matsulevych, G. Antonova, M. Suprun.** Analysis of the possibilities of using delcam sam/cad systems for the production of pressed parts.....227
- H. Heshva.** Analytical review of monitoring study results on the adaptation of first-year computer science students.....235
- A. Dyadenchuk.** Numerical modeling of the photoconverting heterostructure CuO/porous-Si/Si.....241
- O. Zinovieva.** Application of fuzzy logic apparatus for optimization of irrigation systems in agriculture.....248
- A. Koliada.** Advantages of systems analysis in project management.....254
- O. Matsulevych, O. Mykhaylenko, M. Suprun.** Discrete interpolation of spiral-like discretely represented curves based on a nonlinear law of change of adjacency angles.....260



## FOOD TECHNOLOGIES

<b>Iu. Goriainova, O. Simakova.</b> Study of the influence of white and black mulberry additives on the state of the protein-proteinase complex of wheat flour.....	266
<b>A. Antonenko, L. Bal-Prylypko.</b> Technological aspects of production of eggplante powder.....	272
<b>O. Vasylyshyna, A. Tokar, I. Zamorska, I. Haidai, K. Kalayda, L. Khudik.</b> Development and quality assessment of fruit drinks with increased content of biologically active substances....	283
<b>Ye. Havrylenko, O. Mykhailenko.</b> Solving interpolation problems in the solidworks CAD-system.....	290
<b>V. Kalyna, V. Troiekurova, D. Zakopai.</b> Research into the production technology of amaranth-rye bread as a functional product with increased nutritional value.....	302
<b>V. Kalyna, V. Troiekurova.</b> Comparative analysis of the influence of solvents on the alkalinity of cookies.....	308
<b>I. Kalugina.</b> Improvement of feijoa sorbet technology for restaurant establishments.....	313
<b>V. Ponomarenko, O. Koshel.</b> The impact of natural colorants on physical and chemical properties of confectionery products.....	320
<b>O. Priss, O. Yakover, T. Kolisnychenko, P. Bulgakov.</b> Changes in the content of biologically active compounds in baby spinach during storage.....	326
<b>T. Synenko, N. Bolgova, O. Koshel.</b> Determining quality indicators of raw milk from cows with different $\beta$ -casein genotype .....	334



---

**ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ**

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-1>

UDC 663.81.05:664.857.081.6

G. V. Deynichenko<sup>1</sup>, DScTech

ORCID: 0000-0003-3615-8339

D. V. Dmytrevskyi<sup>1,2</sup>, PhD

ORCID: 0000-0003-1330-7514

D. O. Honchar<sup>1</sup>, postgraduate

ORCID: 0009-0006-8808-6161

O. A. Piddubnyi<sup>1</sup>, master student

ORCID: 0009-0009-9331-7579

V. V. Lavreniuk<sup>1</sup>, master student

ORCID: 0009-0001-1454-9657

<sup>1</sup> State Biotechnological University, Kharkiv<sup>2</sup> Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

e-mail: dmitrevskyidv@gmail.com

**INCREASING THE EFFICIENCY OF THE MEMBRANE FILTRATION  
PROCESS IN THE PRODUCTION OF FRUIT AND BERRY JUICES**

*Summary.* The article considers the issue of increasing the efficiency of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices, which is a relevant direction in the development of modern technologies in the food industry. Membrane filtration, as a reagent-free and energy-saving method of processing liquid food products, allows you to obtain high-quality juices with minimal losses of biologically active substances and without deterioration of organoleptic indicators. The paper presents a generalized scheme of the membrane filtration technological process, characterizes the main stages – raw material preparation, enzymatic treatment, preliminary filtration, the main stage of membrane separation, membrane washing and stabilization of the finished product.

The influence of the main technological parameters – operating pressure, temperature, cross-flow velocity and membrane type – on the efficiency of the process and the quality of the filtrate is analyzed. It was established that the optimal conditions for ultrafiltration of fruit and berry juices are a pressure of 0.3...0.6 MPa, a temperature of 25...35 °C and a flow rate of 1.5...2.5 m/s, under which the highest productivity is achieved with minimal membrane contamination. It was shown that enzymatic preparation of raw materials provides a decrease in viscosity and an increase in filtration speed, and the use of membranes with antifouling properties and a modified surface contributes to stable system operation.

The results obtained confirm the feasibility of an integrated approach to optimizing the membrane filtration process, which involves simultaneous improvement of technological parameters, the design of membrane devices and membrane cleaning systems. The use of such solutions allows to ensure high quality of the final product, reduce energy and operating costs, and also increase the environmental efficiency of production. The results of the study are of practical importance for juice industry enterprises that implement modern technologies of membrane cleaning and product concentration.

*Keywords:* membrane filtration, fruit and berry juices, ultrafiltration, purification, membrane selectivity, product quality, technological parameters.

*Formulation of the problem.* Modern production of fruit and berry juices is characterized by increased requirements for product quality, its nutritional and biological value, as well as for the efficiency of technological processes. One of the key stages in the technological cycle is the process of clarification and concentration of juices, which is traditionally carried out by methods of heat treatment, settling or filtration through porous materials. However, such methods have a number



of significant disadvantages, in particular high energy consumption, process duration, possible degradation of thermolabile compounds (vitamins, enzymes, aromatic components) and deterioration of organoleptic characteristics of the finished product.

In this context, membrane technologies are becoming increasingly widespread, which allow for the separation, concentration and purification of juices without significantly affecting their natural structure and composition. Membrane filtration allows for the effective removal of mechanical impurities, colloidal particles, pectins and microorganisms, while preserving biologically active substances. At the same time, despite significant advantages, the widespread introduction of membrane technologies in the production of fruit and berry juices is hampered by a number of technological and operational problems associated with the instability of membrane operation, a decrease in their productivity due to contamination (fouling), increased costs for the regeneration of membrane elements, and the need to optimize the technological parameters of the process [1].

Membrane fouling is one of the main problems that significantly affects the filtration efficiency. The sediment formed on the surface or in the pores of the membrane reduces the permeability, increases the hydraulic resistance and requires additional washing or replacement of the membranes. These phenomena cause not only technological difficulties, but also economic losses associated with equipment downtime and increased production costs. In addition, the composition of the raw material (the content of pectin substances, polyphenols, proteins) significantly affects the rate of membrane fouling, which requires an individual approach to choosing the type of membrane and filtration modes for different types of fruit and berry juices [2].

Modern research is aimed at increasing the efficiency of membrane filtration by optimizing the process parameters (pressure, temperature, flow rate, concentration of the initial product), improving the design of membrane devices, using combined methods of raw material pretreatment, as well as developing new membrane materials with increased resistance to fouling. However, there is a need for a systematic approach to studying the impact of these factors on the efficiency of the filtration process, which will allow formulating scientifically sound recommendations for industrial application [3].

Thus, the current scientific and technical problem is to find ways to increase the efficiency of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices by optimizing technological parameters and improving the design and operational characteristics of membrane systems. Its solution will contribute not only to improving the quality of finished products and reducing energy costs, but also to ensuring the sustainable development of juice production in accordance with the principles of energy and resource conservation.

*Analysis of recent research and publications.* The last decades are characterized by the rapid development of membrane technologies, which have become widespread in the food industry, in particular in the production of fruit and berry juices. Membrane filtration is considered one of the most effective methods of cleaning, clarifying and concentrating juices, as it allows processes to be carried out at relatively low temperatures, which allows preserving the natural organoleptic properties of the product, aromatic substances, vitamins and biologically active compounds [4]. The results of numerous scientific studies show that the use of microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) makes it possible to significantly improve the quality of the final product, ensure the stability of color, transparency and biological value of juices. At the same time, compared to traditional clarification methods (settling, centrifugation, use of auxiliary reagents), membrane processes are characterized by lower energy consumption and environmental friendliness, as they do not require the use of chemical reagents and allow for the reuse of some of the by-products [5]. Despite numerous advantages, the widespread industrial use of membrane processes in juice technology is limited by the problem of reducing membrane productivity due to their contamination, or the so-called fouling. Membrane contamination is



caused by the accumulation of pectin substances, proteins, polyphenols, colloidal particles and microorganisms on their surface, which form a gel-like layer, which significantly reduces the filtrate flow and increases the hydraulic resistance. Studies conducted by various scientific groups confirm that the fouling rate significantly depends on the type of raw material, solids concentration, juice viscosity, temperature, flow rate, pressure and membrane properties. It was found that even a slight change in these parameters can lead to a noticeable decrease in filtration efficiency [6]. Thus, the issue of optimizing technological modes and choosing the type of membrane remains a relevant area of research. Numerous works of recent years consider various approaches to reducing the intensity of fouling. One of the effective methods is the preliminary enzymatic treatment of raw materials using pectinolytic enzymes, which promotes the hydrolysis of pectin substances and reduces the viscosity of the juice. Such studies have shown that preliminary enzymatic preparation makes it possible to increase the stability of the flow through the membrane and reduce the frequency of washing the filtration modules. At the same time, the authors note that excessive fermentation can negatively affect the organoleptic characteristics of the juice and its colloidal stability [7]. Therefore, the issue of choosing the optimal dose of enzymes and the duration of their action remains the subject of further research. Significant attention in modern scientific works is paid to the improvement of membrane materials and designs. Researchers are actively studying the possibilities of modifying the membrane surface by applying special hydrophilic or anti-fouling coatings, as well as creating hybrid polymer-ceramic structures that are characterized by higher chemical and thermal stability. A promising direction is the use of nanostructured materials, in particular metal-organic frameworks (MOF), silicon and titanium oxides, which reduce the adsorption of proteins and polyphenols, thereby increasing the antifouling properties of membranes. However, most of such solutions are still at the stage of laboratory tests, and their industrial implementation is limited by the high cost of manufacturing and the need for additional food safety tests [8]. A separate direction in the development of membrane technologies is the improvement of hydrodynamic conditions of the process. It has been shown that increasing the transverse flow velocity, using turbulators, pulsating flows or scraped surfaces allows reducing the thickness of the boundary layer and preventing excessive deposition of particles on the membrane. Such design solutions increase the stability of the filtration process, but require additional energy costs, so for their practical implementation it is necessary to conduct a detailed feasibility study. Researchers also draw attention to the importance of choosing the right type of membrane module (tubular, spiral-fold, plate or fiber), since not only the filtration efficiency but also the convenience of cleaning the membrane after the end of the operating cycle depends on this [9].

An important aspect of increasing the efficiency of membrane processes is the improvement of membrane cleaning systems, the so-called CIP procedures (clean-in-place). According to recent studies, the combination of mechanical cleaning with the use of acid, alkali or enzyme solutions allows you to effectively remove residual organic contaminants and restore up to 90...95 % of the initial membrane performance. However, prolonged use of chemical reagents can lead to degradation of the membrane material, which reduces its service life, so the search for environmentally friendly cleaning methods remains relevant – for example, using ultrasound, pulsed flows or biodegradable detergents. In addition to traditional membrane processes, promising methods such as reverse osmosis with reduced pressure, membrane distillation and forward osmosis are actively discussed in modern scientific publications [10]. These approaches allow you to concentrate juices at low temperatures, which ensures maximum preservation of volatile aromatic substances and color pigments. Although such technologies have not yet gained widespread industrial implementation due to the high cost of equipment, the results of experimental studies confirm their effectiveness and prospects for the future development of the industry. In conclusion, it should be noted that the conducted studies confirm

the high potential of membrane filtration in the production of fruit and berry juices as an innovative, environmentally friendly and energy-efficient technology [11].

However, a number of unsolved scientific and technical problems remain, including the stability of membranes during long-term use, optimization of process parameters for different types of raw materials, the economic feasibility of using modified membranes and the development of methods for monitoring and controlling the filtration process in real time. Further research should be aimed at developing comprehensive solutions that combine optimization of technological parameters, structural improvement of membrane devices and the use of new materials with increased antifouling properties [12]. It is the integration of these approaches that will make it possible to increase the efficiency of the membrane filtration process, ensure stable juice quality and reduce production costs, which is extremely important for the competitiveness of food industry enterprises.

*Formulation of the purpose of the article.* The aim of the article is to increase the efficiency of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices by optimizing technological parameters and improving the operating conditions of membrane systems to reduce the intensity of their contamination and ensure stable product quality. To achieve this goal, it is planned to study the influence of the main technological factors on the productivity of membrane filtration and determine the directions for improving the design and operational characteristics of membrane devices.

*Presentation of the main research material.* Membrane filtration is a modern, highly efficient technology for the purification and processing of fruit and berry juices, which ensures high-quality removal of suspended particles, colloids and microorganisms without the need for heat treatment or chemical reagents. This allows you to maximally preserve the natural aroma, taste, color and biological value of the product [13]. Unlike traditional methods of clarifying juices – such as settling, separation or the use of auxiliary substances (bentonite, gelatin, diatomaceous earth) – membrane filtration is a more environmentally friendly and energy-saving technology that provides consistently high quality indicators. The basis of the process is the use of semi-permeable membranes that pass low-molecular compounds (water, sugars, organic acids) and retain high-molecular components – proteins, pectins, polyphenols, microorganisms [14]. Depending on the size of the membrane pores and the applied pressure, the main types of processes are distinguished: microfiltration (MF), ultrafiltration (UF), nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO). Ultrafiltration is most often used to purify and clarify juices, and nanofiltration or reverse osmosis is used to concentrate them [15].

The technological scheme of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices involves several main stages. At the beginning, raw materials are received and prepared, which includes washing, sorting, grinding fruits to a puree state and preliminary removal of impurities. This is necessary to prevent mechanical damage to the membranes. Next, enzymatic treatment is carried out, during which pectinolytic enzymes are added, which destroy pectin substances, reducing the viscosity of the juice and facilitating further filtration. This is followed by preliminary filtration or centrifugation to remove large particles and suspended solids [16]. The key stage is membrane filtration, during which the liquid product is fed under pressure into the membrane module. The liquid is separated into two streams: the filtrate – the clarified juice that passes through the membrane, and the concentrate – the residue in which colloids, cell particles and high-molecular components are concentrated. After the filtration cycle is completed, the membranes are subjected to the CIP (Cleaning-In-Place) procedure – washing with special alkaline, enzymatic or acidic solutions to remove sediment and restore their filtration properties. The final stage is stabilization, pasteurization and packaging of the finished product. Table 1 shows the main technological parameters of the membrane filtration process and their impact on the efficiency of the process.

Experimental studies show that increasing the pressure to 0.6 MPa increases the filtration rate of apple juice by almost 40 %, however, further increase does not give a proportional increase in productivity

Table 1

Main technological parameters of the membrane filtration process and their impact on process efficiency

Process parameter	Value range	Impact on filtration efficiency
Working pressure, MPa	0.2...0.8	Increasing pressure increases the filtration rate, however, after reaching a critical value, the efficiency stabilizes due to the formation of a gel layer on the membrane surface
Temperature, °C	20...40	Optimal temperature (25...35 °C) reduces juice viscosity and improves membrane permeability. Higher temperatures can cause protein denaturation and loss of aromatic substances
Flow velocity, m/s	1.0...3.0	Increasing the cross-flow velocity prevents sediment formation and reduces fouling, but excessive turbulence increases energy consumption
Membrane type	UF/NF/RO	The choice of membrane type determines the degree of purification, transparency and chemical composition of the filtrate. For juice clarification, ultrafiltration with a porosity of 0.1...0.2 microns is the most effective
Membrane material	Polysulfone, cellulose acetate, polyamides	Determines resistance to temperature, chemical agents and degree of fouling. Polysulfone membranes are characterized by high mechanical stability and durability

due to the formation of sediment on the membrane surface. The optimal process temperature is 30 °C, at which the minimum viscosity and high transparency of the filtrate are achieved. In addition, it was found that enzymatic treatment before filtration increases productivity by 20...25 %, and the use of turbulators in the membrane module reduces the fouling rate by 15...18 %.

Particular attention is paid to the process of membrane fouling (fouling), which is the main factor in reducing filtration efficiency. The sediment is formed due to the adsorption of colloidal particles, proteins and pectins on the membrane surface. Various approaches are used to combat this phenomenon: backwashing, pulsed pressure supply, periodic mechanical cleaning or the use of membranes with a hydrophilic coating. It is also advisable to implement systems for continuous pressure and flow rate control to maintain optimal operating conditions.

When comparing different types of membranes, it was found that ultrafiltration membranes with a porosity of 0.1...0.2 microns provide the best ratio between productivity and filtrate quality. Membranes with a smaller pore size (nanofiltration) provide deeper purification, but require higher pressure, which increases energy consumption. On the other hand, microfiltration membranes have a higher throughput, but produce a less transparent product.

High efficiency of membrane filtration is also achieved through the correct selection of hydrodynamic parameters of the apparatus. It is important to ensure laminar, but sufficiently turbulent flow near the membrane surface to prevent the formation of stagnant zones. For this purpose, spiral-coiled, tubular or plate modules with distribution elements are used, which contribute to the uniform movement of the liquid.

Summarizing the results of the research, it can be noted that increasing the efficiency of the membrane filtration process of fruit and berry juices is possible due to: optimization of technological parameters (pressure, temperature, flow rate); preliminary enzymatic treatment of raw materials; use of membranes with antifouling properties; improvement of the design of membrane modules; implementation of monitoring systems and automatic process control; rational membrane cleaning system (CIP) using safe reagents.

Thanks to such a comprehensive approach, it is possible to achieve stable productivity of membrane installations, improve the quality of the final product, minimize losses of biologically active substances and reduce the cost of production. Membrane technologies not only provide a high level of purification, but also contribute to energy saving and environmental safety of the process, which makes them indispensable in the modern production of fruit and berry juices.

*Conclusions.* As a result of the study, it was found that membrane filtration is one of the most effective and environmentally friendly technologies for processing fruit and berry juices, which

provides a high level of purification without losing the natural organoleptic properties of the product. The use of membrane processes allows for the production of clarified and stable juices, preserving biologically active components, aromatic substances and natural color.

The analysis of technological parameters showed that the efficiency of the process largely depends on the optimal combination of operating pressure, temperature and flow rate. The optimal conditions for most fruit and berry juices are a pressure of 0.3...0.6 MPa, a temperature of 25...35 °C and a cross-flow speed of 1.5...2.5 m/s, which ensures maximum filtration performance with minimal membrane fouling. It was found that preliminary enzymatic treatment of raw materials helps reduce juice viscosity and increases the filtration rate by 20...25 %. In addition, the use of membranes with a hydrophilic coating or a modified surface allows to reduce the intensity of membrane fouling and increase the duration of their operation. Improving the design of membrane modules, in particular the use of turbulators and optimization of hydrodynamic conditions, contributes to increasing the stability of the process and uniformity of flow distribution. An important aspect is the implementation of effective membrane cleaning systems (CIP) using alkaline and enzyme solutions, which ensure the full restoration of their filtration properties without damaging the material. This allows reducing operating costs and extending the service life of the equipment.

In general, the improvement of the membrane filtration process in the production of fruit and berry juices should be based on an integrated approach that combines the optimization of technological parameters, rational selection of the type and material of the membrane, effective preparation of raw materials and the implementation of automated control systems. Such an approach will ensure stable quality of the final product, increase production efficiency, reduce energy consumption and contribute to the environmental safety of the technological process. Thus, the results of the study confirm that the use of membrane technologies in the production of fruit and berry juices is a promising direction of development of the food industry, which meets modern requirements for energy efficiency, environmental friendliness and quality of food products.

### *Bibliography*

1. Baklouti S., Ellouze-Ghorbel R., Mokni A., Chaabouni C. Clarification of pomegranate juice by ultrafiltration: study of juice quality and of the fouling mechanism. *Fruits*. 2012. Vol. 67 (3). P. 215–225. <https://doi.org/10.1051/fruits/2012010>
2. Wibisono Y., Alvianto D., Argo B. D., Hermanto M. B., Witoyo J. E., Bilad M. R. Low-Fouling Plate-and-Frame Ultrafiltration for Juice Clarification: Part 1 – Membrane Preparation and Characterization. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(1), 806. <https://doi.org/10.3390/su15010806>
3. Gulec H. A., Bagci P. O., Bagci U. Clarification of Apple Juice Using Polymeric Ultrafiltration Membranes: a Comparative Evaluation of Membrane Fouling and Juice Quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2017. Vol. 10 (5). P. 875–885. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1871-x>
4. Li Z., Wu C., Huang J., Zhou R., Jin Y. Membrane Fouling Behavior of Forward Osmosis for Fruit Juice Concentration. *Membranes*. 2021. Vol. 11 (8), 611. <https://doi.org/10.3390/membranes11080611>
5. Deinychenko G., Dmytrevskiy D., Honchar D., Piddubnyi O., Lavreniuk V. Technical review and intellectual property aspects of innovative membrane technologies in juice production. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі* : зб. наук. пр. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 1 (37). С. 164–173.
6. Khan F., Ur Rehman W., Younus M., Muhammad A., Ali W., Khan I. Optimal clarification of apple juice using crossflow microfiltration without enzymatic pre-treatment under different operation modes. *NUST Journal of Engineering Sciences*. 2016. Vol. 9 (1). <https://doi.org/10.24949/njes.v9i1.178>
7. Fahmi M. M. S., Qun W. FO-based integrated system for juice concentration: system design and experimental investigation. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*. 2024. Vol. 11 (1). <https://doi.org/10.33795/distilat.v11i1.6875>
8. Deinychenko G., Guzenko V., Dmytrevskiy D., Chervonyi V., Kolisnichenko T., Omelchenko O., Nykyforov R. Study of the new method to intensify the process of extraction of beet pulp. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4(11–94). P. 15–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140126>



9. Bhattacharjee C., Saxena V.K., Dutta S. Fruit juice processing using membrane technology: a review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2017. Vol. 43. P. 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.02.009>
10. Deynichenko G., Dmytrevskiy D., Guzenko V., Omelchenko O., Perekrest V. Prospects of using equipment for membrane separation of food liquids. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 2. С. 1–11. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-12>
11. Akpinar O. S., Kayiran Ö. Effects of pretreatment and various operating parameters on permeate flux and quality during ultrafiltration of apple juice. *International Journal of Food Science & Technology*. 2012. Vol. 47 (2). P. 315–324. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02729.x>
12. Deynichenko G., Dmytrevskiy D., Honchar D., Chervonyi V., Horielkov D. Review and analysis of membrane juice processing in food industry enterprises. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С. 148–156. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-18>
13. Rai R. et al. Potential of nanofiltration for the concentration of bioactive compounds from watermelon juice. *International Journal of Food Science & Technology*. 2014. Vol. 49 (9). P. 2052–2060. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12505>
14. Nameed K.W. Concentration of Orange Juice Using Forward Osmosis Membrane Process. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 14(4). P. 71–79. <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2013.4.8>
15. Apaydin A.S., Bağcı P.O. Applications of membrane separation techniques in fruit juice processing. *GIDA – The Journal of Food*. 2025. Vol. 50(3). P. 442–465. <https://doi.org/10.15237/gida.GD25027>
16. Surur Fahmi M. M., Qun W. FO-based integrated system for juice concentration: system design and experimental investigation. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*. 2025. Vol. 11 (1). P. 84–97. <https://doi.org/10.33795/distilat.v11i1.6875>

Стаття надійшла до редакції 30.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



Г. Дейниченко<sup>1</sup>, Д. Дмитревський<sup>1,2</sup>, Д. Гончар<sup>1</sup>, О. Піддубний<sup>1</sup>, В. Лавренюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Державний біотехнологічний університет

<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ МЕМБРАННОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ ПЛОДОВОЯГІДНИХ СОКІВ

### Анотація

У статті досліджено шляхи підвищення ефективності процесу мембранної фільтрації у виробництві плодовоягідних соків. Розглянуто переваги застосування мембранних технологій як енергоощадного й екологічно безпечного методу очищення, що дає змогу отримати високоякісні соки без втрати природних властивостей. Описано основні етапи технологічної схеми: підготовку сировини, ферментативну обробку, попереднє фільтрування, основну мембранну фільтрацію, промивання мембран і стабілізацію готового продукту. Проведено аналіз впливу ключових технологічних параметрів – тиску, температури, швидкості потоку та типу мембрани – на швидкість і стабільність процесу. Встановлено, що оптимальні умови для ультрафільтрації становлять тиск 0,3...0,6 МПа і температуру 25...35 °С, що забезпечує високу продуктивність та мінімальне забруднення мембран. Зазначено, що попередня ферментативна обробка сировини підвищує ефективність процесу, а використання антифолінгових мембран сприяє продовженню їх терміну служби. Результати дослідження підтверджують ефективність комплексного підходу до вдосконалення мембранної фільтрації, який дає можливість покращити якість соків, зменшити енергоспоживання та підвищити екологічну стійкість виробництва.

**Ключові слова:** мембранна фільтрація, плодовоягідні соки, ультрафільтрація, очищення, селективність мембран, якість продукту, технологічні параметри.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-2>

УДК 608.3:631.362.28

Б. В. Болтянський, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2072-4025

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: borys.boltianskyi@tsatu.edu.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЩІЛЬНОСТІ ДЕРЕВНИХ БРИКЕТІВ ВІД РОЗМІРУ ЧАСТИНОК СИРОВИНИ

*Анотація.* У статті досліджено вплив фракційного складу деревної тирси на щільність паливних брикетів, отриманих високотемпературним пресуванням. Метою роботи було кількісне обґрунтування раціонального розміру фракції для забезпечення максимального ущільнення. Експерименти проводилися з монофракціями від 2 до 6 мм за фіксованих параметрів пресування 100–110 °С та вологості сировини 8 %. Аналіз результатів показав, що найвища щільність була досягнута з використанням фракції розміром 4 мм. Оптимум пояснюється найкращим балансом між пластичною податливістю й ефективністю укладання, що сприяє якісній термопластичній консолідації лігніну. Встановлено, що використання як надмірно дрібної, так і грубої фракції знижує щільність продукту.

*Ключові слова:* брикетування, тирса, брикети, лігнін, тиск, вологість, щільність, термомеханічна активація.

*Постановка проблеми.* На тлі зростаючої ролі твердого біопалива з деревинних відходів якість кінцевого продукту, паливних брикетів, залишається критичним чинником його економічної ефективності [1; 2]. Ключовим показником якості є фізична щільність, яка прямо впливає на теплотворну здатність, логістичні витрати й опірність брикету механічним навантаженням. Технологічний процес брикетування на пресовому обладнанні потребує ретельної підготовки сировини [3]. Зокрема, фракційний склад (розмір частинок) тирси є фундаментальним, але часто недооціненим параметром. Нераціональний розмір частинок може суттєво перешкоджати процесу ущільнення. Надто дрібна фракція, незважаючи на її високу питому поверхню, може поглинати надмірну кількість вологи та створювати перешкоди для ефективного видалення повітря під час пресування, призводячи до утворення мікропорожнин. Натомість занадто великі частинки (груба фракція) зменшують контактну поверхню між частинками, перешкоджаючи активації лігніну – природного зв'язуючого. Отже, виникає потреба кількісно визначити раціональний фракційний склад тирси, який за сталих режимів пресування (температура, вологість) забезпечить максимальну щільність кінцевого продукту. Вирішення цієї актуальної науково-технічної задачі створить умови для оптимізації технологічного процесу подрібнення сировини, що, зі свого боку, підвищить загальну ефективність виробництва твердого біопалива.

*Аналіз останніх досліджень.* Процес виготовлення паливних брикетів із деревної тирси є предметом інтенсивних наукових досліджень у сфері біоенергетики, оскільки його ефективність визначається складністю фізико-хімічних і механічних явищ, що відбуваються під час ущільнення [4]. Роботи численних наукових груп підтверджують, що кінцева якість продукту – його щільність, механічна міцність і теплотворна здатність – безпосередньо залежить від термопластичної поведінки лігноцелюлозної сировини та від рівня оптимізації ключових технологічних параметрів. Дослідження в цій сфері чітко вказують, що брикетування базується на двох взаємопов'язаних механізмах: пластичній деформації та термопластичній активації лігніну. Лігнін, який є природним високомолекулярним полімерним зв'язуючим, становить зна-



чну частку деревної біомаси [5]. Встановлено, що в разі нагрівання понад 80 °С за певної вологості сировини лігнін переходить у в'язкотекучий стан. Цей перехід у термопластичний стан критично важливий і дає змогу лігніну обволікати частки целюлози та геміцелюлози, створюючи міцні міжмолекулярні й адгезійні зв'язки за подальшого прикладання високого тиску, який зазвичай варіюється в діапазоні до 100 МПа [5; 8]. Саме цей процес забезпечує формування монолітної, гомогенної структури брикету без потреби у використанні будь-яких зовнішніх хімічних або синтетичних клеїв. Численні дослідники підкреслюють вирішальне значення вологості сировини [6; 7]. Встановлено, що вода функціонує як гідротермальний пластифікатор, що має подвійний вплив: з одного боку, вона знижує температуру активації лігніну, сприяючи його ранньому й ефективному розм'якшенню, з іншого боку, існує вузький оптимальний діапазон вологості, який більшість авторів визначають як 5–10 %. Якщо вологість нижча за цей діапазон, пластичність матеріалу недостатня, а якщо ж вологість вища за 10 %, надмірна кількість води перетворюється на високотемпературну пару, що призводить до посиленої пружної післядії, розтріскування та деформації брикетів після їхнього виходу з матриці. Особлива увага в дослідженнях приділяється впливу фракційного складу (розміру частинок), оскільки ця залежність має екстремальний, нелінійний характер [9; 10]. Наукові групи, які вивчають механіку пресування, вказують, що частки менше за 1–2 мм, незважаючи на їхню теоретичну пластичність, ускладнюють процес видалення повітря через високе внутрішнє тертя, що призводить до підвищення кількості замкнених мікро порожнин та знижує ступінь ущільнення [11; 12]. Водночас грубі фракції 9–10 мм є небажаними, оскільки їхня внутрішня жорсткість та відносно мала питома поверхня перешкоджають повній пластичній деформації і ефективному цементуванню лігніном. Це призводить до формування слабких точкових зв'язків і низької кінцевої щільності. Загальноприйнятим висновком є те, що найбільш ефективним є середній розмір фракції від 3 до 8 мм, який забезпечує найкращий компроміс між ефективністю укладання та пластичною податливістю, що є критичною передумовою для максимізації щільності брикету, його механічної міцності й енергетичної ефективності [13; 14]. Таким чином, сучасні наукові дослідження чітко визначають, що оптимізація підготовки сировини, зокрема точний контроль вологості та фракційного складу, є ключовою інженерною задачею для підвищення якості та конкурентоспроможності кінцевого біопалива [15; 16].

*Формулювання цілей статті.* Метою роботи є експериментальне дослідження та кількісне обґрунтування впливу фракційного складу деревної тирси на щільність паливних брикетів. Завдання передбачають проведення аналізу гранулометричного складу вихідної сировини, розділ її на чітко визначені фракції та експериментальне виготовлення брикетів з кожної фракції за фіксованого режиму пресування ( $T = 100\text{--}110$  °С,  $W = 8$  %). Потрібно кількісно оцінити й порівняти щільність брикетів, отриманих із різних фракцій, на основі цих даних визначити раціональний фракційний склад, що забезпечує максимальний ступінь ущільнення.

*Основна частина.* Комплексне вивчення процесу брикетування подрібнених деревних відходів потребує чіткої стандартизації технологічних умов для забезпечення достовірності та порівнянності отриманих даних [17; 18]. У цьому дослідженні було зосереджено увагу на кількісному визначенні впливу фракційного складу (розміру частинок) сировини на кінцеву фізичну щільність продукту. Як вихідний матеріал використовувалися подрібнені деревні відходи соснових порід. Підготовка сировини розпочалася з етапу контрольованої термічної обробки (сушіння) [19; 20]. Усю сировину незалежно від її початкового вмісту вологи було доведено до фіксованого рівня  $W = 8$  %. Цей показник вологості було вибрано як раціональний на основі попередніх досліджень, оскільки волога в цьому діапазоні функціонує як гідротермальний каталізатор, сприяючи активізації лігніну та його ефективному переходу у в'язкотекучий стан. Процес сушіння контролювався із застосуванням лабораторного обладнання. Після



досягнення цільової вологості сировина зберігалася в герметичних умовах. Наступним етапом було подрібнення та фракціонування. Підготовлена сировина піддавалася ситовому аналізу для отримання п'яти фракцій із чітко визначеними середніми розмірами частинок: 2, 3, 4, 5, 6 мм. Така методика забезпечила достовірність впливу досліджуваного параметра. Експерименти проводилися на лабораторному пресі, оснащеному високоточними системами контролю параметрів, що гарантувало стабільність умов пресування. Технологічні параметри пресування були суворо фіксовані для всіх зразків: тиск підтримувався у вузькому діапазоні, а температура матриці – в інтервалі  $T = 100\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Час витримки під тиском для всіх зразків становив 30 секунд. Ключовий показник якості – щільність брикету – вимірювався після повного охолодження брикетів для достовірного обліку об'єму та мінімізації впливу пружної післядії, результати досліджень показані в таблиці 1.

Таблиця 1

Показники досліджень

Розмір фракції, мм	2	3	4	5	6
Щільність брикету, т/м <sup>3</sup>	1,1	1,16	1,2	1,14	1

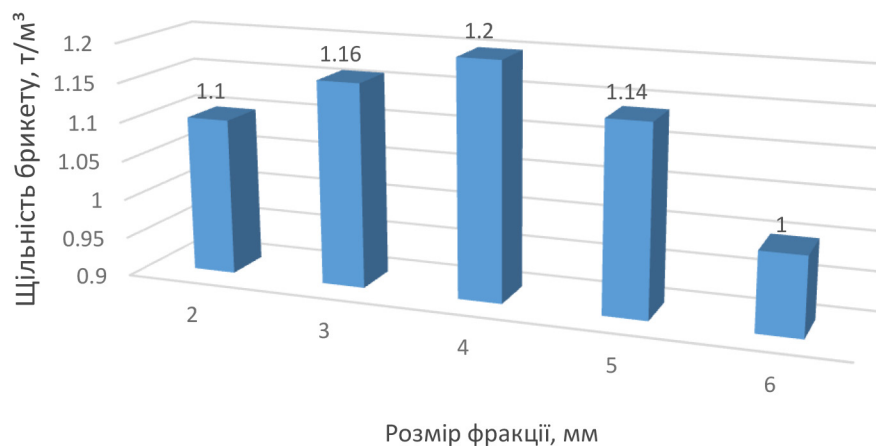


Рис. 1. Залежність щільності брикету від розміру фракції сировини

Аналіз отриманих результатів (рис. 1) вказує на нелінійну залежність щільності брикету від розміру частинок, що демонструє чітко виражений екстремум. Спостерігається стійке зростання щільності за збільшення розміру фракції від 2 до 4 мм. Мінімальна щільність у досліджуваному діапазоні  $\rho = 1,1\text{ т/м}^3$  отримана з використанням фракції 2 мм, хоча дрібна фракція і є більш пластичною, її ущільнення ускладнюється підвищеним питомим тертям і неефективним видаленням повітря з великої кількості мікропорожнин. Максимальне значення щільності  $\rho = 1,2\text{ т/м}^3$  досягнуто з фракцією 4 мм. Фізико-хімічне обґрунтування цього оптимуму полягає у досягненні найкращого балансу між ефективністю укладання та пластичною податливістю частинок під тиском. Фракція 4 мм є достатньо великою для ефективного видалення повітря та мінімізації пустот, але водночас має достатню відносну площу поверхні для гомогенної активації лігніну та формування міцних площинних зв'язків між частинками за температури вже  $100\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Подальше збільшення розміру частинок призводить до помітного зниження щільності, а за розміру 6 мм щільність падає до  $\rho = 1\text{ т/м}^3$ . Цей спад зумовлений переважанням внутрішньої жорсткості великих частинок над їхньою пластичною податливістю. Грубі фракції не можуть повноцінно деформуватися та заповнити об'єм, що призводить до формування численних порожнин у тілі брикету. Зв'язок між ними обмежується точками контакту замість монолітного цементування лігніном. Таким чином,



експериментально встановлено, що фракційний склад є критичним для максимізації щільності та якості твердого біопалива.

*Висновки.* За результатами проведеного експериментального дослідження впливу фракційного складу деревної тирси на щільність паливних брикетів, отриманих методом високотемпературного пресування, встановлено, що цей параметр має критичне значення для якості кінцевого продукту. Чітко визначено, що раціональним є використання фракції розміром 3–4 мм, яка забезпечила максимальну щільність 1,2 т/м<sup>3</sup> за сталих режимів пресування. Цей режим відповідає найкращому балансу між ефективністю укладання частинок та їхньою пластифікацією лігніну на контактних поверхнях, що є необхідною умовою для формування гомогенної, монолітної структури. Доведено, що використання фракцій як менших за 2 мм, так і більших за 6 мм призводить до значного зниження щільності. Зокрема, груба фракція знижує щільність через недостатню пластичну деформацію та формування слабких точкових зв'язків. Отримані кількісні дані дають можливість сформулювати технологічні рекомендації щодо необхідності точного контролю й оптимізації процесу подрібнення тирси. Дотримання встановленого критичного оптимуму фракційного складу є ключовим етапом для підвищення якості, міцності та, як наслідок, енергетичної ефективності й конкурентоспроможності твердого біопалива.

#### *Список використаних джерел*

1. Шевченко О. О. Використання вторинних ресурсів для ефективного теплопостачання виробничих та побутових приміщень в сільській місцевості. *Науковий вісник НУБіП України* : зб. наук. праць. Вид-во НУБіП України, 2009. № 134.
2. Полянський О. С., Д'яконов В. І., Д'яконов О. В. Комплексна оцінка енергетичних показників існуючих технологій переробки рослинних відходів у паливні брикети. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2018. Вип. 190. С. 192–202.
3. Меркулов В. М., Запорожець О. І. Розробка технології отримання паливних брикетів з деревної тріски. *Лісове та садово-паркове господарство*. 2021. № 19. С. 105–112.
4. Гелетуха Г. Г. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. *Практичний посібник*. Поліграф плюс, 2015. 72 с.
5. Гунько О. В. Оптимізація процесу пресування біомаси для виробництва паливних гранул. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2017. № 4 (31). С. 98–103.
6. Клименко В. В., Кравченко В. І., Кириченко А. М., Личук М. В., Солдатенко В. П. Експериментальна оцінка виготовлення твердого біопалива з композитів на основі рослинних відходів. *Енерготехнології и ресурсосбережение*. 2016. № 3. С. 18–24.
7. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. Результати лабораторних досліджень процесу виготовлення паливних брикетів з ріпакової соломи. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 2 (121). С. 23–31.
8. Ярмолюк М. В., Романюк І. П. Дослідження процесу брикетування біомаси під високим тиском. *Промислова теплотехніка*. 2019. № 41 (2). С. 70–76.
9. Клименко В. В. Результати попередніх досліджень виготовлення паливних пелет з рослинних відходів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Кропивницький* : КНТУ, 2015. С. 45–46.
10. Buravchuk N. I., Guryanova O. V. Technology for the Joint Briquetting of Waste Coal and Sawdust. *Solid Fuel Chemistry*, September, 2018. Vol. 52 (5). P. 308–312.
11. ДСТУ 8358:2015. Брикети та гранули паливні з деревинної сировини. *Технічні умови*.
12. Литвин О. С., Мельник Р. П. Виробництво брикетів з відходів ріпаку: технологічні аспекти. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка*. 2019. № 200. С. 156–163.
13. Поліщук А. А., Сидоренко І. В. Термодинамічні аспекти брикетування біомаси. *Відновлювальна енергетика*. 2020. С. 50–57.



14. Лук'янець В. О. та ін. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
15. Комар А. С., Болтянський Б. В. Конструктивно-технологічне вдосконалення вальцевих грануляторів з плоскою матрицею. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ. 2023. Вип. 13, том 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-11.
16. Бойко В. С., Самойчук К. О., Тарасенко В. Г., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О., Михайлов Є. В., Червоткіна О. О. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси. Київ : ПрофКнига. 2021. 468 с.
17. Панасюк В. М., Смірнов А. Г. Моделювання процесів ущільнення біомаси в шнекових пресах. *Вісник аграрної науки*, 2018. № 12. С. 60–65.
18. Blagov D. A., Gizatov A. Y., Smakuyev D. R., Kosilov V. I., Pogodaev V. A., Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 2020, Vol. 613 (1), 012018
19. Корінчук Д. М. Дослідження впливу технологічних факторів брикетування та параметрів компаундування на якісні показники композиційного торфодеревинного палива. *Відновлювана енергетика : наук.-прикл. журнал*. 2009. № 1. С. 63–70.
20. Технологія виробництва різних видів біопалива. *Електронний ресурс*. «Біопаливо та котли України», 3 листопада 2012 р. URL: <http://bio.ukrbio.com/ua/articles/2344/>

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



**B. Boltianskyi**

**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE DENSITY OF WOOD BRICKS ON THE SIZE OF RAW MATERIAL PARTICLES**

### *Summary*

The article investigates the influence of the fractional composition (particle size) of wood sawdust on the physical density of fuel briquettes obtained by high-temperature pressing. The aim of the work was to quantitatively justify the rational fraction size necessary to ensure the maximum degree of material compaction under a constant technological regime. The experiments were conducted using five clearly defined monofractions of sawdust in the range from 2 to 6 mm. The pressing conditions were strictly fixed: the matrix temperature was 100–110 °C, which corresponds to the conditions for lignin activation, and the moisture content of the raw material was maintained at an optimal level of 8 %.

Analysis of the results showed a nonlinear dependence of density on particle size, with a pronounced extremum. The highest density  $\rho = 1.2 \text{ t/m}^3$  was achieved using a fraction size of 4 mm. This optimal fraction size is explained by the achievement of the best balance between the plastic compliance of particles under high pressure of and the efficiency of packing (minimization of voids). It has been established that the use of an excessively fine fraction significantly complicates air removal and increases internal friction, while a coarse fraction of more than 6 mm reduces the density to  $\rho = 1 \text{ t/m}^3$  due to its internal rigidity and insufficient contact area for the formation of a monolithic structure.

This confirms that a fraction composition of 4 mm is the critical technological optimum for ensuring high-quality thermoplastic consolidation of lignin. The quantitative data obtained can be used to improve the raw material grinding stage on industrial lines. This will minimize the energy costs of grinding and maximize the mechanical stability of the finished biofuel product, as well as formulate practical recommendations for improving quality and competitiveness.

**Keywords:** briquetting, sawdust, briquettes, lignin, pressure, moisture content, density, thermo mechanical activation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-3>

УДК 514.18

О. О. Дереза, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-9358-7968

О. Є. Мацулевич, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

О. О. Вершков, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0009-0616-8983

А. П. Чаплінський, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-9213-5452

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: olena.dereza@tsatu.edu.ua

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ РІЗЬБОНАРИЗНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ПРИКЛАДІ ПЛАШКИ

*Анотація.* У роботі на прикладі плашок розкрито завдання, з якими стикається інженер під час проектування різьбонарізного інструменту. Робота дає можливість отримати теоретичні знання про способи та методи виготовлення плашок, види плашок і застосування плашок під час нарізання зовнішньої різьби. Розглянуто процес створення тривимірної моделі матриці методами поверхневого та твердотільного моделювання. Виконано порівняльний аналіз цих методів і наведено практичні рекомендації щодо оптимізації створення моделі матриці засобами PowerShape. Встановлено, що використання систем автоматизованого проектування під час створення моделей і креслеників різьбонарізного інструменту та складання технологічних процесів їх виготовлення дає змогу істотно спростити, прискорити й автоматизувати роботу інженерно-технічного персоналу підприємства.

*Ключові слова:* зовнішня різьба, кругла матриця, універсальний тримач матриці, 3D-модель, оптимальна стратегія, моделювання поверхні, твердотільне моделювання.

*Постановка проблеми.* Вимоги до точності та якості різьби залежать від призначення різьбової деталі в машині й забезпечуються вибором раціонального способу її виготовлення. Існує два основні способи обробки різьби: зі зняттям стружки (різання) і без зняття стружки (накопчування, видавлювання).

Більшість сучасних високопродуктивних способів обробки різьби зі зняттям стружки належать до вдосконаленого або видозміненого способу нарізання різьби різцем на токарно-гвинторізному верстаті. Розвиток цих способів відбувався шляхом використання багатопрофільного та багатолезового інструменту; збільшення кількості одночасно працюючих ріжучих лез; застосування обертового інструменту; використання твердих сплавів і значного збільшення швидкостей різання; зменшення кількості проходів під час нарізання різьби; автоматизації процесів нарізання.

До таких способів належать нарізання різьби різьбонарізними головками, різьбофрезерування, вихрове нарізання різьби, точіння різьби методом обкатування.

Методи накатування різьби ґрунтуються на використанні пластичних властивостей металу заготовки й полягають в одночасному або послідовному перенесенні профілю накатувального інструменту на виріб (рис. 1).

Вибір способу отримання різьби залежить від таких факторів:

- типу різьби (форми профілю);
- розмірів профілю різьби;
- вимог, що висуваються до точності елементів різьби;

- механічних властивостей матеріалу деталі;
- конструктивних особливостей оброблюваної деталі;
- обсягу партії деталей з різьбленням;
- наявності в цеху необхідного обладнання.

В індивідуальних і дрібносерійних машинобудівних виробництвах, а також в інструментальних і ремонтних цехах великих підприємств найпоширенішим способом отримання зовнішнього різьблення є його нарізання круглими плашками (рис. 2).

Найбільш раціональним для нарізання різьби є використання спеціальних плашкотримачів, які встановлюються в конус задньої бабки токарного верстата. На рис. 3 показано конструкцію універсального плашкотримача.

Після нарізання різьби потрібно виконати згвинчування плашки. Воно відбувається шляхом реверсування шпинделя верстата. Час згвинчування в 3...5 разів менше за час нарізання різьби.

За призначенням плашка – це різьбонарізний інструмент для нарізання або калібрування зовнішньої різьби за один прохід вручну або машинним способом. За конструкцією плашка – загартована гайка з осьовими отворами, які утворюють ріжучі кромки. Зазвичай на плашках роблять від 3 до 6 осьових отворів для відведення стружки. Товщина плашки становить від 8 до 10 витків різьби. Ріжучу частину плашки виготовляють у вигляді внутрішнього конуса.



Рис. 1. Класифікація способів отримання різьби

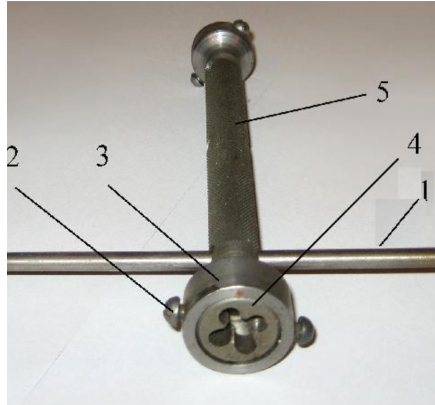


Рис. 2. Плашкодержатель для нарізання різьби вручну:

1 – важіль, 2 – гвинт-затискач, 3 – корпус, 4 – плашка кругла, 5 – рукоятка

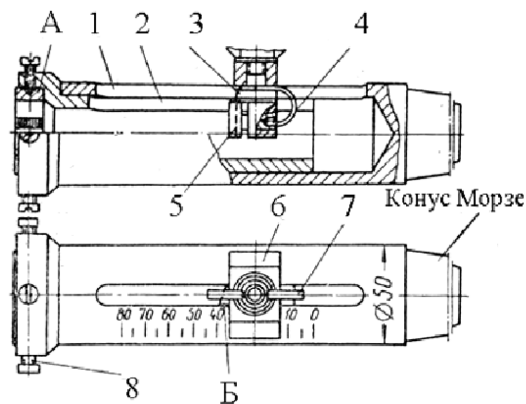


Рис. 3. Конструкція універсального плашкодержателя:

А – плашка; Б – скіс; 1 – корпус; 2 – рукоятка; 3 – сухарик; 4 – пружина; 5 – засувка; 6 – прокладка; 7 – гвинт-баранець

Довжина забірної частини становить 2...3 витки. Найпоширенішими є плашки для нарізання різьби діаметром до 52 мм.

Виготовляють плашки з легованих сталей 9ХС, ХВСГФ, швидкорізальних сталей Р18, Р6М5, Р6М5К5, Р6М5К8, іноді – з твердих сплавів. На торцевій поверхні матриці маркують позначення і ступінь точності різьби, яку можна отримати, використовуючи цю матрицю; марку сталі, крім 9ХС. Матриці класифікуються залежно від конструкції і форми зовнішньої поверхні (рис. 4).

Цільними плашками завдяки їх високій жорсткості можна отримати точну і якісну різьбу. Недоліком цих плашок є незначна зносостійкість. Розсувні плашки складаються з двох частин, які встановлюють в напрямні клупів і кріплять сухарем і гвинтом. Гвинт дозволяє регулювати діаметр різьби, що нарізається. Клупи комплектують наборами плашок для нарізання різьб різних діаметрів. Змінювати діаметр різьби на 0,1...0,3 мм завдяки своїм пружним властивостям дають можливість розрізні плашки. Їх недолік у тому, що виходить різьба менш точна порівняно з нарізаною суцільною плашкою.

*Аналіз попередніх досліджень.* Для побудови 3D-моделі плашки засобами САПР і складання технологічного процесу її виготовлення потрібно знати, з яких конструктивно-технологічних елементів вона складається.

*Основна частина.* Конструктивно-технологічні елементи цільної круглої плашки показані на рис. 5.

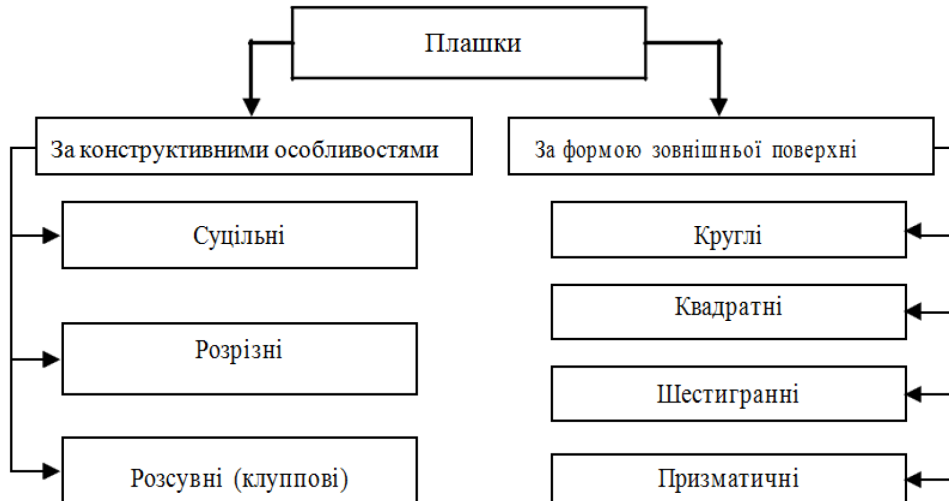


Рис. 4. Класифікація плашок

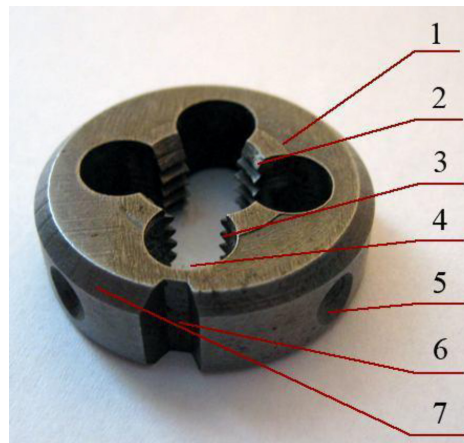


Рис. 5. Конструктивно-технологічні елементи цільної круглої плашки:

1 – корпус, 2 – ріжуча частина; 3 – калібрувальна частина; 4 – отвір для відведення стружки, 5 – бокові гнізда; 6 – кутовий паз; 7 – фаска

До конструктивно-технологічних елементів плашок належить корпус 1, який використовується для базування й закріплення плашки під час роботи. Корпус може бути суцільним; складеним із декількох частин за допомогою зварювання або припаювання; збірним, у якому окремі частини з'єднані механічно.

Ріжуча частина 2 матриці знімає основну частину припуску, формує стружку, впливає на її розподіл і навантаження вздовж ріжучої кромки матриці, створює зусилля, яке переміщує матрицю вздовж осі заготовки за допомогою самозатягування.

Калібрувальна частина 3 здійснює калібрування різьби й виконує функцію напрямної під час поздовжнього переміщення матриці в процесі різання різьби та викручування. Калібрувальну частину виконують із повним профілем різьби, виконавчі розміри якого забезпечують отримання виробу необхідної точності.

У корпусі зроблено кілька круглих отворів 4, які призначені для відведення стружки.

Бічні гнізда 5 і кутовий паз 6 на зовнішній поверхні плашки призначені для її закріплення в плашкотримачах або різьбонарізних патронах. Кутовий паз також дає змогу розрізати плашку шліфувальним кругом по перемичці й регулювати діаметр різьби завдяки спеціальному коловороту з п'ятьма гвинтами.

*Формулювання цілей статті.* Серед різьбонарізних інструментів круглі плашки належать до найбільш вживаних і найпростіших у використанні. Вони масово випускаються інструментальними підприємствами України. Тому як об'єкт дослідження доцільно вибрати круглу нероз'ємну плашку, як предмет дослідження – технологічні процеси проектування й виготовлення плашок. Побудову 3D-моделі та складання технологічного процесу виконуватимемо для круглої нероз'ємної плашки, призначеної для нарізання метричної різьби M12-6g.

Метою дослідження є розробка оптимальної стратегії побудови 3D-моделі будь-якої плашки для забезпечення мінімізації витрат часу і праці; надання рекомендацій щодо автоматизації проектування технологічних процесів виготовлення плашок.

*Основна частина.* Для вибору оптимальної стратегії побудови 3D-моделі штампа M12-6g в Power Shape створювалась у двох варіантах:

- 1) поверхневим моделюванням;
- 2) твердотільним моделюванням.

Були виділені загальні для обох варіантів етапи побудови моделі матриці (табл. 1).

Таблиця 1

План побудови моделі плашки

№	Назва етапу
1.	Створення каркасної геометрії
2.	Побудова корпусу плашки
3.	Формування бокових гнізд
4.	Формування кутового паза
5.	Формування отворів для відведення стружки
6.	Формування різьбової частини плашки

Реалізація плану побудови моделі плашки для твердотільного та поверхневого моделювання виконувалася по-різному з використанням відповідного інструментарію Power Shape. Інформацію про операції на кожному з етапів моделювання й використані інструменти наведено в табл. 2.

На першому етапі в Power Shape була намальована каркасна геометрія, яка складається із чотирьох загальних для двох варіантів моделювання контурів (рис. 6) і трьох контурів для створення різьблення поверхневим моделюванням: профілю 1 метричної різьби M12 для формування калібрувальної частини матриці, гвинтової напрямної 2, контуру для формування ріжучої частини плашки 3 (рис. 7).

Корпус плашки будувався як тіло або поверхня обертання з використанням контуру 1. Бічні гнізда в обох стратегіях побудови були створені за три операції. Кутовий паз під час застосування стратегії твердотільного моделювання вдалося сформувати за одну операцію завдяки інструменту «Створити виріз», тоді як для поверхневого моделювання були потрібні дві операції. Формування отворів для відведення стружки відбувалося за допомогою операцій витягування і створення масивів елементів. Результат виконання етапів 1–5 показано на рис. 8.

Найскладнішим етапом моделювання в стратегії поверхневого моделювання є формування різьбової частини матриці. Для її побудови були створені додаткові елементи каркасної геометрії (рис. 7). Обертанням контуру 1 по гвинтовій напрямній за допомогою функції «Автоповерхня» було отримано калібрувальну частину матриці (рис. 9); обертанням контуру 3 навколо осі OX – ріжучу частину матриці. За допомогою операції «Обмежити об'єктом» виступаючі елементи калібрувальної та ріжучої частин матриці були обмежені поверхнями корпусу й отворів для відведення стружки.

Таблиця 2

Стратегії побудови моделі плашки

№	Назва етапу	Вхідна інформація	Операції моделювання й інструменти, які використовувалися	
			Поверхнєве моделювання	Твердотільне моделювання
1.	Створення каркасної геометрії	Кресленик плашки	Інструменти меню: ЛСК, лінія, дуга, крива	
2.	Побудова корпусу плашки	Контур 1 (рис. 2.1)	Поверхня / Поверхня обертання	Тіло / Створити тіло обертання
3.	Формування бокових гнізд	Контур 2 (рис. 2.1) Корпус плашки	1. Поверхня / Поверхня обертання 2. Редагування / Створити масив 3. Редагування / Обмежити об'єктом	1. Тіло / Створити тіло обертання 2. Редагування / Створити масив 3. Елемент / Відняти обране тіло
4.	Формування бокових гнізд	Контур 4 (рис. 2.1) Корпус плашки	1. Поверхня / Поверхня витягування 2. Редагування / Обмежити об'єктом	1. Елемент / Створити виріз
5.	Формування отворів для виведення стружки	Контур 3 (рис. 2.1) Корпус плашки	1. Поверхня / Поверхня витягування 2. Редагування / Створити масив 3. Редагування / Обмежити об'єктом	1. Тіло / Створити тіло витягування 2. Редагування / Створити масив 3. Елемент / Відняти обране тіло
6.	Формування різбової частини	Контур 1 (рис. 2.2) Контур 2 (рис. 2.2) Корпус плашки	1. Поверхня / Поверхня обертання (для формування калібрувальної частини) 2. Поверхня / Поверхня обертання (для формування ріжучої частини) 3. Редагування / Обмежити об'єктом ..... 6. Редагування / Обмежити об'єктом	1. Елемент / Отвір

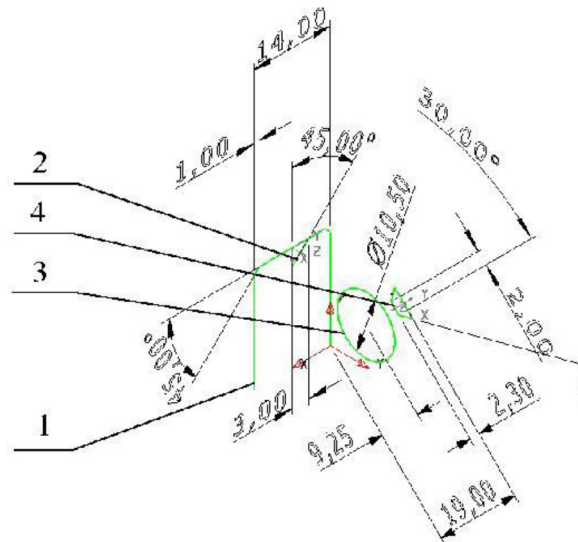


Рис. 6. Каркасна геометрія, призначена для побудови 3D-моделі плашки:

1 – контур для побудови корпусу плашки, 2 – контур для формування бокових гнізд, 3 – контур для формування отворів відведення стружки, 4 – контур для формування конічного паза

У твердотільній моделі отвір створювався операцією «Отвір». У меню операції «Отвір» у розділі «Клас і призначення отворів» були вибрані пункти випадного меню «Точна обробка (ISO)», «Різбове»; у розділі «Розміри» вказано діаметр 12 мм для формування калібрувальної частини плашки. Ріжучу частину плашки було створено за допомогою підменю «Фаска». Готові моделі плашок показані на рис. 10.

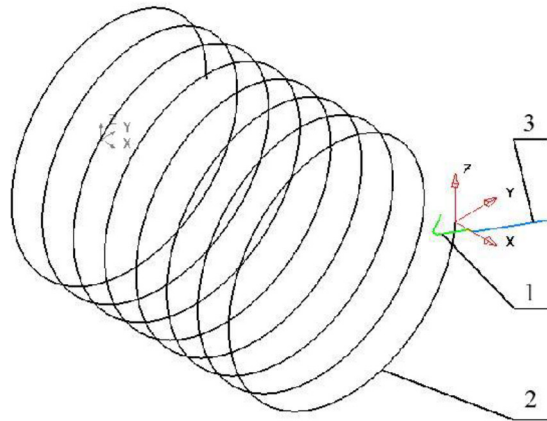


Рис. 7. Каркасна геометрія, призначена для побудови профілю різьби:  
1 – профіль метричної різьби; 2 – винтова напрямна; 3 – контур для формування ріжучої частини

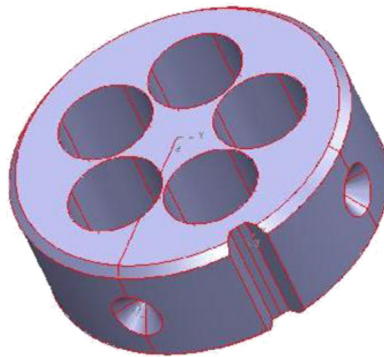


Рис. 8. Модель плашки після виконання етапів 1–5 моделювання

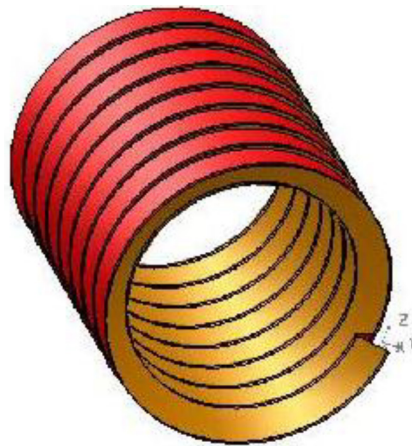


Рис. 9. Модель калібрувальної частини плашки, яка отримується поверхневим моделюванням

САПР Power Shape дає можливість побачити, який вигляд матиме виготовлена з металу плашка. Для цього за допомогою пункту меню «Формат / Матеріал» як матеріал плашки задавався метал, потім використовувалася опція «Фотореалістика». Результат роботи Power Shape показано на рис. 11.

*Висновки.* Перевагою стратегії твердотільного моделювання порівняно з поверхневим є менша кількість операцій, необхідних для створення матриці. Скорочення тривалості моделювання в цій стратегії досягається шляхом використання операції «Створити виріз» для формування кутового паза й операції «Отвір» для створення різьбової частини матриці, а також

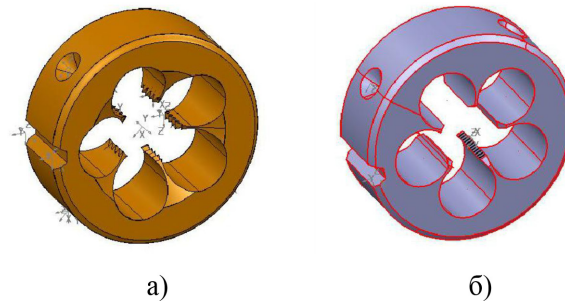


Рис. 10. 3D-моделі плашки, які створені інструментами САПР Power Shape:  
а) поверхневе моделювання; б) твердотільне моделювання

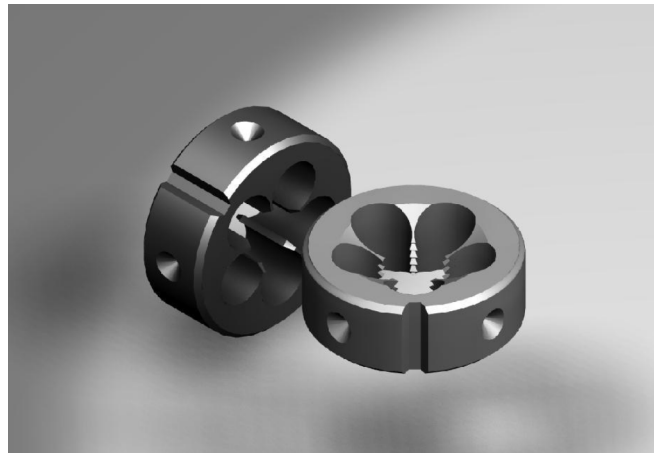


Рис. 11. Фотореалістичне зображення плашок

відсутності потреби у використанні великої кількості локальних систем координат (рис. 10). Недоліком цього способу є те, що різьбова частина матриці під час виконання операції «Отвір» моделюється набором світлих і темних смуг на внутрішній циліндричній поверхні. Це чітко видно на твердотільній моделі (рис. 10, б) і на фотореалістичному зображенні, під час переходу до якого різьблення не було промальоване (рис. 11). Якщо потреби в промальовуванні профілю різьблення не виникає, то рекомендується використовувати твердотільну стратегію моделювання плашки.

Якщо потрібно отримати 3D-профіль різьблення, доцільно поєднувати твердотільне моделювання (етапи 1–5) з поверхневим (етап 6). У цьому випадку після виконання етапів 1–5 проводиться конвертація твердого тіла в поверхні, а етап 6 виконується інструментами для поверхневого моделювання.

#### Список використаних джерел

1. Вершков О. О., Мацулевич О. Є., Тетервак І. Р., Супрун М. В. Моделювання кулачків зубозаточувальних верстатів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С. 106–110.
2. Мацулевич О. Є., Вершков О. О., Чаплінський А. П., Супрун М. В. Моделювання зубного мосту в пакеті програм DENTCAD. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С. 134–140.
3. Alrefo I. F., Rawashdeh M. O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2024. Vol. 3. P. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>



4. Alrefo I. F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 4. P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
5. Мацулевич О. С., Щербина В. М., Залевський С. В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 8, т. 1. С. 55–68.
6. Холодняк Ю. В., Гавриленко Е. А. Моделирование каркаса динамических поверхностей. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 21–24.
7. Холодняк Ю. В., Гавриленко Е. А. Моделирование кривих ліній з заданою точністю. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі: матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 28–31.
8. Гавриленко Е. А., Холодняк Ю. В. Забезпечення заданих характеристик уздовж лінійних елементів каркасу поверхні. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі: матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 58–41.
9. Івженко О. В., Антонова Г. В. Проект технології обробки базових деталей з високою якістю поверхні. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 21, т. 1. С. 310–316.
10. Козина К. В., Дуков В. О., Вершков О. О. Виготовлення прес-форми для масового виробництва. *Збірник наукових праць магістрантів та студентів*. 2021. С. 30–31.
11. Гавриленко Е. А., Холодняк Ю. В., Гоєнко Д. С., Чернобильський Д. Ю. Розробка бібліотеки функцій та САПР на основі CAD-системи POWERSHAPE. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології: матер. Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції (Мелітополь, 7–25 грудня 2020 р.)*. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. С. 93–97.
12. Гавриленко Е. А., Холодняк Ю. В., Гоєнко Д. С., Чернобильський Д. Ю. Використання бібліотеки функцій CAD-системи POWERSHAPE для побудови складальної одиниці. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології: матер. Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції (Мелітополь, 7–25 грудня 2020 р.)*. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. С. 98–102.
13. Bondarenko L., Halko, S., Matsulevych O., Tetervak I, Vershkov O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Havrysh V. Experimental Research on Unit Operation for Fruit Crops' Bones Calibration. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13 (1). P. 21.
14. Холодняк Ю. В., Гавриленко Е. А., Зінов'єва О. Г. Розробка алгоритму моделювання кривих з заданими властивостями. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 1. № 41.
15. Михайленко О. Ю., Антонова Г. В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, том 2. № 26.
16. Холодняк Ю. В., Гавриленко Е. А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
17. Вершков О. О., Бондаренко Л. Ю., Антонова Г. В., Тетервак І. Р. Аналіз дослідної експлуатації програмного модулю розрахунку норм часу обробки деталей сільськогосподарської техніки. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології: матеріали III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (Запоріжжя, 12–19 грудня 2022 р.)* Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. С. 94–100.
18. Івженко О. В., Антонова Г. В., Чаплінський А. П., Михайленко О. Ю. Спеціалізований програмний модуль розрахунку операційних норм часу обробки деталей сільськогосподарської техніки за умов індивідуальної організації праці. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології: матеріали III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (Запоріжжя, 12–19 грудня 2022 р.)* Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. С. 361–368.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025

Стаття прийнята 08.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**O. Dereza, O. Matsulevych, O. Vershkov, A. Chaplinskyi**  
**Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University**

**AUTOMATION OF THE DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES  
FOR THE MANUFACTURE OF THREAD CUTTING TOOLS  
USING THE EXAMPLE OF A DIE**

*Summary*

Threaded parts are among the most common in the technological equipment of food and processing enterprises. Thread processing on such parts is a labor-intensive operation among those performed in the mechanical workshops of machine-building enterprises, as well as in the specialized production of screws, bolts, nuts, and pins.

CAD allows engineers to significantly reduce the time required to create a model or drawing of a product. In addition, they help to identify errors at the product design stage, rather than during or even after its manufacture. The use of CAD avoids additional material and time costs associated with defects and the need to retool production equipment.

The paper uses the example of dies to reveal the tasks that an engineer faces when designing thread cutting tools.

The paper provides theoretical knowledge about the methods and techniques of die manufacturing, types of dies, and the use of dies when cutting external threads.

The process of creating a three-dimensional model of a die using surface and solid modeling methods is considered. A comparative analysis of these methods is performed and practical recommendations for optimizing the creation of a die model using PowerShape are given.

The practical result of the work is the improvement of the technological process of die manufacturing and the creation of a package of technological and design documentation using the means of the automated design system.

It was concluded that the use of computer-aided design systems during the creation of models and drawings of thread cutting tools and the compilation of technological processes for their manufacture significantly simplifies, accelerates, and automates the work of the enterprise's engineering and technical personnel.

Power Shape (Delcam) CAD was used to create three-dimensional models of the matrix.

**Keywords:** external thread, round die, universal die holder, 3D-model, optimal strategy, surface modeling, solid modeling.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-4>

УДК 664 (075.8)

В. В. Дідур<sup>1</sup>, д-р техн. наукЯ. В. Білокінь<sup>2</sup>, аспірантО. В. В'юник<sup>3</sup>, інж., ст. викл.Г. І. Дашивець<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7584-5073

ORCID: 0009-0003-4510-2780

ORCID: 0000-0002-6413-5567

ORCID: 0000-0003-2612-6077

<sup>1</sup> Уманський національний університет<sup>2</sup> Полтавський державний аграрний університет<sup>3</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: didur.vv@gmail.com

## ТЕПЛОФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПРЕС-ЕКСТРУЗІЇ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

*Анотація.* У статті представлено результати аналізу теплофізичної моделі п'ятизонного прес-екструдера маслянистих культур, визначені керуючі збурення адаптивної системи управління для досягнення цим агрегатом максимально можливого значення кількості корисного продукту – рослинної олії, підготовлено теоретичну основу для розробки алгоритму функціонування системи управління згаданим агрегатом, намічені перспективи подальших досліджень.

*Ключові слова:* прес-екструдер, маслянисті культури, теплофізична модель, адаптивна система управління, керуючі збурення, рослинна олія, оптимізація, багатозонний агрегат, алгоритм керування, математичне моделювання.

*Постановка проблеми.* Прес-екструдери олійних культур, призначені для віджимання олієвмісної сировини й отримання корисного продукту у вигляді рослинних олій, є яскравими представниками агрегатів класу багатозонних прохідних установок [1–3]. Введення в експлуатацію подібних об'єктів дає змогу досягати певних економічних результатів, чому сприяє нова промислова політика України. Подальше вдосконалення таких стратегічно важливих об'єктів, як прес-екструдери олійних культур, може сприяти покращенню їхніх технічних і технологічних характеристик. Зокрема, отримання максимально можливої кількості рослинної олії на виході є пріоритетним техніко-економічним завданням для зазначених агрегатів [4].

За сучасних умов найбільш раціональним шляхом пошуку оптимізаційних рішень є аналіз моделей досліджуваних об'єктів. Авторами було проведено детальний аналіз теплофізичної моделі п'ятизонного прес-екструдера олійних культур [5–7], а також моделі його спостерігача [5] і встановлено, що вдосконалення агрегату можливе шляхом застосування нової, більш досконалої системи керування.

*Аналіз останніх досліджень.* У [5] було вирішено задачу збільшення кількості рослинної олії у прес-екструдерах шляхом використання адаптивної системи керування. Керуючими впливами в цій системі виступали температури зон нагріву. Недоліком вибору таких керувань є інерційність виходу показників температур на задані рівні, що обмежувало спектр використання агрегатів у виробництві [8–12]. Оскільки постійні часу температур зон нагріву в агрегатах визначаються десятками хвилин, базовий п'ятизонний прес-екструдер з продуктивністю 800 кг вихідної сировини за зміну з реалізованою адаптивною системою керування здатний



ефективно працювати лише з великими партіями сировини. У разі переробки малих партій (давальноницька схема) відбувається порушення нерівності:

$$t_d \ll t_E,$$

де:  $t_d$  – час руху до екстремуму,  $t_E$  – час стабілізації екстремуму, що призводить до ефекту постійного пошуку екстремуму, невиходу на екстремум за необхідний проміжок часу, роботи в неоптимальних температурних діапазонах і, як наслідок, втрат вихідного корисного продукту.

*Мета статті.* У цій статті авторами зроблено спробу знайти інші керуючі впливи, використання яких дасть можливість усунути (або зменшити) вищезазначені недоліки роботи прес-екструдера олійних культур.

*Основна частина.* Аналіз теплофізичної моделі п'ятизонного прес-екструдера олійних культур, визначення керуючих впливів системи керування для досягнення агрегатом максимального можливого значення кількості корисного продукту (рослинної олії), підготовка обґрунтування для розробки алгоритму функціонування системи керування досліджуваного агрегату.

Аналіз теплофізичної моделі прес-екструдера олійних культур. Як базову модель прес-екструдера обираємо [4]:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{qP}{MC_1} + \frac{qQl_1}{MC_1l} \\ T_2 = T_1 + \frac{qP}{MC_2} + \frac{qQl_2}{MC_2l} \\ T_3 = T_2 \exp\left(-\frac{\alpha q S_3}{\beta_1 MC_3}\right) + \frac{qQl_3}{MC_3l}, \\ T_4 = T_3 + \frac{qP}{\beta_1 MC_4} + \frac{qQl_4}{MC_4l} \\ T_5 = T_4 \exp\left(-\frac{\alpha q S_5}{\beta_2 MC_5}\right) + \frac{qQl_5}{MC_5l} \end{cases} \quad (1)$$

де  $T_1, T_2, T_4$  – температура сировини в зонах нагрівання,  $T_3, T_5$  – температура сировини в зерних зонах;

$C_1, \dots, C_5$  – густина сировини у відповідних зонах;

$P$  – потужність нагрівача;

$Q$  – потужність внутрішнього тепловиділення;

$\alpha$  – коефіцієнт теплового обміну;

$M$  – маса сировини, що проходить через екструдер;

$q$  – коефіцієнт зв'язку;

$S_3, S_5$  – площа зерних зон, через які виводиться рослинна олія;

$l_1, l_2, l_4$  – довжина зон нагрівання;

$l_3, l_5$  – довжина зерних зон;

$\beta_1, \beta_2$  – кількість маси, що переходить до наступної зони.

Рівняння (1) можна подати у вигляді:

$$\begin{cases} T_1 = A_1 + B_1 \\ T_2 = T_1 + A_2 + B_2 \\ T_3 = T_2 \exp\left(-\frac{A_3}{\beta_1}\right) + Q_1 B_3 \\ T_4 = T_3 + A_4 + B_4 \\ T_5 = T_4 \exp\left(-\frac{A_5}{\beta_2}\right) + Q_2 B_5 \end{cases} \quad (2)$$

Коефіцієнти  $A_1, A_2, \dots, A_5, B_1, B_2, \dots, B_5$  у рівнянні 2 інтегрально відображають властивості сировини (вміст олії, вологість, засміченість, дисперсність, сорт, тип – насіння соняшнику, сої, ріпаку, бавовнику тощо), індивідуальні особливості обладнання, умови експлуатації. Зміни зазначених вище параметрів призводять до зміни коефіцієнтів  $A_i, B_i$ .

Наприклад, збільшення вологості сировини призводить до зменшення тертя, а отже, до зниження потужності внутрішнього тепловиділення  $Q$ , що, зі свого боку, змінює коефіцієнти  $B_i$  і т. д. У загальному випадку зміна будь-якого фізичного параметра (див. рис. 1.2), розглянутого в розділі 1, призводить до зміни коефіцієнтів  $A_i, B_i$ .

З моделі 2 можливо визначити модель спостерігача, яка відображає функціональну залежність:

$$h = f(T_2, T_3, T_5, Q_1, Q_2, A_i, B_i) \quad (3)$$

де  $\eta$  – кількість корисного продукту.

Модель спостерігача з рівняння 2 можна отримати у вигляді:

$$\eta = 1 - \frac{A_5}{\ln\left(\frac{T_3 + \frac{A_4}{\beta_1} + B_4}{T_5 - Q_2 B_5}\right)} \quad (4)$$

де  $\beta_1$  визначається як:

$$\beta_1 = \frac{A_3}{\ln\left(\frac{T_2}{T_3 - Q_1 B_3}\right)} \quad (5)$$

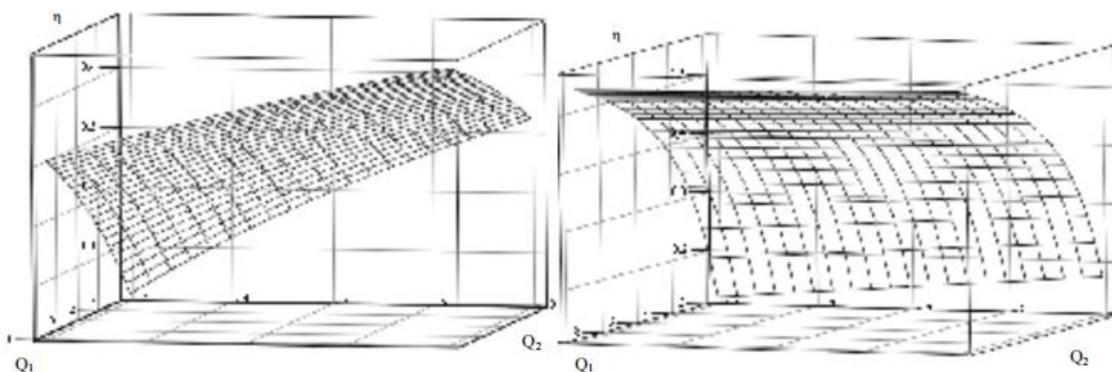


Рис. 1. Графічне зображення залежності  $\eta = f(Q_1, Q_2)$  за різних значень  $A_i, B_i$  отриманих за результатами моделювання на ПК

Моделювання процесів у прес-екструдерах олійних культур. На рисунку наведено приклад графічних зображень, що демонструють залежність  $\eta = f(Q_1, Q_2)$  за різних значень  $A_i, B_i$ , отриманих за результатами моделювання на ПК.

Отримані зображення вказують на їх тотожність зображенням, наведеним у [6], що дає змогу застосовувати аналогічний апарат (адаптивну систему керування) для досягнення максимального обсягу корисного продукту прес-екструдерами олійних культур.

*Висновки.* Проведені дослідження продемонстрували, що за допомогою підбору керуючих впливів  $Q_1, Q_2$  можна досягти максимального значення  $\eta$  а різних значень  $A_i, B_i$ . Варіювання  $Q_1, Q_2$  на практиці досягається шляхом звуження або розширення вихідних отворів зєрних зон за допомогою відповідного приводу. При цьому сталості часу такого регулювання будуть на порядок меншими, ніж у системі, описаній у [6].

*Перспективи подальших досліджень.* На підставі результатів проведених досліджень можлива розробка алгоритму функціонування адаптивної системи керування прес-екструдерами олійних культур. Цей алгоритм здатний забезпечити досягнення максимального виходу рослинної олії з досліджуваного агрегату залежно від поточних параметрів сировини й умов навколишнього середовища.

#### Список використаних джерел

1. Дацишин О. В., Ткачук А. І., Ялпачик Ф. Ю. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв : навчальний посібник. Вінниця : Нова Книга, 2008. 488 с.
2. Кропачек О. Ю. Теоретичні та практичні засади систем контролю та діагностування складних промислових об'єктів : монографія / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек. Харків : НТУ «ХП», 2015. 260 с.
3. Дідур В. В., Журавель Д. П., Шокарев О. М., Вюник О. В., Комар А. С. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. С. 180–189. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-17. <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/16597>
4. Didur V., Tkachenko V., Tkachenko A., Didur V., Vereshchaga A. Rheology of the pulp of castor-oil seeds and its effect on the process of pressing. *ADVANCES OF SCIENCE: Proceedings of articles the international scientific conference. Karlovy Vary, Kyiv : MCNIP, 2018. P. 609–618.*
5. Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю. Розробка та дослідження математичних моделей багатозонних прохідних агрегатів. *Автоматизовані системи керування та прилади автоматики*. 2005. Вип. 131. С. 78–82.
6. Мигущенко Р. П. Адаптивна система керування багатозонними прохідними технологічними агрегатами : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07. Харків, 2011. 187 с.
7. Кропачек О. Ю. Елементи цифрової електроніки в електротехнічних пристроях : навч. посіб. / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек. Харків : НТУ «ХП», 2013. 256 с.
8. Кропачек О. Ю. Алгоритм функціонування координатора системи управління прес-екструдера олійних культур / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, О. В. Маслова. *Вісник НТУ «ХП»*. Харків : НТУ «ХП», 2009. № 23. С. 104–107.
9. AVL-PASSION AND RESULTS [Електронний ресурс]. Legal Information Imprint 2013. URL: <http://www.avl.com/>
10. Montgomery D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. New York : John Wiley & Sons, 2010. 796 p.
11. Bress T. *Effective LabVIEW Programming*. NTS Press, 2013. 720 p.
12. Hinich M. J. A statistical theory of signal coherence. *IEEE J. Oceanic Engineering*. Apr. 2000. Vol. 25, No. 2. P. 256–261.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





V. Didur<sup>1</sup>, J. Bilokin<sup>2</sup>, O. Viunyk<sup>3</sup>, H. Dashyvets<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Uman National University

<sup>2</sup> Poltava State Agrarian University

<sup>3</sup> Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

## THERMOPHYSICAL MODEL OF THE PRESS-EXTRUSION PROCESS OF OIL CROPS

### *Summary*

Oilseed press extruders, designed to squeeze oil-containing raw materials and obtain a useful product in the form of vegetable oils, are prominent representatives of the class of multi-zone continuous-flow units. Obtaining the maximum possible amount of vegetable oil at the output is a priority technical and economic task for these units.

The article presents the results of the analysis of recent studies on solving the problem of increasing the amount of vegetable oil in press extruders. The disadvantages of using an adaptive control system are indicated. The results of the analysis of the thermophysical model of a five-zone press extruder for oilseed crops are presented, and the control perturbations of the adaptive control system are determined to achieve the maximum possible amount of useful product – vegetable oil – by this unit. A graphical representation of the dependence of the amount of useful product on the power of internal heat release is presented at different values of coefficients reflecting the properties of the raw material (oil content, humidity, contamination, dispersion, variety, type (sunflower seeds, soybeans, rapeseed, cotton, etc.), individual characteristics of the equipment and operating conditions. The conducted studies have shown that by selecting the control influences, it is possible to achieve the maximum value at different values. Variation in practice is achieved by narrowing or widening the outlet openings of the seer zones using an appropriate drive. A theoretical basis for the development of an algorithm for the functioning of the control system of the mentioned unit is prepared, and prospects for further research are outlined.

**Keywords:** press extruder, oil crops, thermophysical model, adaptive control system, control disturbances, vegetable oil, optimization, multi-zone unit, control algorithm, mathematical modeling.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-5>

УДК 664 (075.8)

В. В. Дідур<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-7584-5073

Д. П. Журавель<sup>2</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6100-895X

І. А. Колесніченко<sup>3</sup>, аспірант

ORCID: 0009-0007-9302-208X

Є. А. Петриченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1037-077X

<sup>1</sup> Уманський національний університет<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>3</sup> Полтавський державний аграрний університет

e-mail: didur.vv@gmail.com

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

*Анотація.* Складність прямого вимірювання просторових полів температури та вологовмісту в капілярно-пористих матеріалах зумовлює потребу у фізично обґрунтованих моделях, здатних порівнювати альтернативні режими термообробки та вибирати енергоощадні варіанти з гарантованою якістю продукту. Запропоновано феноменологічну модель нестационарного тепломасоперенесення з урахуванням капілярних і поверхневих сил, інтенсивності міжфазного масообміну та термокапілярних течій; модель спирається на рівняння двофазної фільтрації, ізотерми сорбції та термодинамічні співвідношення Кельвіна і Клапейрона – Клаузіуса. Розроблено чисельну реалізацію на основі методу зважених нев'язок (Галеркіна) та показано узгодження з експериментом у межах довірчого інтервалу. Практична цінність – підвищення точності прогнозу волого- та теплообміну й оптимізація режимів сушіння агросировини.

*Ключові слова:* двофазна фільтрація, термодинамічні співвідношення, ізотерми сорбції, теплота сорбції, метод Галеркіна, параметрична ідентифікація, верифікація моделі, прогноз якості, сушіння агросировини, енергоефективність.

*Постановка проблеми.* Нині відсутній єдиний феноменологічний підхід до сумісного тепло-і масоперенесення в пористих тілах: традиційні схеми, що походять від теорії Ликова, спираються на емпіричні коефіцієнти, чутливі до матеріалу та масштабу, і часто ігнорують поверхневі ефекти. Це ускладнює практичні розрахунки та перенесення моделей між об'єктами. Потрібні моделі, де параметри прямо виводяться з ізотерм сорбції та термодинаміки й узгоджуються з багатофазною фільтрацією.

*Аналіз останніх досліджень.* За останнє десятиліття зберігається тренд до фізично насичених моделей, які поєднують рівняння двофазної фільтрації з термодинамічними зв'язками (Кельвіна, Клапейрона – Клаузіуса) та даними ізотерм сорбції; числові методи ґрунтуються на варіаційних формулюваннях (метод зважених нев'язок / Галеркіна). Ключовим є врахування теплоти сорбції та термокапілярних течій, що суттєво впливають на енергетичний баланс і швидкості перенесення, а також верифікація моделей за польовими / лабораторними вимірюваннями.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Розробити й верифікувати феноменологічну модель нестационарного тепломасоперенесення в капілярно-пористих середовищах з урахуванням капілярних і поверхневих сил, міжфазного масообміну та термокапілярних течій.



*Завдання.* Побудувати зв'язки «тиск рідини / пара – вміст вологи – температура» на основі ізотерм сорбції та рівнянь Кельвіна і Клапейрона – Клаузіуса. Вивести узагальнені рівняння для волого- і теплообміну з явним урахуванням теплоти фазових перетворень і теплоти сорбції. Реалізувати чисельну схему (метод зважених нев'язок / Галеркіна), придатну для інженерних розрахунків. Провести параметричну ідентифікацію та верифікацію моделі за експериментальними даними, оцінити точність прогнозу.

*Основна частина.* Останнім часом під час термічної обробки зернових культур пріоритет надають високотемпературним теплоносіям, зокрема перегрітому пару, що має низку суттєвих переваг. Це зумовлює потребу у створенні нових підходів до аналітичного розв'язання наявних моделей, щоб отримувати точніші результати для задач оптимального керування технологічними параметрами процесів сушіння й обсмажування насіння олійних культур. Інтенсивні температурні режими за використання високотемпературного теплоносія, з одного боку, мають залишатися в межах допустимих технологічних властивостей зерна, а з іншого – забезпечувати зменшення питомих теплоенергетичних витрат завдяки підвищенню продуктивності.

Через складність прямих вимірювань полів температури та вологовмісту в окремих насінних принципово важливо розробити модель тепломасоперенесення, що дає змогу порівнювати широкий спектр апаратурно-технологічних схем термообробки та вибирати енергетично оптимальні варіанти з гарантованою якістю висушеного продукту [1–6]. Модель сформульовано на основі диференціальних рівнянь академіка А. В. Ликова, які описують узагальнений закон перенесення вологи у вологому зерні як у паровій, так і в рідкій фазі [7–9]. Для побудови розв'язку прийнято такі спрощення: теплопередачею за рахунок теплопровідності нехтують; усадку матеріалу та градієнт тиску не враховують; окреме зерно моделюють кулею; теплофізичні характеристики залежать від температури й вологості; початкові розподіли температури та вологи в частинці вважають однорідними [10–13]. З урахуванням цих припущень рівняння нестационарного тепломасоперенесення подано в безрозмірній формі у сферичній системі координат із відповідними початковими та граничними умовами [14–17].

$$c_m \rho_0 \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \varepsilon r_0 \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t},$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + a_m \delta \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

за постановки з граничними умовами третього роду, що описують конвекцію на поверхні тіла:

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=R} + a(\theta \Big|_{x=R} - \theta_x) - (1 - \varepsilon) r_0 \rho_0 \beta (u \Big|_{x=R} - u_p) = 0,$$

$$a_m \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=R} + a_m \delta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=R} + \beta (u \Big|_{x=R} - u_p) = 0, \quad (2)$$

разом із формулюванням початкових умов:

$$\theta(x, 0) = \theta_0, u(x, 0) = u_0, \quad (3)$$

де  $\theta_0$  та  $\theta$  – відповідно початкова й поточна температура насіння, К;  $\theta_c$  – температура теплоносія, К;

$u, u_p, u_0$  – поточний, рівноважний і початковий вологовміст насіння, кг/кг;

$\varepsilon$  – безрозмірний критерій фазового перетворення, що відображає частку вологи, яка переноситься в паровій фазі;

$r_0$  – питома теплота пароутворення, кДж/кг;

$a_m$  – коефіцієнт дифузії вологи, м<sup>2</sup>/с;



$\delta$  – термоградієнтний коефіцієнт, 1/К;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  
 $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, м/с;  
 $t$  – поточний час термічної обробки, с.

Після введення безрозмірних змінних:  $r = \frac{x}{R}$  – безрозмірна просторова координата;  
 $T = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_c - \theta_0}$ ,  $U = \frac{u}{u_0}$  – безрозмірні температура та вологовміст;  $\tau = t/t_k$  – безрозмірний час, де:  
 $t_k$  – кінцевий час теплової обробки, отримано безрозмірне подання рівнянь 1–3:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= A_{11} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + A_{12} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial U}{\partial r} &= A_{21} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + A_{22} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$r \in [0, 1], \tau \in [0, 1]$

разом із формулюванням граничних умов:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=1} + a_1 \left[ 1 - (T(r, \tau)|_{r=1}) - a_2 (U(r, \tau)|_{r=1}) - \frac{u_p}{u_0} \right] &= 0, \\ \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=1} + b_1 \left[ 1 - (T(r, \tau)|_{r=1}) + b_2 (U(r, \tau)|_{r=1}) - \frac{u_p}{u_0} \right] &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

разом із формулюванням початкових умов:

$$T(r, 0) = 0, U(r, 0) = 1, \quad (6)$$

разом з умовою, що розв'язок є обмеженим:

$$|T, U| < \infty, \quad (7)$$

у яких значення критеріальних безрозмірних груп визначаються рівняннями:  
 $A_{11} = 1 + \varepsilon Ko Lu Pn$ ,  $A_{12} = \varepsilon Ko Lu$ ,  $A_{21} = Lu Pn$ ,  $A_{22} = Lu$ ,  $a_1 = Bi_q$ ,  $a_2 = (1 - \varepsilon) Ko Lu Bi_m$ ,  $b_1 = Pn Bi_q$ ,  
 $b_2 = Bi_m (1 - (1 - \varepsilon) Pn Ko Lu)$ , а використані критеріальні групи мають такий вигляд:

$Ko = r_0 \cdot u_0 / c_q (\theta_c - \theta_0)$  – критерій Косовича;

$Lu = \frac{a_m}{a}$  – критерій Ликова;

$Pn = \frac{\delta (\theta_c - \theta_0)}{u_0}$  – критерій Поснова;

$Fo = \frac{at}{R^2}$  – число Фур'є;

$Bi_q = \alpha R / \lambda$ ,  $Bi_m = \beta R / a_m$  – критерії Біо для теплообміну та масообміну.

Після підстановки нових (безрозмірних) шуканих функцій:

$$T = \frac{Z(\tau, r)}{r}, \quad U = \frac{W(\tau, r)}{r}, \quad (Z, W) \in C(0 \leq r \leq 1) \quad (8)$$

за переходу до  $Z$  та  $W$  система (4) істотно спростилася:

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau} = A_{11} \frac{\partial^2 Z}{\partial r^2} + A_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial r^2},$$



$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = A_{21} \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + A_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \quad (9)$$

разом із формулюванням граничних і початкових умов:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial Z(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=1} + a_1 [1 - Z(r, t)] \Big|_{r=1} - a_2 \left[ W(r, t) \Big|_{r=1} - \frac{u_p}{u_0} \right] &= 0, \\ \frac{\partial W(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=1} + b_1 [1 - Z(r, t)] \Big|_{r=1} + b_2 \left[ W(r, t) \Big|_{r=1} + \frac{u_p}{u_0} \right] &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$Z(0, r) = 0, \quad W(0, r) = r. \quad (11)$$

Беручи до уваги обмеженість  $T$  та  $U$  поблизу  $r = 0$ , згідно з формулами 7 та 8 одержуємо:

$$Z(\tau, r) \Big|_{r=0} = W(\tau, r) \Big|_{r=0} = 0. \quad (12)$$

У такій постановці задача редукується до пошуку розв'язку системи 9, що задовольняє граничні умови формули (10, 12) та початкові умови (11). При цьому вважалося, що на сферичній межі зернини з  $r = 1$  розв'язок задається функціями:

$$Z \Big|_{r=1} = \varphi(\tau), \quad W \Big|_{r=1} = \psi(\tau). \quad (13)$$

Для заміни складної форми граничних умов системи (10) на більш зручні у використанні умови рівнянь (13) запропоновано застосувати розклад невідомих функцій  $\varphi(\tau)$ ,  $\psi(\tau)$  у модифіковані ряди Фур'є. За такої постановки модельна задача зводиться до пошуку розв'язку системи (9) з початковою умовою системи (11) та граничними умовами системи (12), причому невідомі функції з системи (13) потрібно підібрати так, щоб були точно виконані граничні умови системи (10).

У запропонованій схемі розв'язок подається у вигляді модифікованих рядів Фур'є такого типу:

$$Z = M_Z + \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(\tau) \sin(m \pi r), \quad W = M_W + \sum_{m=1}^{\infty} W_m(\tau) \sin(m \pi r) \quad (14)$$

відповідні вирази для  $M_Z$  і  $M_W$  набувають вигляду:

$$\begin{aligned} M_Z &= \varphi(\tau)r + \varphi_0(\tau) \left( \frac{r^2}{2} - \frac{r^3}{6} - \frac{r}{3} \right) + \varphi_1(\tau) \left( \frac{r^3}{6} - \frac{r}{6} \right), \\ M_W &= \psi(\tau)r + \psi_0(\tau) \left( \frac{r^2}{2} - \frac{r^3}{6} - \frac{r}{3} \right) + \psi_1(\tau) \left( \frac{r^3}{6} - \frac{r}{6} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Функції  $M_Z$  та  $M_W$  забезпечують рівномірну збіжність розкладів системи 14 на всьому відрізьку  $r \in [0, 1]$  і на його межах, включно з другими частинними похідними за радіальною координатою  $r$ . Вирази для  $Z$  і  $W$  у системі (14) разом із відповідними другими похідними в системі (9) з  $r = 0$  та  $r = 1$  перетворюються на тотожності. Завдяки цій властивості розклади системи (14) можна було почленно двічі диференціювати та підставляти у диференціальні рівняння (10) граничні умови системи (10) і початкові умови системи (11). Збіжність модифікованих рядів Фур'є має порядок  $\frac{5}{\pi m}$ , де  $m$  – номер доданка в сумах системи (14). З огляду на високу швидкість збіжності для інженерної точності виявилось достатньо обмежитися двома першими членами ряду й отримати наближений розв'язок у вигляді таких залежностей:

$$T = \frac{1}{r} [M_z + Z_1(\tau) \sin(m \pi r)],$$

$$U = \frac{1}{r} [M_w + W_1(\tau) \sin(m \pi r)]. \quad (17)$$

Обчислення виконували в середовищі Maple. Підсумки моделювання подано на рис. 1–3. Проведено ідентифікацію параметрів моделі за експериментальними даними процесу сушіння насіння ріпаку в барабанній сушарці. Числовий експеримент у дусі підходу з урахуванням

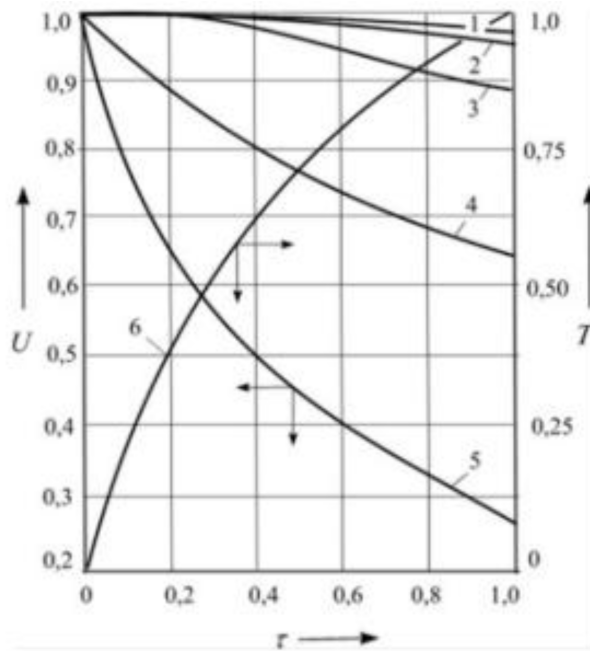


Рис. 1. Зміна вологовмісту криві 1–5 та температури крива 6 у часі в безрозмірних одиницях для різних радіальних позицій зернини  $r$ :  
 $1 - r = 0$ ;  $2 - r = 0,25$ ;  $3 - r = 0,5$ ;  $4 - r = 0,75$ ;  $5 - r = 1,0$ ; 6 — сукупність профілів для  $r = \{0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0\}$

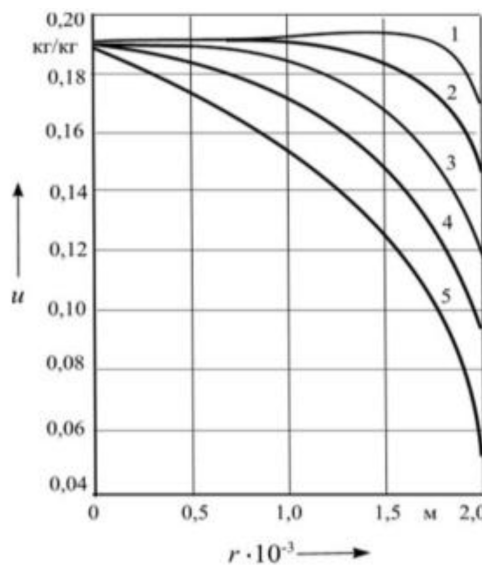


Рис. 2. Радіальні розподіли вологовмісту зернини для послідовних моментів часу  $t$ :  
 $1 - 0,20$ ;  $2 - 0,40$ ;  $3 - 0,60$ ;  $4 - 0,80$ ;  $5 - 1,0$

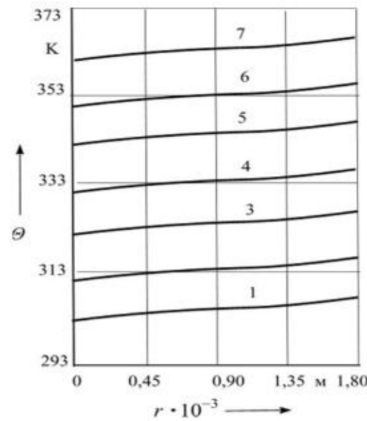


Рис. 3. Радіальні профілі температур у зернині в моменти часу  $t$ : криві 1–7 відповідають значенням  $t = 0,14; 0,28; 0,42; 0,56; 0,70; 0,84; 0,98$  відповідно

Таблиця 1

Тепломасообмінні характеристики насіння ріпаку

Позначення	Найменування	Чисельне значення
$R$	Еквівалентний радіус зернини ріпаку, м	0,0018
$u_0$	Початковий вологовміст насіння ріпаку, кг/кг	0,1749
$u_p$	Рівноважний вологовміст, кг/кг	0,096
$\theta_0$	Температура зерна на вході, К	293
$\theta_c$	Температура перегрітої пари, К	393
$\varepsilon$	Коефіцієнт (критерій) фазового перетворення, безрозмірний	1
$\delta$	Термоградієнтний коефіцієнт, 1/К	0,00122
$\rho_0$	Густина абсолютно сухого зерна, кг/м <sup>3</sup>	620
$c_q$	Питома теплоємність зерна, кДж/(кг · К)	2,7
$a$	Коефіцієнт температуропровідності, м <sup>2</sup> /с	$1,1 \cdot 10^{-7}$
$\lambda$	Коефіцієнт теплопровідності продукту, Вт/(м · К)	0,2225
$a_m$	Коефіцієнт дифузії води в зерні, м <sup>2</sup> /с	$1,324 \cdot 10^{-10}$
$\alpha$	Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м <sup>2</sup> · К)	0,1064
$\beta$	Коефіцієнт масовіддачі, кг/[м <sup>2</sup> · с · (кг/м <sup>3</sup> )]	$3,775 \cdot 10^{-7}$
$r_0$	Питома теплота пароутворення, кДж/кг	2452,16

даних табл. 1 забезпечив найкраще узгодження розрахункових та експериментальних кривих (рис. 4), при цьому похибка моделювання становила 12,5 %.

Розраховані метрики якості показали, що середня похибка апроксимації і коефіцієнт детермінації для температури не перевищують 4 % та 0,957, а для вологовмісту – 2 % і 0,968 відповідно.

**Висновки.** Отже, з урахуванням прийнятих припущень модель тепломасообміну А. В. Ликова та її аналітичне розв’язання із застосуванням модифікованих рядів Фур’є для обчислення полів температури й вологості в окремому зерні коректно відтворюють реальний процес термічної обробки масляних культур сферичної форми та дають змогу отримувати наближені розв’язки із заданою точністю.

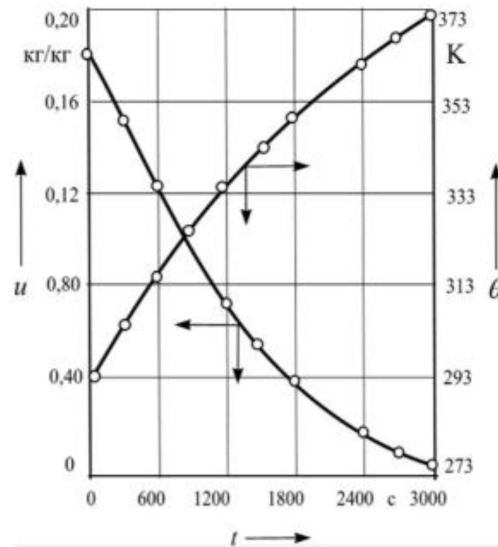


Рис. 4. Порівняння розрахункових кривих сушіння та нагрівання насіння ріпаку з експериментальними точками в барабанній сушарці

#### Список використаних джерел

1. Гінзбург А. С. Основи тепломасообміну в харчових технологіях. Київ : НУХТ, 2015. 428 с.
2. Rudobashta S. P., Zaichenko V. M. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. *Springer*, 2016. 412 p.
3. Didur V. V. Modeling of heat treatment of oilcrop seeds with high-temperature heat carrier. *Bulletin of Uman National University of Horticulture*. 2024. No. 2. P. 45–53.
4. Podgornyi V. Simulation of thermal and moisture fields in grain drying processes. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2014. Vol. 2 (1). P. 45–52.
5. Ginzburg A. S. Thermodynamics and Heat Transfer in Food Engineering. *CRC Press*, 1985. 550 p.
6. Остриков О. В. Теплофізичні процеси сушіння зерна та насіння олійних культур. Харків : ХНТУСГ, 2007. 322 с.
7. Didur V. V. Parametric identification of heat and mass transfer models for rapeseed drying. *Engineering and Technology Journal*. 2023. Vol. 11 (3). P. 78–86.
8. Posnov A. I. Criteria equations in the theory of heat and mass transfer. *Thermal Engineering*. 1974. Vol. 21 (4). P. 67–74.
9. Дідур В. В., Журавель Д. П., Шокарев О. М. та ін. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ* ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 3. 10 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-3-18
10. Журавель Д. П., Дідур В. В. Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння ріпачини на енергетичну біосировину : монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 275 с., іл.
11. Zhao L., Kim S. Design and performance of conical centrifuges in food industry. *Separation Science and Technology*. 2023. Vol. 58 (7). P. 1153–1168.
12. Gupta R. Advances in filtration media for edible oil purification. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. Vol. 45 (5), e13921.
13. Dmitry Milko, Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1/12 (103). P. 24–29.
14. Dmytro Milko. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH — Agricultural Engineering. National Institute Of Research-Development For Machines And Installations Designed To Agriculture And Food Industry — INMA Bucharest*, 2020. Vol. 60, no. 1. P. 269–274.



15. Struchaiev N. Ways to improve the efficiency of pipelines heat insulation. *Problems of the Regional Energetics*. 2020. Vol. 2 (46). P. 43–52.
16. Korobka S., Syrotyuk S. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*. 2021. Vol. 2 (50). P. 60–75.
17. Nadikto V., Verechaga O. Improving the efficiency of pressing the male of castor seeds in the screw press. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2021. Vol. 1 (59). P. 48–53.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



V. Didur<sup>1</sup>, D. Zhuravel<sup>2</sup>, I. Kolesnichenko<sup>3</sup>, I. Petrychenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Uman National University

<sup>2</sup> Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

<sup>3</sup> Poltava State Agrarian University

## MODELING OF HEAT TREATMENT OF OILCROP SEEDS WITH HIGH-TEMPERATURE HEAT TRANSFER

### *Summary*

Recently, during the thermal treatment of grain crops, priority has been given to high-temperature heat carriers, in particular superheated steam, which has a number of significant advantages. This necessitates the creation of new approaches to the analytical solution of existing models in order to obtain more accurate results for the tasks of optimal control of technological parameters of the processes of drying and roasting oilseeds. Intensive temperature regimes when using a high-temperature heat carrier, on the one hand, must remain within the limits of permissible technological properties of the grain, and on the other hand, ensure a reduction in specific heat and energy costs due to increased productivity. Due to the complexity of direct measurements of temperature fields and moisture content in individual seeds, it is fundamentally important to develop a heat and mass transfer model that allows comparing a wide range of hardware and technological schemes of heat treatment and choosing energy-optimal options with guaranteed quality of the dried product. The complexity of direct measurement of spatial fields of temperature and moisture content in capillary-porous materials necessitates the need for physically based models capable of comparing alternative heat treatment modes and selecting energy-saving options with guaranteed product quality. A phenomenological model of unsteady heat and mass transfer is proposed, taking into account capillary and surface forces, interphase mass transfer intensity, and thermocapillary flows; the model is based on the two-phase filtration equation, sorption isotherms, and Kelvin and Clapeyron–Clausius thermodynamic relations. A numerical implementation based on the weighted residual (Galerkin) method is developed and agreement with the experiment within the confidence interval is shown. The practical value is to increase the accuracy of the prediction of moisture and heat transfer and optimize the drying modes of agricultural raw materials.

**Keywords:** two-phase filtration, thermodynamic relations, sorption isotherms, heat of sorption, Galerkin method, parametric identification, model verification, quality prediction, drying of agricultural raw materials, energy efficiency.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-6>

УДК 631.3–192:662.63

Д. П. Журавель<sup>1</sup>, д-р техн. наукВ. В. Дідур<sup>2</sup>, д-р техн. наукМ. В. Шевчук<sup>2</sup>, Ph.D.

ORCID: 0000-0002-6100-895X

ORCID: 0000-0001-7584-5073

ORCID: 0000-0002-0123-0348

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Уманський національний університет

e-mail: dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua

## ОБГРУНТУВАННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОЛОГІЧНИХ ОЛИВ ДЛЯ ГІДРОСИСТЕМ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

*Анотація.* У роботі проведено обґрунтування триботехнічних властивостей біологічних олив для гідросистем сільськогосподарської техніки. Встановлено, що в разі використання біологічних змащувальних матеріалів рекомендується застосування металоплакувальних добавок, що унеможливить шкідливий вплив вільних жирних кислот оливи на метали деталей сполучень і забезпечить нормовані ресурси вузлів і агрегатів сільськогосподарської техніки. Для збільшення строку служби елементів гідравлічних систем з 8000 до 9000 мотогодин потрібно вводити в біологічні оливи добавки: металоплакувальну типу МКФ-18 у кількості 0,8...1,0 % для забезпечення ефекту вибіркового переносу.

*Ключові слова:* триботехнічні властивості, гідравлічна система, біологічні оливи, сільськогосподарська техніка, сервовітна плівка, механізм вибіркового перенесення металу.

*Постановка проблеми.* Змащувальні матеріали на основі продуктів рослинного і тваринного походження широко використовували в техніці, починаючи з бронзового століття і аж до середини ХХ століття. Топлений яловичий і свинячий жир (змащення для осей коліс залізничних вагонів); оливи: оливкова (моторні оливи), спермацетова, китовий жир (індустріальні оливи для текстильного обладнання, оливи для трансмісій), ріпакова (технологічна олія в металообробці), кокосова (технологічні оливи для прокатки металів), талова (компонент циліндрових олив). Для поліпшення експлуатаційних властивостей в ці оливи вводили різні добавки та інші оливи.

Розробка високоякісних нафтових олив із присадками, розширення використання синтетичних змащувальних матеріалів відтіснили рослинні оливи та жири на другий план. Цьому сприяла їх більш висока вартість (порівняно з нафтовими) і низька термічна, антиокислювальна й гідролітична стабільність. Однак відновлюваність сировинних ресурсів, екологічність, високі змащувальні властивості зумовили відродження інтересу до природних олив і жирів, продуктів і відходів їх переробки як основ і компонентів змащувальних матеріалів.

До теперішнього часу продукти на базі рослинних олив займають невелику нішу на світовому ринку. Переваги рослинних олив близькі до синтетичних, ряд синтетичних продуктів виробляють на основі «біосировини» для забезпечення добрих екологічних властивостей.

Принципово новий напрям – це виробництво олив, у яких дисперсійним середовищем слугують рослинна олива, її суміш із нафтовою або синтетичною. Основна екологічна перевага таких продуктів – біорозклад. Їх структура практично не відрізняється від структури мастил на базі нафтових олив, тому дослідження в цій галузі є актуальним і має практичну цінність.

*Аналіз останніх досліджень.* Альтернативою змащувальним матеріалам на нафтовій основі можуть слугувати масла (жири) рослинного і тваринного походження, біологічні мастильні мате-



ріали (БСМ). Вони нетоксичні, володіють високим (до 100 %) біорозкладом і прекрасними змащувальними властивостями [1–4]. Ці продукти й відходи їх переробки можна використовувати для виробництва мастильних матеріалів практично всіх видів: олив, пластичних мастил, мастильно-охолоджувальних технологічних засобів (МОТЗ), технологічних мастил, а також присадок.

Виробництво тваринних жирів засноване переважно на витоплюванні їх з сировинної маси; рослинних олив – на холодному й гарячому пресуванні олієвмісного насіння, екстракції або комбінуванні цих методів. Поновлювальною сировиною для виробництва мастильних матеріалів можуть слугувати рослинні оливи та тваринні жири після попереднього очищення – рафінації, продукти їх хімічної переробки – складні ефіри, полімерні та сульфовані з'єднання, а також відходи рафінації – жирові гудрони, дистильовані жирні кислоти [5–11].

За хімічним складом рослинні оливи являють собою тригліцериди – повні складні ефіри гліцерину та вищих одноосновних карбонової кислоти, як насичених (стеаринової, пальмітинової), так і ненасичених (олеїнової, лінолевої). У оліях завжди присутні вільні кислоти (а іноді і спирти), мила, фосфати, вітаміни, фарбувальні та слизисті речовини [12–17]. Специфічний склад таких продуктів обумовлює їх унікальні властивості як мастильних матеріалів. Входячи до складу рослинних олій, жирні кислоти діють як поверхнево-активні речовини (ПАР), їх складні ефіри утворюють мастильну плівку на поверхні тертя, жирні спирти виступають у ролі своєрідних розчинників. Відомо, що в багатьох країнах ведуться роботи з отримання на базі рослинних олив змащувальних матеріалів, присадок і пластичних мастил, найбільш інтенсивно у США, Англії, ФРН, Австрії [18–23]. Отже, цей напрям досліджень має науковий інтерес і практичну цінність.

*Формулювання цілей статті.* Метою статті є обґрунтування триботехнічних властивостей біологічних олив для гідросистем сільськогосподарської техніки.

*Основна частина.* Як відомо з основних положень хімотології і триботехніки, проблеми зменшення тертя, корозії та загального зносу машин і механізмів, тісно пов'язані між собою. Незважаючи на те що хімотологія і триботехніка мають багато спільного, між ними є істотні розходження. Хімотологія безпосередньо зв'язана з науковими основами синтезу й виробництва паливо-мастильних матеріалів. Крім того, хімотологія займається як теорією, так і практикою горіння палив, окислювання і зміни властивостей паливо-мастильних матеріалів з урахуванням їх збереження, експлуатації та ін. Усіма цими питаннями триботехніка практично не займається. З іншого боку, триботехніка більшою мірою займається металом як таким, питаннями машинобудування, контактними взаємодіями, адгезійним зносом, тертям, корозійно-механічними видами зносу тощо. В останньому випадку хімотологія і триботехніка спираються на електрохімію і знання про корозію, міри її попередження за допомогою різних засобів, у тому числі із застосуванням інгібірованих нафтопродуктів різного призначення. Інакше кажучи, хімотологія більшою мірою стосується нафтопереробної і нафтохімічної промисловості, триботехніка – машинобудування. Розвиваючись паралельно, вони взаємно збагачують одна одну й забезпечують основні напрями в боротьбі з тертям, корозією і загальним зносом.

Для оцінки тертя потрібно врахувати взаємодію між контактуючими тілами, зовнішні впливи, накопичення та розсіювання енергії та наслідки трибологічних процесів.

Основними елементами трибосистеми є деталі з твердих тіл D1, D2, мастильний матеріал С і навколишнє середовище О. Деталлями можуть бути різні деталі машин (у нашому випадку – шестерня та платик гідронасоса); мастильний матеріал (робоча рідина); довкілля – безпосереднє оточення деталей.

Взаємодії, що протікають у статичному та динамічному станах трибосистеми, схематично зображені на рис. 1 і 2.

У трибосистемі спектр зовнішніх впливів становлять сили або енергія (механічна, електрична, тепла), інакше кажучи, зовнішні впливи мають енергетичний характер.

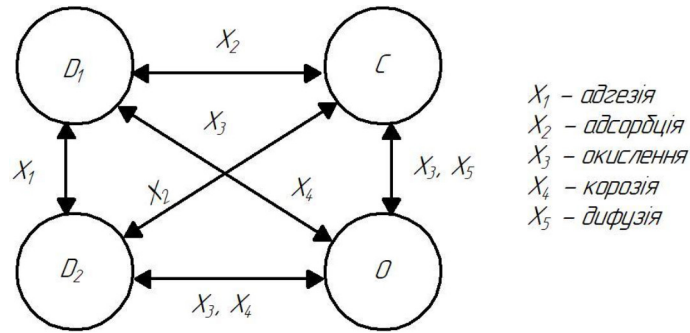


Рис. 1. Взаємодії, які протікають у статичному стані трибосистеми

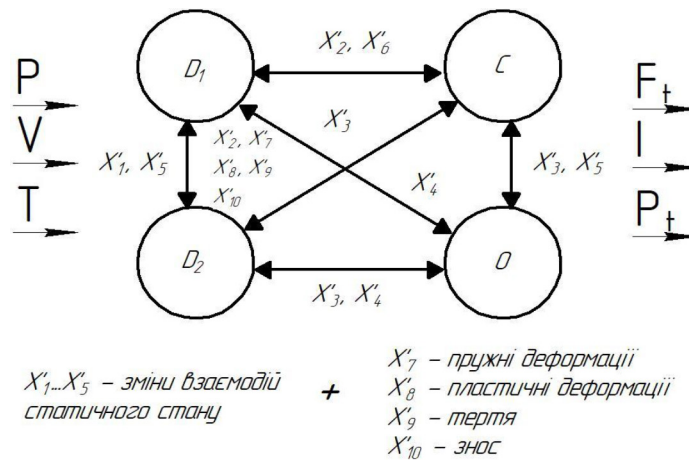


Рис. 2. Взаємодії, що протікають у динамічному стані трибосистеми

Основними наслідками трибопроцесів є опір тертя  $F_t$ , зношування та заїдання  $I$ , супутні процеси  $P_t$ .

Трибологічна система може змінювати свої функціональні характеристики під час роботи. Окремі стани, у яких може бути трибосистема під час експлуатації, можна показати на графіку зміни зношування від часу (рис. 3).

Система автоматично пристосовується до оптимальних умов взаємодії деталей  $D_1$  та  $D_2$ . Це період саморегулювання. Властивості деталей і взаємодії між ними змінюються таким чином, що

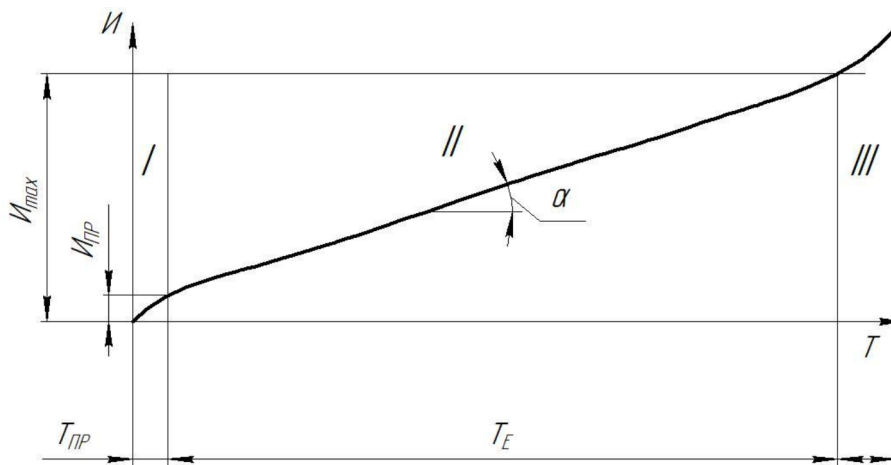


Рис. 3. Періоди роботи трибосистеми:

$I$  – період припрацювання деталей, що є з погляду інтенсивності зношування нестационарним

за незмінного зовнішнього впливу зменшується інтенсивність зношування. II – період нормальної експлуатації, коли процеси зношування стаціонарні в часі роботи системи. Цей стан триваліший за всі інші стани експлуатації. Від тривалості другого періоду залежить тривалість нормальної експлуатації системи. III – період інтенсивного зношування деталей системи, зношування може мати лавиноподібний характер і призвести до аварії. Інтенсивне зношування є наслідком змін властивостей матеріалів і характеристик деталей, що перебувають у трибоконтакті. З усіх факторів, що впливають на тертя й інтенсивність зношування деталей гідросистеми під час її експлуатації, найбільш керованим є вплив мастильного матеріалу (робочої рідини).

У разі застосування біологічних змащувальних матеріалів рекомендується застосування металоплакувальних присадок, що унеможливить шкідливий вплив вільних жирних кислот оливи на метали деталей сполучень і забезпечить нормовані ресурси вузлів і агрегатів сільсько-господарської техніки. Результати досліджень щодо впливу концентрації багатофункційної присадки МК «МКФ-18» для ріпакової оливи до стабілізації коефіцієнта тертя наведені на рис. 4.



Рис. 4. Залежність коефіцієнту тертя від концентрації багатофункційної присадки МК «МКФ-18» для ріпакової оливи

Із залежності видно, що стабілізація значень коефіцієнта тертя відбувається за концентрації присадки МК «МКФ-18» для рослинної ріпакової оливи в межах 0,9–1,0 %.

На рис. 5 наведено структурну схему методології дослідження властивостей робочих рідин для гідравлічних систем.

Гістограми зносу пар тертя елементів гідроприводу в середовищі біологічних оливи наведені на рис. 6.

Із характеру гістограми випливає, що триботехнічні властивості біологічних оливи кращі за нафтові. Під час роботи трибоспряжень, основу яких становить мідь, у середовищі біологічних оливи забезпечується ефект вибіркового перенесення металів.

Механізм реалізації вибіркового перенесення металів – це вид тертя, який обумовлений мимовільним утворенням в зоні контакту тонкої металевої плівки, що не окислюється, має низький опір зсуву і не здатна накопичувати за деформації дислокації. На плівці внаслідок хімічного зв'язку може відбуватися утворення координаційних сполук продуктів механічної деструкції вуглеводнів оливи, створюючи додатковий антифрикційний шар. Ця плівка підвищує зносостійкість поверхні (до двох порядків) та знижує сили тертя (на порядок) порівняно з аналогічними умовами тертя в разі граничного змащення.

З літературних джерел [6; 12; 13] випливає, що ефект вибіркового перенесення дає змогу під час створення вузлів тертя зменшити їх вагу та габарити на 15–20 % шляхом підвищення (в 1,5–2 рази) вантажопідйомності пар тертя, суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії машини (наприклад, для глобoidного редуктора з 0,7 до 0,85, а для пари гвинт – гайка з 0,25 до 0,5), а отже, скоротити витрати електроенергії, підвищити надійність і збільшити термін служби машин та міжремонтні терміни, а також завдяки цьому значно (до 2 разів) скоротити

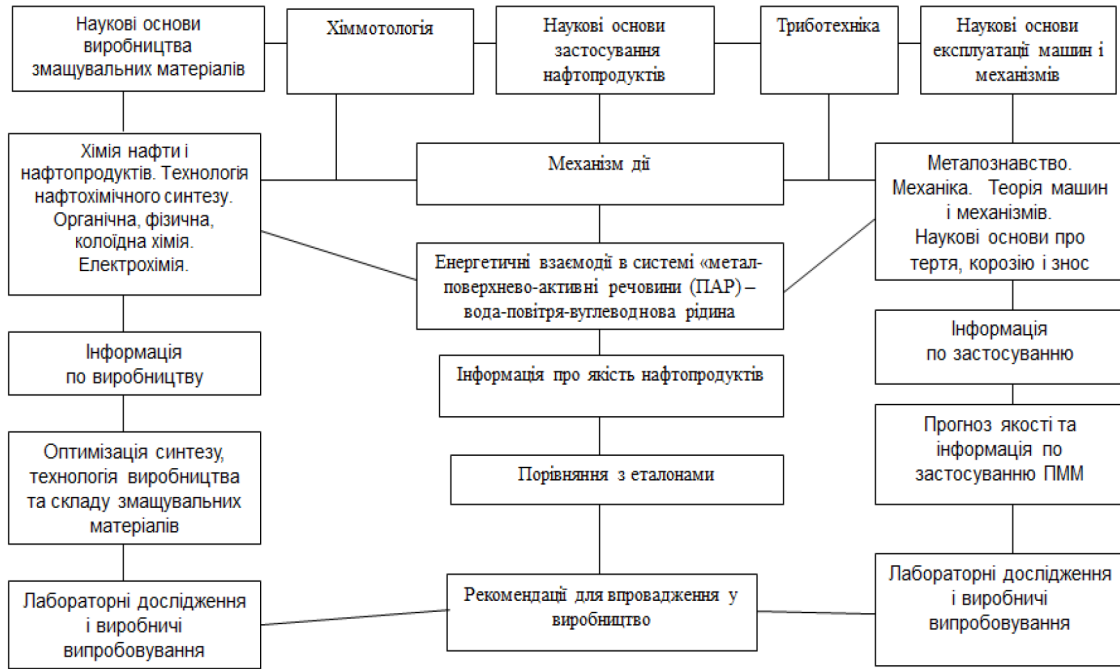


Рис. 5. Структурна схема методології дослідження властивостей робочих рідин для гідравлічних систем

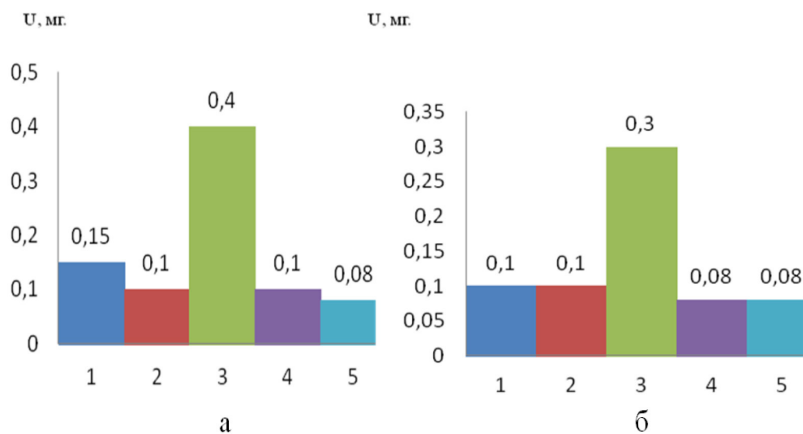


Рис. 6. Гістограми зносу пар тертя елементів гідравлічних систем в середовищі біологічних оливок:

а – знос пари тертя «золотник – корпус гідророзподільника»; б – знос пари тертя «торець шестерні гідронасосу – пластик» 1 – ріпакова олива; 2 – ріпакова олива + 1,0 % МК «МКФ-18»; 3 – нафтова олива М-10-В2; 4 – соняшникова олива; 5 – соняшникова олива + 1,0 % МК «МКФ-18»

витрати праці, часу, енергії на приробіток та обслуговування машини, зменшити приблизно вдвічі витрату мастильних матеріалів (рис. 7).

Металева мідну плівку, що утворюється в процесі тертя, називають «сервовитною» (від латів. servo-witte – «рятувати життя»). Вона являє собою речовину (в цьому випадку метал), утворену потоком енергії та існуючу в процесі тертя. Тертя не знищує плівку, воно її створює. Продукти зношування плівки утримуються в зазорі електричними силами. Плівка під час тертя утворюється з одного з матеріалів, що беруть участь у терті (бронзи, латуні), або іншого мідного сплаву, або з мастильного матеріалу, що містить порошки пластичних металів, їх солі, комплексні сполуки металів, металорганічні сполуки.

У разі деформування сервовитна плівка не руйнується. Вона приймає всі навантаження, покриваючи нерівності поверхонь сталевих деталей, які беруть участь у процесі тертя.

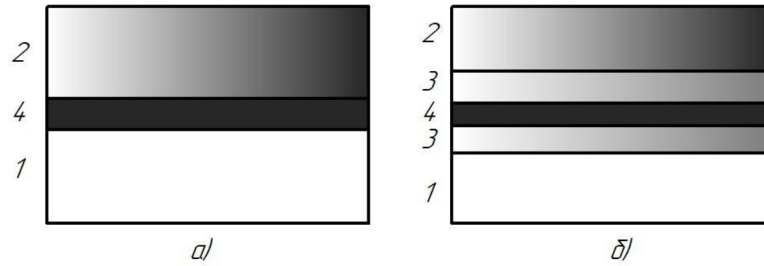


Рис. 7. Схеми контакту деталей у разі граничного тертя (а) та в разі вибіркового перенесення (б):  
1 – сталь; 2 – бронза; 3 – серфовитні плівки; 4 – плівки оливи

Структура плівки відрізняється від структури звичайної міді, вона квазірідка – має багато вакансій і мало дислокацій, утворюється в процесі тертя (у стиснених умовах).

Механізм формування серфовитної плівки найзручніше простежити з прикладу пари тертя бронза – сталь серед гліцерину. У період роботи пари відбувається розчинення поверхні тертя бронзи. Гліцерин діє як слабка кислота. Атоми легуючих елементів бронзи (олово, цинк, залізо, алюміній та ін.) йдуть у мастильний матеріал, унаслідок чого поверхня бронзи збагачується атомами міді (рис. 8). Після відходу атомів легуючих елементів з поверхні бронзи деформування її під час тертя викликає дифузійний потік нових атомів легуючих елементів до поверхні, що переходять у мастильний матеріал, і так далі.

Після того як мідна плівка покриє бронзову та сталеву поверхні, молекули гліцерину вже не можуть взаємодіяти з бронзою і «втягувати» атоми легуючих елементів, процес розчинення бронзи припиняється і настає режим вибіркового перенесення.

Як встановив С. Г. Красіков, процес утворення серфовитної плівки на сталевій поверхні відбувається дискретно. Частички міді з бронзової поверхні переносяться на вершини нерівностей залізної поверхні, тобто на ті ділянки сталі, які безпосередньо контактують із бронзою. Потім поступово відбувається «сповзання» міді, що накопичилися в западинах нерівностей.

Гліцерин під час тертя руйнує окисну плівку і на сталевій поверхні, як відновник, як і для міді, забезпечує високу міцність зчеплення мідної плівки зі сталеву поверхнею. Унаслідок цього остання покривається мідною плівкою, і пара тертя сталь – бронза стає парою мідь – мідь.

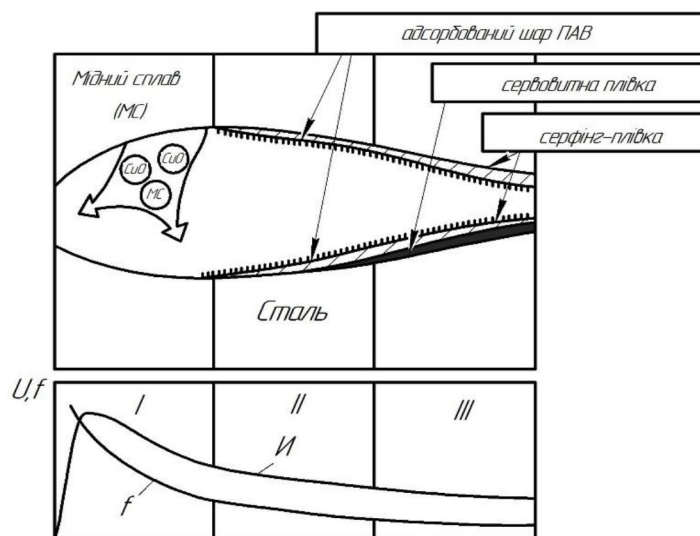


Рис. 8. Реалізація вибіркового перенесення в парі тертя «мідний сплав – сталь»:

I – вибіркоче розчинення мідного сплаву утворення оксидів і частинок переносу; II – відновлення оксидів та утворення серфовитної та серфінг-плівок; III – утворення адресованих шарів ПАВ



Утворення плівки міді на бронзовій поверхні відбувається внаслідок електрохімічного процесу – процесу розчинення металу. Внаслідок утворення сервовитної плівки між анодними й катодними ділянками поверхні бронзи процес розчинення може повністю припинитися, настане режим тертя. Якщо з будь-яких причин мідна плівка зруйнується, то знову відбудеться розчинення бронзи, і поверхня збагачуватиметься міддю, поки знову не настане пасивний стан.

Аналіз процесів, що відбуваються в сервовитній плівці, та із забезпеченням її деформації під час тертя беззношуваного мідного сплаву та сталі, показує, що інтенсивність зносу досягає  $10^{-11}$  та менше.

За певної насиченості сервовитної плівки дислокаціями, що утворюються під час тертя, відбувається кінетичний перехід від консервативного руху дислокацій до переповзання до поверхні, що забезпечується наявністю великої кількості вакансій, а також унаслідок малої товщини плівки – близькістю до поверхні тертя й осмотичним тиском. На поверхні міді, на майданчиках виходу дислокацій (місцях контакту), у цей час відбувається структурна реорганізація, «витягування» атомів міді під дією хімічно активних компонентів мастильного середовища – лігандів – у граничний шар, ослаблення зв'язків із найближчими атомами поверхні, що завершується переходом атомів, іонів міді у змащення у вигляді комплексних сполук (трибокоординація).

Координаційні сполуки (комплексні сполуки), що утворюються в мастильному матеріалі внаслідок розчинення мідного сплаву, не є міцними. За підвищення тиску або температури вони розпадаються на координуючий атом та ліганди. Ліганди залишаються в мастильному матеріалі, а координуючий атом з'єднується із сервовитною плівкою. Цьому допомагає явище електрофорезу, завдяки якому іони втягуються в зазор між деталями, що труться, а не губляться з мастилом. Виникає своєрідний іонний обмін, який зберігає матеріал плівки. Цикл утворення комплексного з'єднання та його розпаду повторюється. За нормальної роботи вузла тертя співвідношення між утворенням координаційних з'єднань та їх розпадом має бути близьким до одиниці.

Є можливість заздалегідь вводити в мастильний матеріал координаційні з'єднання металів (міді, олова), що підвищує надійність роботи з'єднання, які труться. На цій основі створюються металоплакуючі мастильні матеріали, що реалізують ефект беззносності.

Комплексне з'єднання отримує можливість рухатися поверхнею, з'єднуючись з іншими комплексами в острівці плівки.

Утворення таких острівців підтверджено рентгеноструктурним аналізом. Плівка подібною будови має низку особливостей, властивих лише за умов тертя в режимі ВП. Цю плівку називають серфінг-плівкою, вона є додатковим захистом поверхонь тертя від зношування.

Сервовитна плівка може утворюватися у вузлі тертя сталь – сталь під час роботи з металоплакувальними мастильними матеріалами, що містять дрібні частинки бронзи, міді, свинцю, срібла та ін. Такі плівки пластичних металів пористі та містять у порах мастильний матеріал. Коефіцієнт тертя знижується, а сталеві поверхні не зношуються. Під час тертя зсув поверхонь тертя відбувається всередині плівок, що утворюються.

*Висновок.* Таким чином, з ефектом беззносності утворюються нові структури, які екранують основні матеріали деталей, що труться. Ці структури мають особливі властивості: вони обмінюються із зовнішнім середовищем енергією і речовиною, деформуючись, не руйнуються, їх продукти зносу, якщо такі з якихось причин утворюються, не йдуть у мастильний матеріал, а втягуються в зазор електричними силами. Для збільшення строку служби елементів гідравлічних систем з 8000 до 9000 мотогодин потрібно вводити в біологічні оливи добавки: багатofункціональну типу МК «МКФ-18» у кількості 0,8...1,0 % для забезпечення металоплакувального ефекту й антифрикційну присадку типу SMT 2514 в кількості 6...8 % для покращення змащувальних властивостей в режимі граничного тертя.

*Список використаних джерел*

1. Журавель Д. П. Підвищення довговічності функціональних систем сільськогосподарської техніки при використанні біопаливно-мастильних матеріалів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія: техніка та енергетика АПК. Київ, 2018. Вип. 282. С. 279–292.
2. Журавель Д. П. Моделювання процесу зношування прецизійних пар паливних систем мобільної техніки при експлуатації на біодизелі. *Праці ТДАТУ*. Вип. 18, т. 2. Мелітополь, 2018. С. 105–118.
3. Журавель Д. П. Підвищення ефективності використання мобільної сільськогосподарської техніки шляхом забезпечення оптимального складу сумішевих біодизельних паливних. *Науковий вісник ТДАТУ*: Електронне наукове фахове видання. Вип. 8. Т. 2. Мелітополь : ТДАТУ, 2018. С. 91–107.
4. Журавель Д. П. Моделювання працездатності машино-тракторного агрегату при експлуатації на біодизелі. *Праці ТДАТУ*. Вип. 19. Т. 3. Мелітополь, 2019. С. 57–68.
5. Мілько Д. О. Методика складання раціону великої рогатої худоби на основі поживної цінності кормових компонентів. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ»*. Глеваха, 2019. Вип. 10 (109). С. 91–96.
6. Бондар А. М. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник / ННЦ «ІМЕСГ»*. Глеваха, 2019. Вип. 10 (109). С. 125–131.
7. Gritsaenko G., Gritsaenko I., Bondar A. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture. Modern Development Paths of Agricultural Production. *Springer Nature Switzerland AG*. 2019. P. 29–40.
8. Samoichuk K., Viunyk O., Milko D., Bondar A. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 142–148.
9. Milko D., Samoichuk K., Postol Y. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1/12 (103). P. 24–29.
10. Milko D., Sclyar O., Sclyar R., Pedchenko G. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH – Agricultural Engineering*. National Institute Of Research-Development For Machines And Installations Designed To Agriculture And Food Industry – INMA Bucharest, 2020. Vol. 60 (1). P. 269–274.
11. Samoichuk K., Palyanichka N., Oleksienko V., Petrychenko S. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 633–640.
12. Бондар А. М. Покращення та оцінка якісних показників відпрацьованих автотракторних олив для сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 15 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-6
13. Бондар А. М. Прогнозування ресурсу трибосистем при використанні сумішевих олив. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 1. 19 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-1-10
14. Бондар А. М., Дашивець Г. І., Паніна В. В. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. С. 85–97. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-16
15. Zhuravel D. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. 18 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-5
16. Kuznetsov M., Lysenko O., Chebanov A. (2021). Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6 (8 (114)). P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>
17. Бондар А. М., Дашивець Г. І., Паніна В. В. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев*. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 2. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-2

18. Samoichuk K., Petrychenko S., Bondar A., Hutsol T., Kubo' n, M., Niemiec M., Mykhailova L., Gródek-Szostak Z., Sorokin D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*. 2022. Vol. 15, 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>

19. Kaplan M., Klimek K., Maj G., Bondar A., Lemeshchenko-Lagoda V., Boltianskyi B., Boltianska L., Syrotyuk H., Syrotyuk S., et al. Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*. 2022. Vol. 15, 3416. <https://doi.org/10.3390/en15093416>

20. Журавель Д. П. Вплив технічного обслуговування і ремонту на надійність машин та обладнання при використанні біологічних рідин. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 9 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-3

21. Журавель Д. П. Рациональне використання біологічних олив для мобільних енергетичних засобів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. Вип. 10. Том 1. Мелітополь, 2020. 17 с. DOI: 10.31388 / 2220-8674-2020-1-9

22. Poliakov A., Volokh V., Andreev A. та ін. Identifying patterns in the structural-phase transformations when processing oxide doped waste with the use of carbon reducer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5 (12 (131)). P. 25–30.

23. Rebenko V., Lukianenko I., Volokh V., et al. Establishing patterns of structural-phase transformations when processing technogenic waste of high-speed steels by carbon thermal reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4 (12 (136)). P. 6–11.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



D. Zhuravel<sup>1</sup>, V. Didur<sup>2</sup>, M. Shevchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

<sup>2</sup> Uman National University

## JUSTIFICATION OF TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF BIOLOGICAL OILS FOR HYDROSYSTEMS OF AGRICULTURAL EQUIPMENT

### Summary

In the work, the substantiation of the tribotechnical properties of biological oils for hydraulic systems of agricultural machinery is carried out. It was established that when using biological lubricants, it is recommended to use metal-coating additives, which will allow to exclude the harmful effect of free fatty acids of oil on the metals of the coupling parts and to ensure normalized resources of nodes and aggregates of agricultural machinery. To increase the service life of hydraulic system elements from 8,000 to 9,000 motor hours, it is necessary to introduce additives into biological oils: metal-coating type ICF-18 in the amount of 0.8...1.0 % – to ensure the effect of selective transfer. by the transfer of copper atoms and ions into the lubricant in the form of complex compounds (type-coordination). Thus, due to the effect of insignificance, new structures are formed that exaggerate the original materials of the parts that are missing. These structures have special properties: they exchange energy and matter with the external environment, deforming, not being destroyed, their sleep products, if they are formed for some reason, do not go into the material material, but are drawn into the electrical insulation. The mechanism of the formation of the wrapped film is most convenient to observe from the example of the melting of bronze – steel in front of glycine. During the period of operation, the surface heat of the bronze is dissolved. Glycine acts as a weak acid. Atoms of alloying elements of bronze (tin, zinc, iron, aluminum, etc.) go into the paint material, as a result, the surface of bronze is enriched with copper atoms. When atoms of alloying elements leave the surface of bronze, its deformation causes a diffusion flow of new atoms of alloying elements to the surface, which pass into the matrix material, and so on.

**Keywords:** tribotechnical properties, hydraulic system, biological oils, agricultural machinery, wrapping film, selective metal transfer mechanism.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-7>

УДК 631.364:621.311.243

С. В. Коробка<sup>1</sup>, канд. техн. наукР. В. Скляр<sup>2</sup>, канд. техн. наукІ. Г. Стукалець<sup>1</sup>, канд. техн. наукР. Є. Кригуль<sup>1</sup>, канд. техн. наукІ. О. Дудко<sup>1</sup>

ORCID: 0000-0002-4717-509X

ORCID: 0000-0002-1547-5100

ORCID: 0000-0001-7107-4865

ORCID: 0000-0002-3061-9176

ORCID: 0009-0003-0389-9226

<sup>1</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: korobkasv@ukr.net

## ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕЛІОСУШАРКИ Й МЕТРОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

*Анотація.* У роботі представлено розроблення та обґрунтування методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів. Основна увага приділена визначенню впливу параметрів теплоносія, інтенсивності сонячного випромінювання та ефективності теплообміну на енергетичну продуктивність установки. Проведено аналіз точності вимірювань температури, вологості та швидкості повітря за допомогою термодатчиків, що дало змогу встановити їх метрологічні характеристики та оцінити похибки вимірювань у реальних умовах експлуатації. Запропонована методика дає змогу комплексно оцінювати енергоефективність процесу сушіння, оптимізувати режими роботи геліосушарки та підвищити достовірність експериментальних даних. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій сонячних сушильних установок і розроблення систем контролю теплотехнічних параметрів у відновлюваних енергетичних технологіях.

*Ключові слова:* сонячна енергія, геліосушарка, температурно-вологісні поля, тепломасоперенесення, інтенсифікація, конвективне сушіння.

*Постановка проблеми.* У сучасних умовах дедалі більшого дефіциту енергоресурсів і необхідності переходу до відновлюваних джерел енергії особливої актуальності набуває підвищення енергоефективності технологічних процесів сушіння сільськогосподарської продукції.

Геліосушарки, що використовують енергію сонячного випромінювання, є екологічно чистими та економічно вигідними установками, однак їх ефективність значно залежить від коректності вимірювання теплотехнічних параметрів і стабільності роботи вимірювальних засобів. Недостатня точність терморезисторів, похибки вимірювання температури та вологості, а також відсутність єдиної методики визначення енергетичних характеристик геліосушарок ускладнюють проведення достовірних експериментальних досліджень й оптимізацію режимів сушіння.

Тому виникає потреба в розробленні науково обґрунтованої методики дослідження енергетичних параметрів геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання, що забезпечить підвищення точності оцінювання ефективності її роботи та вдосконалення конструкцій сонячних сушильних систем [1–3].

*Аналіз останніх досліджень.* Проблема ефективного використання відновлюваних джерел енергії для технологічних процесів сільськогосподарського виробництва, зокрема сушіння



фруктів, овочів і зерна, є одним із ключових напрямів сучасної енергетичної науки. За даними досліджень [1–3], частка енергії, що витрачається на процеси сушіння, може становити до 25–30 % від загального енергоспоживання переробних підприємств агропромислового комплексу. З огляду на це, геліосушильні установки розглядаються як ефективна альтернатива традиційним системам, що працюють на викопному паливі, адже вони дають змогу зменшити споживання електроенергії та викиди CO<sub>2</sub> у довкілля.

Дослідження останніх років свідчать, що геліосушарки забезпечують високу якість висушеної продукції завдяки рівномірному розподілу теплового потоку та м'яким температурним режимам [4]. У роботах вітчизняних і зарубіжних авторів описано різні конструктивні рішення таких систем – від пасивних сушарок із природною циркуляцією повітря до активних установок з автоматичним керуванням температурою і вологістю [5; 6]. Проте ефективність їх роботи значно залежить від точності визначення енергетичних параметрів: температури теплоносія, швидкості повітря, щільності сонячного потоку, а також від надійності вимірювальних приладів.

У багатьох наукових роботах [7–21] відзначається, що похибки вимірювання температури в повітряних колекторах та камерах сушіння можуть досягати 5–10 %, що призводить до спотворення результатів розрахунків енергетичного балансу. Основним елементом систем контролю є терморезистори, метрологічні характеристики яких (чутливість, стабільність, інерційність) суттєво впливають на точність оцінки теплотехнічних параметрів. Недостатньо досліджені питання калібрування таких сенсорів у змінних умовах роботи геліосушарки – при коливаннях температури, вологості та швидкості потоку повітря.

Водночас енергетична ефективність геліосушарок визначається не лише конструкцією повітряного колектора чи якістю теплоізоляції, а й точністю методики експериментального визначення параметрів процесу. У наукових публікаціях [9; 10] подано різні підходи до оцінювання коефіцієнта корисної дії (далі – ККД) геліосушарок: за питомими енерговитратами, за відношенням теплоти випаровування вологи до енергії сонячного випромінювання або за енергетичним балансом між колектором, продуктом і теплоносієм. Проте відсутність уніфікованої методики призводить до труднощів у порівнянні результатів різних експериментів й унеможливає формування узагальнених критеріїв ефективності.

Окремі автори [11–21] наголошують на необхідності врахування динаміки зміни теплового потоку протягом дня, що потребує безперервного вимірювання параметрів із високою точністю. У цьому контексті особливого значення набуває дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання теплотехнічних параметрів, зокрема терморезисторів, термопар і психрометрів. Невизначеність результатів вимірювань безпосередньо впливає на достовірність визначення енергетичних характеристик установки – коефіцієнта тепловіддачі, енерговитрат, ефективності колектора та загального ККД системи.

Незважаючи на наявність значної кількості робіт, що присвячені моделюванню теплових процесів у геліосушарках, питання комплексного підходу до експериментального дослідження їх енергетичних характеристик разом з оцінкою метрологічних властивостей вимірювальних засобів залишаються недостатньо розробленими. Більшість досліджень зосереджується на оптимізації режимів сушіння чи вдосконаленні конструкції колекторів, тоді як забезпечення точності вимірювань та оцінка похибок у реальних умовах експлуатації залишаються поза увагою.

Так, виникає науково-практична проблема, що полягає у відсутності системного підходу до визначення енергетичних параметрів геліосушарки з урахуванням метрологічної оцінки точності вимірювань теплотехнічних величин. Необхідно розробити методику, яка дасть змогу комплексно аналізувати процес сушіння, забезпечуючи достовірність отриманих даних і можливість порівняння результатів для різних типів геліосушарок.



*Формулювання мети статті.* Метою дослідження є розроблення та обґрунтування методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки з урахуванням метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів. Реалізація цієї мети дасть змогу підвищити точність оцінювання ефективності сушильних установок, оптимізувати їх роботу та сприятиме розвитку технологій енергозбереження в сільськогосподарському виробництві.

Відповідно до поставленої мети необхідно було виконати такі завдання:

1. Дослідити метрологічні характеристики засобів вимірювання теплотехнічних параметрів (термопар, анемометрів, психрометрів), оцінити їх похибки та стабільність у змінних умовах роботи геліосушарки.

2. Розробити експериментальну установку та методику проведення вимірювань, яка забезпечує високу точність визначення температури, вологості, швидкості повітряного потоку та інтенсивності сонячного випромінювання.

3. Оцінити вплив похибок вимірювальних приладів на результати визначення енергетичних характеристик і розробити рекомендації щодо підвищення точності вимірювань.

4. Запропонувати шляхи вдосконалення конструкції та режимів роботи геліосушарки, спрямовані на підвищення її енергоефективності та зменшення енергетичних втрат.

*Основна частина.* Розроблення методики дослідження енергетичних характеристик геліосушарки передбачає комплексне визначення параметрів сушильного процесу та метрологічну оцінку засобів вимірювання теплотехнічних величин. У геліосушарках стандартні режими сушіння фруктів регламентуються параметрами сушильного агента – температурою, відносною вологістю та психрометричною різницею, які змінюються залежно від вологості сировини. Для збереження фізико-хімічних властивостей фруктів переважно застосовують низькотемпературні режими, тоді як м'які, нормальні, форсовані та високотемпературні режими впливають на тривалість сушіння та збереження вітамінів. Відносна вологість повітря визначається як відношення парціального тиску водяної пари до тиску насичення при даній температурі, а психрометрична різниця – як різниця між температурою сушильного агента та температурою змоченого термометра.

У межах методики дослідження параметри сушильного агента контролюються за допомогою сенсорів і термопар із багатоканальними регуляторами, що дає змогу оцінити теплові характеристики, ефективність теплоаккумуляції та вплив на фізико-хімічні властивості сировини. Низькотемпературні режими сушіння, наведені в табл. 1, із 44 варіантами за температурою та відносною вологістю використовують як базові для експериментальної перевірки розробленої методики, що забезпечує точне визначення енергетичних та теплотехнічних показників геліосушарки.

Розроблено конструкцію мінігеліосушарки з тепловим акумулятором і плоским дзеркальним концентратором, призначену для сушіння фруктів, яка показана на рис. 1, 2.

Конструкція установки складається з корпусу геліосушарки (1, 2) – основна конструктивна частина, що забезпечує підтримку всіх компонентів та формування сушильної камери. Виконується з теплоізоляційного матеріалу на основі деревини з метою мінімізації теплових втрат. Прозоре покриття (3) – скляна панель, яка пропускає сонячне випромінювання до абсорбера й водночас мінімізує теплові втрати з камери. Абсорбер (4) – сонячний колектор, що поглинає сонячне випромінювання та передає тепло повітрю, яке рухається всередині камери.

Його конструкція дає змогу ефективно нагрівати теплоносій, що виконаний з листової міді товщиною 1 мм. Робоча поверхня горизонтальна й похила поверхня всередині сушильної камери, на якій розташовується продукт для сушіння. Часто має покриття, що забезпечує рівномірний розподіл тепла. Сушильна камера, всередині якої циркулює гаряче повітря і відбувається видалення вологи з продукту. Забезпечує рівномірне сушіння та контроль температурного режиму. Має вхідні отвори (5), призначені для подання атмосферного повітря в сушильну камеру, що забезпечує ефективну вентиляцію і підтримання потоку теплоносія, та

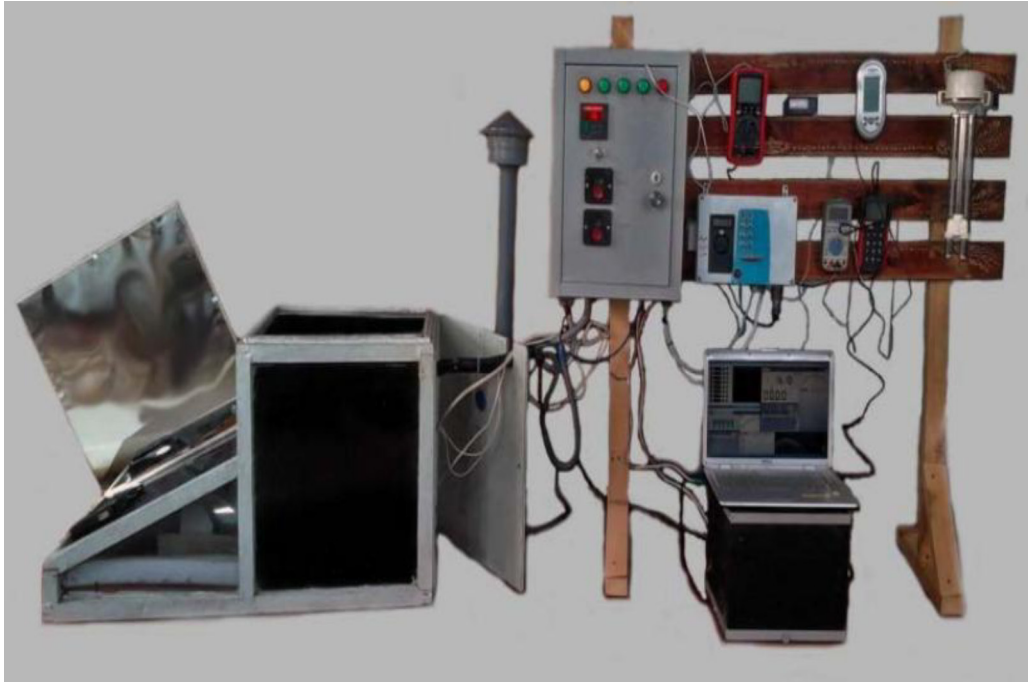


Рис. 1. Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження параметрів геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором

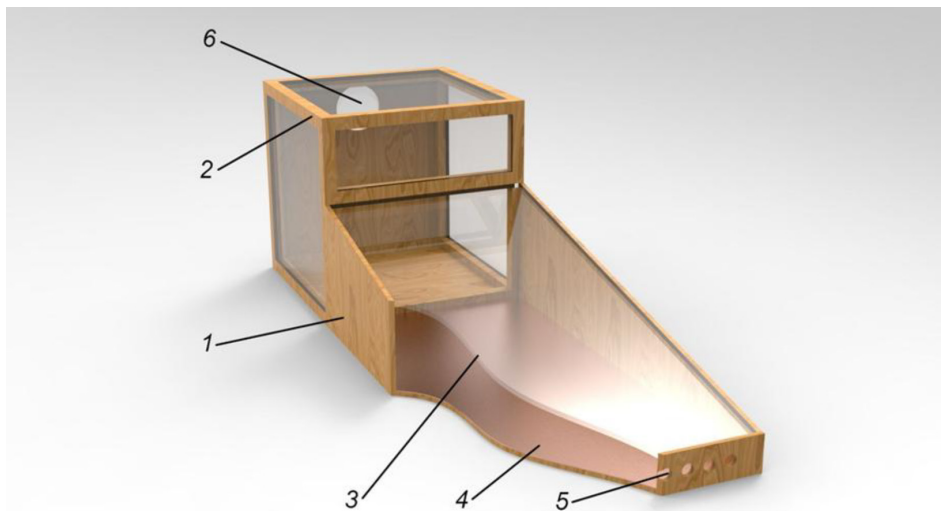


Рис. 2. Тривимірна геометрична розрахункова модель мінігеліосушарки

вихідні отвори (6) – отвори для виведення вологого повітря з камери. Ця конструкція дає змогу ефективно перетворювати сонячну енергію на тепло для сушіння продуктів, забезпечуючи контроль температури та вологості в камері.

Для вимірювання сонячної освітленості застосовувався піранометр ПЕЛЕНГ СФ-06, розташований підрегульованим кутом до горизонту. Рух теплоносія забезпечується вентилятором, а надлишкове тепло накопичується в тепловому акумуляторі, заповненому гравієм, який водночас є елементом стабілізації температурного режиму. Контроль температури, вологості та швидкості потоку здійснювали за допомогою термопар, анемометрів та термогігрометрів, під'єднаних до системи комп'ютерної реєстрації даних. Геліосушарка працює за принципом конвективного нагрівання повітря, яке, проходячи через теплоаккумулявальний шар, надходить у сушильну камеру й забезпечує рівномірне висушування фруктів. У похмурі періоди установка



Таблиця 1

Режими низькотемпературного процесу сушіння фруктів у геліосушарці

Індекс режиму	Волога, %	Номер режиму і параметри (t, E, φ) сушильного агента																																				
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10																		
		t	φ	t	E	t	φ	t	E	t	φ	t	E	t	φ	t	E	t	φ	t	E	φ																
	>80	90	4	0,85	82	3	0,88	75	3	0,87	69	3	0,87	63	2	0,91	57	2	0,90	52	2	0,90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	80-60	95	7	0,76	87	6	0,78	80	6	0,77	73	6	0,76	67	5	0,78	61	5	0,78	55	4	0,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
А	60-20	120	32	0,32	108	27	0,35	100	26	0,35	91	24	0,36	83	22	0,36	77	21	0,36	70	20	0,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	20-3	90	5	0,81	82	4	0,84	75	4	0,84	69	4	0,83	63	3	0,86	57	3	0,85	52	3	0,84	47	2	0,90	42	2	0,89	38	2	0,88	—	—	—	—	—	—	
Б	>80	95	9	0,70	87	8	0,72	80	8	0,70	73	7	0,72	67	6	0,75	60	6	0,74	55	5	0,76	50	5	0,75	45	4	0,79	41	4	0,77	—	—	—	—	—	—	
	80-30	120	34	0,29	108	29	0,32	100	29	0,32	91	25	0,34	83	23	0,34	77	22	0,34	70	21	0,35	62	18	0,36	57	17	0,36	52	16	0,36	—	—	—	—	—	—	
	30-3	90	7	0,75	82	6	0,77	75	5	0,80	69	5	0,79	63	4	0,82	57	4	0,81	52	4	0,80	47	3	0,84	42	3	0,83	38	3	0,82	—	—	—	—	—	—	
	>80	95	11	0,65	87	10	0,66	80	9	0,66	73	8	0,69	67	7	0,71	60	7	0,70	55	7	0,68	50	6	0,70	45	5	0,74	41	5	0,77	—	—	—	—	—	—	—
В	80-30	120	36	0,26	108	31	0,30	100	29	0,30	91	26	0,33	83	24	0,32	77	23	0,32	70	22	0,31	62	19	0,33	57	18	0,34	52	17	0,30	—	—	—	—	—	—	—
	30-3	90	9	0,69	82	8	0,71	75	7	0,73	69	6	0,76	63	5	0,78	57	5	0,76	52	5	0,75	47	4	0,79	42	4	0,77	38	4	0,76	—	—	—	—	—	—	—
Г	>80	95	13	0,60	87	12	0,60	80	11	0,61	73	10	0,63	67	9	0,64	60	9	0,62	55	8	0,64	50	7	0,66	45	6	0,69	41	6	0,67	—	—	—	—	—	—	—
	80-50	120	37	0,25	108	33	0,27	100	31	0,27	91	28	0,30	83	25	0,30	77	25	0,29	70	23	0,29	62	20	0,31	57	19	0,31	52	18	0,30	—	—	—	—	—	—	—
Д	30-3	90	1.1	0,63	82	10	0,65	75	9	0,66	69	8	0,68	63	7	0,70	57	6	0,72	52	6	0,71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	>80	95	15	0,54	87	14	0,55	80	13	0,55	73	12	0,56	67	11	0,58	60	10	0,59	55	9	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80-5	120	38	0,24	108	35	0,24	100	33	0,25	91	30	0,26	83	27	0,28	77	26	0,27	70	24	0,27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

функціонує завдяки теплу, накопиченому в акумуляторі, що дає змогу підтримувати процес сушіння. Для підсилення потоку сонячної енергії використовується плоский дзеркальний концентратор, який сприяє підвищенню енергоефективності геліосушарки.

Сучасні технологічні процеси сушіння потребують постійного моніторингу численних змінних параметрів для ефективного керування якістю кінцевого продукту. Для цього застосовують датчі (сенсори), що перетворюють фізичні сигнали в електричні, передаючи їх на вимірювальні перетворювачі для подальшої обробки та відображення. Найпоширенішими засобами контролю є термопари, які входять до складу регуляторів температури, що забезпечують індикацію, запис і передавання даних на комп'ютер. Одним із таких пристроїв є багатоканальний регулятор-вимірювач РТ-0102, який працює з термопарами типу хромель-алюмель і здійснює вимірювання, сигналізацію та регулювання температури на восьми незалежних каналах. Структурна схема РТ-0102 представлена на рис. 3, а загальний вигляд і монтажні параметри – на рис. 4.

*Налагодження приладу для вимірювань.* Вимірювання приладом РТ-0102 проводиться за такої послідовності:

1. З'єднати складові частини вимірювальної установки: регулятор-вимірювач РТ-0102, комутаційний блок з комутаційним шлейфом, термопари, кабель з інтерфейсом RS232, перехідник USB для комутації з ПК.

2. Приєднати вісім термопар до контрольованих точок: 1 – всередині геліосушарки для вимірювання температури теплоносія; 2 – на поверхні внутрішнього прозорого огорожувального елемента геліосушарки; 3 – на поверхні прозорого огорожувального елемента геліосушарки; 4 – під поверхнею решіт з її внутрішньої сторони; 5 – під поверхнею стіни з її зовнішньої сторони

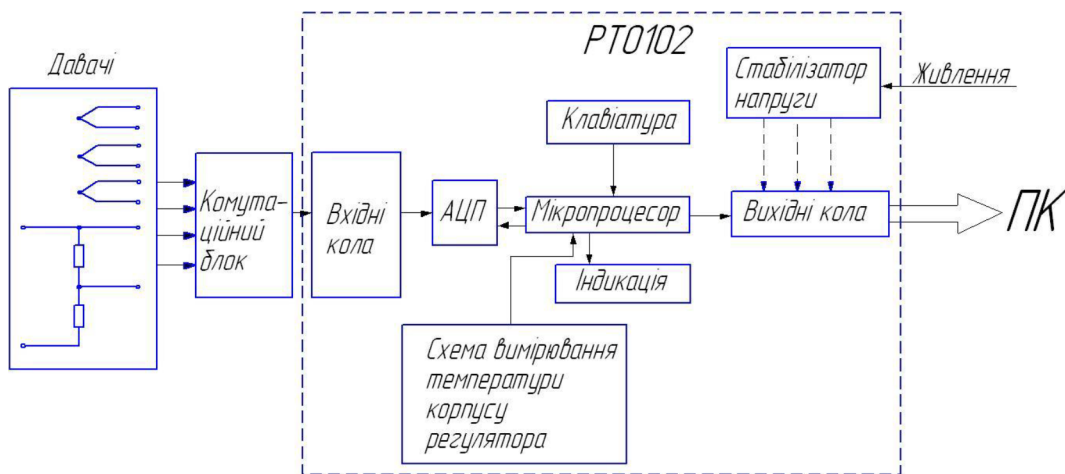


Рис. 3. Структурна схема вимірювача РТ-0102

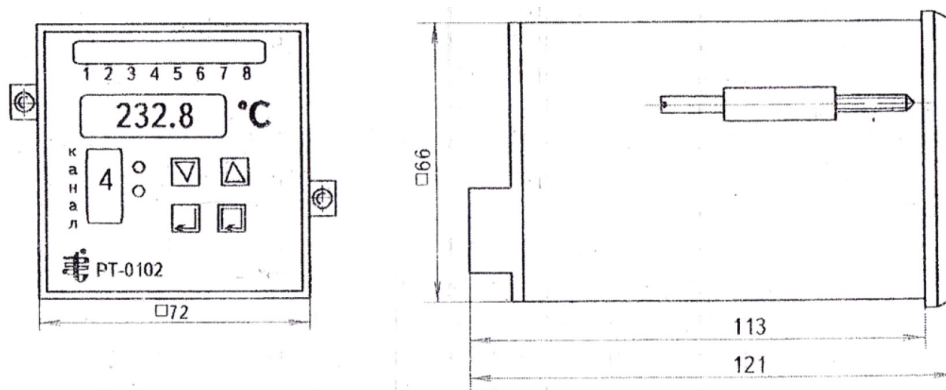


Рис. 4. Передня панель та монтажні параметри РТ-0102

та 6, 7, 8 – надворі на довільній віддалі від огорожувального елемента геліосушарки для вимірювання зовнішньої температури. Для забезпечення гальванічної розв'язки вимірювальних кіл термопар їх гарячі спаї ізолюють тонким непровідним матеріалом без термоізоляційних властивостей. В іншому разі можливі взаємні зміщення потенціалів термопар і спотворення показів приладу.

3. Увімкнути живлення приладу РТ-0102 в автономному режимі й переконатися в активації всіх вимірювальних каналів. За відсутності вхідного сигналу на активованому каналі його показ приймає значення поблизу установочної межі (уставки). Надалі відбувається почергове опитування увімкнених вимірювальних каналів з індикацією результатів на панелі приладу та побудовою графічних залежностей у робочому вікні монітора в режимі реального часу (рис. 5, 6).



Рис. 5. Робоче вікно програми TRaга8

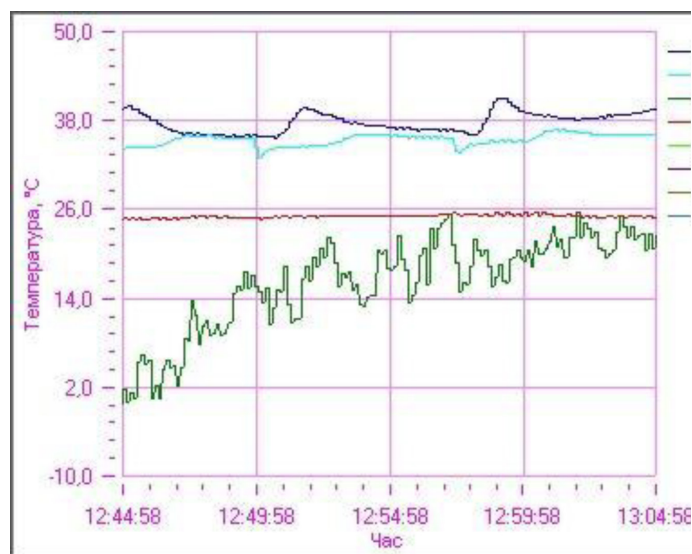


Рис. 6. Інверсне зображення графічного матеріалу



#### 4. Визначення метрологічних характеристик термоприладу РТ-0102.

4.1. Розмістіть ртутний еталонний термометр з ціною поділки  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  поруч із робочим спаєм термопари № 1 й увімкніть прилад в автономному режимі (без підключення до ПК). Після прогрівання приладу зафіксуйте покази всіх шести вимірювальних каналів, повторивши вимірювання п'ять разів для кожного каналу.

4.2. Розрахувати варіацію показів  $|t_{\max} - t_{\min}|$  у кожному вимірювальному каналі та середнє значення температури  $\bar{t}$ .

4.3. Розрахувати абсолютну похибку вимірювання першого каналу через різницю між  $\bar{t}_1$  і показом зразкового ртутного термометра  $t$ :

$$\Delta t = \bar{t}_1 - t.$$

4.4. Вимкніть живлення приладу, підключіть його вихід до входу ПК та знову увімкніть живлення.

4.5. Повторіть вимірювання та розрахунки відповідно до п.п. 4.1–4.3, порівняйте результати обох серій і поясніть причини можливих розходжень.

4.6. Заземліть корпус ПК, повторіть вимірювання та розрахунки й порівняйте результати з попередніми серіями, визначивши вплив заземлення на точність.

4.7. Активуйте програму TRaga8 для отримання графічного запису температури у восьми точках, тимчасово від'єднайте заземлювальний провід і спостерігайте зміну графіка, після чого збережіть часову залежність у зручному редакторі.

5. Дослідіть метрологічні характеристики засобів вимірювання теплотехнічних параметрів термоелектричні матеріали й термопари.

5.1. Дія термоелектричного перетворювача, що складається з двох різнорідних металевих провідників, полягає у виникненні термоелектрорушійної сили на вільних кінцях, якщо зварені протилежні кінці перебувають за іншої температури. З'єднані зварюванням кінці термопари називаються робочим (або гарячим) спаєм, який поміщається в середовище з вимірюваною температурою  $t$ , а вільні кінці термопари (холодні) перебувають за постійної, фіксованої температури  $t_0$ .

Експериментальна залежність термо-е.р.с.  $E$  від температури гарячого спаю  $t$  за постійної температури вільних кінців  $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  називається стандартною градуювальною характеристикою термопари. Розрізняють термопари з благородних і неблагородних металів. Найпоширеніші види промислових термопар, їх маркування та службові характеристики наведені в табл. 2, а їх порівняльні характеристики – на рис. 7.

Середнє значення термо-е.р.с. у діапазоні різниці температур  $\Delta t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  називається чутливістю термопар. Її також наведено в останньому стовпчику таблиці. Платинородій-платинові термопари (далі – ТПП) характеризуються доброю відтворюваністю та стабільністю градуювальної характеристики, мають широкий діапазон вимірювань і стійкі в агресивних середовищах. Їх недоліком є мала чутливість, висока вартість матеріалів та їх крихкість за наявності відновлювального газу – водню.

Вольфрам-ренієві термопари (далі – ТВР) використовують для вимірювання високих температур. Їх недоліком є нестійкість вольфраму до окислення на повітрі при підвищених температурах. Тому ці термопари потребують додаткового захисту.

Найдоступнішими є хромель-алюмелеві (ХА) та хромель-копелеві (ХК) термопари. Перші мають практично лінійні градуювальні характеристики, а другі невелику кривизну, що описується квадратичною залежністю. Крім того, ХА термопари чутливі до механічних деформацій, тому потребують періодичного градуювання.

Термопари типу (далі – ТПР) допускають значне коливання температури холодних кінців і не потребують її стабілізації. Тому їх використовують як термочутливі елементи автоматичних регуляторів температури промислових нагрівальних печей.

Таблиця 2

Технічні характеристики термопар

Назва термопари	Тип	Позначення градуувальної характеристики	Діапазон вимірювання при тривалому застосуванні	Допустима гранична т-ра при нетривалому застосуванні	Середня термо-е.р.с., мВ
Платинородій-платинова (90 % Pt і 10 % Rh)	ТПП	ПП-1	0...1300	1600	1,04
Платинородій-платинородієвий (30 і 6 % Rh)	ТПР	ПР-30/6	300...1600	1800	0,90
Вольфраморенієва (5 і 20 % Re)	ТВР	ВР-5/20	300...1800	2700	
Хромель-алюмелевий	ТХА	ХА	-200...1000	1300	4,03
Хромель-копелевий	ТХК	ХК	-200...600	800	8,03
Залізо-константан	ТЖК	ЖК	-40...750	800	

Платинородій: 90 % Pt, 10 % Rh;  
 Хромель: 90 % Ni, 10 % Cr, немагнітний сплав;  
 Алюмель: 95 % Ni, 5 % Al(Si, Mn, Ni), притягується магнітом  
 Копель: 56 % Cu, 44 % Ni;  
 Константан: 60 % Cu, 40 % Ni

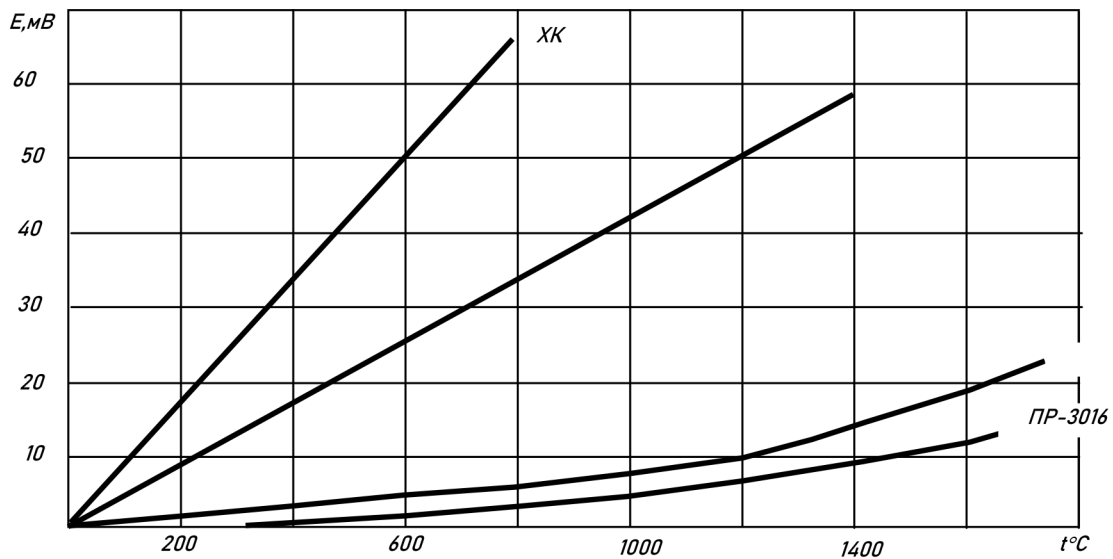


Рис. 7. Температурні залежності електрорушійної сили найбільш поширених термопар

Робочі термопари загального призначення конструктивно виконують з двох ізольованих дротинок. Їх довжина вибирається такою, щоб виключити нагрівання вільних кінців від тіл з підвищеною температурою. Для захисту від дії агресивних середовищ їх додатково поміщають у трубки з кислотостійкої нержавіючої сталі, а виводи герметизують.

Важливою метрологічною характеристикою є теплова інерційність термопари. Інерційність або показник теплової інерції оцінюється часом охолодження термопари, попередньо нагрітої до температури  $T_0$ , у середовищі з постійною температурою  $T_c$ .

Оскільки процес охолодження описується рівняннями:

$$T - T_c = (T_0 - T_c)e^{-Ct}, \tag{1}$$

то за показник інерційності зручно вибрати час  $\tau_0$ , протягом якого різниця  $T - T_c$  зменшиться до значення  $1/e = 1/2,718 = 0,37$  початкової. Умови охолодження в цьому рівнянні чисельно характеризуються сталою  $C$  у показнику експоненти

$$C = \frac{kF}{cm}, \text{ c}^{-1} \quad (2)$$

де  $m$  – маса,  $c$  – ефективна питома теплоємність конструкції,  $F$  – площа контакту теплообміну захисного корпусу термопар;  $k$  – коефіцієнт теплопередачі від корпусу до середовища.

За лінійної залежності термо-е.р.с. від температури різницю температур у рівнянні (1) можна замінити різницею показів цифрового вольтметра. Інерційність термопарі необхідно враховувати при керуванні технологічними процесами за сигналами термопарі як у ручному, так і в автоматичному режимах.

5.2. Градування термопар. Стандартні градувальні характеристики, наведені в довідниковій літературі [11], відповідають регламентованим умовам випробування, зокрема рівномірної температури в об'ємі робочої камери, надійного контакту з робочим середовищем, нульової температури холодних кінців тощо. На практиці цих вимог дотриматися не завжди можливо, тому робочі термодавачі градуються відповідно до конкретних умов експлуатації.

Робочу термопару найпростіше градувати методом звірки з показами зразкової термопарі. Для забезпечення однакових температурних умов обидва термодавачі розміщують посередині довгої трубчастой печі з рівномірним температурним полем в ділянці знаходження гарячих спаїв. Майже однакові теплові умови можна створити при зануренні обох термопар у гарячу рідину, наприклад дистильовану воду або трансформаторне масло. Для звірки за високих температур використовують металеві або сольові розплави. Тоді необхідно додатково ізолювати термочутливі матеріали від можливої взаємодії з рідиною.

Метрологічне градування зразкових термопар виконується за допомогою робочих тіл з відомою температурою фазового переходу – точкою плавлення або кипіння. Такими найчастіше вибирають чисті метали або неорганічні сполуки. Точка кипіння води залежить від атмосферного тиску, тому її використовують лише для відносно грубих оцінок. Еталонна температура фазового переходу, за якою градуються е.р.с. термопарі, у метрології називається реперною точкою.

Градування точкових безкорпусних термопар з лінійною градувальною характеристикою (рис. 7) виконується за двома реперними точками, близькими до меж робочого температурного діапазону. Нагрівання здійснюється повільно, щоб запобігти високому градієнту температури в точці вимірювання. Момент плавлення, кипіння чи іншого фазового переходу фіксується візуально, або за температурною залежністю вимірного сигналу. До закінчення фазового переходу температура залишається сталою.

Не рекомендується градувати термопарі за температурами кристалізації: у чистих матеріалах внаслідок явища переохолодження температура кристалізації, як правило, нижча за температуру плавлення.

У разі лінійної температурної залежності сигналу термопарі, проміжні значення між реперними точками встановлюються лінійним інтерполюванням, найчастіше графічним. У температурному інтервалі 0–300 оС допускаються відхилення від стандартних значень е.р.с.: ПП – 0,01 мВ; ХА – 0,16 мВ і ХК – 0,20 мВ. Відповідні температурні відхилення визначаються зі стандартних градувальних таблиць.

Обов'язковою вимогою процедури градування є стабілізація температури холодних кінців термопарі. Усі стандартні градувальні таблиці складені для температури холодних кінців при 0 оС, яку можна забезпечити зануренням у ванну з талим льодом, що доволі незручно. Зручніше стабілізувати їх температуру на рівні вище кімнатної, як це робиться в автоматичних реєструвальних приладах чи терморегуляторах. Відповідна різниця вноситься як постійна поправка в кожен результат вимірювання.

У випадках, коли контрольована термопарою температура може відхилитися більше за варіацію кімнатної, градування виконується за кімнатної температури холодних кінців. Для



робочого інтервалу 100–300 оС, наприклад, реперними точками зручно обрати температури плавлення індію ( $T_{пл} = 156,4$  °С) та олова ( $T_{пл} = 232$  °С).

Для захисту матеріалу електродів від контакту з розплавленим металом гарячий спай поміщають у тонку кварцову трубку, що безпосередньо занурена у метал. Метал міститься на дні кварцової пробірки, поміщеної в лабораторну піч типу СУОЛ, заживленої від автотрансформатора. ЕРС термопари реєструється термопарним потенціометром ПП-63 цифровим вольтметром або мультиметром.

Термопари, які містяться в масивному корпусі, у виробничих умовах зручніше градувати методом порівняння зі зразковими, попередньо проградуєваними за реперними точками. Для цього обидві термопари занурюють у посудину з водою чи іншою рідиною і одночасно вимірюють їх електрорушійні сили. Різницю  $\Delta E$  використовують як поправку до показів масивної термопари.

Проведено експериментальні дослідження роботи мінігеліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором, під час яких визначали енергетичні та теплотехнічні параметри сушильного агента та оцінювали точність вимірювань за допомогою багатоканального регулятора-вимірювача РТ-0102, термопар, анемометрів та термогігрометрів.

1. Температурні характеристики сушильного агента: установлено, що температура повітря при вході в сушильну камеру коливалася від 45 до 85 °С у низькотемпературних режимах, що відповідає м'яким та нормальним режимам сушіння. Під час використання форсованих режимів температура досягала 95 °С, а високотемпературних режимів – понад 100 °С на останніх стадіях процесу. Температура теплоаккумулятивного шару гравію коливалася від 40 до 80 °С, забезпечуючи стабілізацію теплового потоку під час змін інтенсивності сонячного випромінювання.

2. Вологість та психрометрична різниця: відносна вологість повітря в сушильній камері змінювалася від 25 % до 65 %, а психрометрична різниця  $E$  становила 5–20 °С залежно від режиму та інтенсивності циркуляції повітря. Ці параметри відповідали рекомендаціям для низькотемпературного сушіння фруктів, забезпечуючи збереження їхніх фізико-хімічних властивостей.

3. Інтенсивність руху повітряного потоку: швидкість теплоносія в повітропроводі становила 1–2,17 м/с. Вимірювання з термоанемометра УТ362 показали стабільність потоку та забезпечили рівномірний розподіл тепла по всій сушильній камері.

4. Енергетичні показники геліосушарки: за один цикл сушіння з використанням колектора площею 1,5 м<sup>2</sup> було поглинуто 1984,9 кДж теплової енергії, з яких 836,3 кДж витрачено на нагрівання продукту, 756,7 кДж – на випаровування вологи та 356,9 кДж акумульовано у гравії. Коефіцієнт корисної дії геліосушарки коливався від 23 % до 60 % залежно від інтенсивності сонячного випромінювання.

5. Порівняння вимірювань та метрологічна оцінка: порівняння результатів автономних вимірювань та вимірювань при підключенні до ПК показало відхилення не більш ніж  $\pm 0,3$  °С для термопар і  $\pm 0,5$  % для відносної вологості, що підтверджує стабільність та точність вимірювальної системи. Випробування з відключеним заземленням показали невеликі коливання показів, які усувалися після підключення заземлення, підтверджуючи важливість метрологічних умов експерименту.

6. Візуалізація температурних режимів: за допомогою програми TPaга8 отримано графічні залежності температури у восьми точках сушильної камери. Графіки (див. рис. 7, 8, 9) демонструють рівномірний прогрів фруктів та вплив роботи теплового акумулятора на стабілізацію температурного поля.

Отримані результати підтверджують ефективність застосованої конструкції геліосушарки та розробленої методики експериментальних вимірювань для визначення енергетичних і теплотехнічних параметрів сушильного процесу (див. рис. 7, 8, 9).

Таблиця 3

Температура сушильного агента та теплоакумулювального шару залежно від режиму

Режим сушіння	Температура повітря на вході, °С	Температура гравію, °С	Примітка
М'який (М)	45–55	40–50	Збереження вітамінів
Нормальний (Н)	55–70	50–65	Мінімальна зміна кольору
Форсований (Ф)	70–95	65–80	Часткова втрата вітамінів
Високотемп. (В)	100–105	80–85	Висока швидкість сушіння

Таблиця 4

Вологість та психрометрична різниця при різних режимах

Режим	Відносна вологість, %	Психрометрична різниця Е, °С
М'який	60–65	5–8
Нормальний	50–60	8–12
Форсований	35–50	12–18
Високотемпературний	25–35	15–20

Таблиця 5

Енергетичні показники геліосушарки

Параметр	Значення, кДж
Поглинена теплова енергія	1984,9
Витрачено на нагрів продукту	836,3
Витрачено на випаровування вологи	756,7
Акумульовано в гравії	356,9
ККД, %	23–60

Таблиця 6

Метрологічна оцінка вимірювань

Канал термопари	Відхилення автономних вимірювань, °С	Відхилення при підключенні до ПК, °С
1	±0,2	±0,3
2	±0,2	±0,3
3	±0,3	±0,3
4	±0,2	±0,3
5	±0,3	±0,3
6	±0,2	±0,3

Графік (рис. 7) демонструє зміну температури у восьми контрольних точках сушильної камери протягом часу роботи установки. Зі спостережень видно, що температура в різних точках камери незначно відрізняється, що свідчить про певну нерівномірність розподілу тепла. Максимальні значення температури досягаються ближче до центральної зони камери, тоді як біля стінок та входу температура трохи нижча. Така інформація дає змогу оцінити ефективність теплообміну та рівномірність сушіння продукту.

На рис. 8 наведено зміну відносної вологості повітря в камері та психрометричної різниці протягом технологічного процесу. Вологість зменшується із часом роботи, що свідчить про поступове видалення вологи з продукту.

Психрометрична різниця демонструє динаміку тепло- та вологообміну у камері, даючи змогу визначити інтенсивність сушіння й ефективність геліосушарки.

Графік відображає розподіл енергії в геліосушарці на рис. 9, включно з енергією, що надходить від сонячного випромінювання, енергією, витраченою на нагрівання повітря та продукту, і енергією втрат. Аналіз показує, що значна частина енергії використовується ефективно для

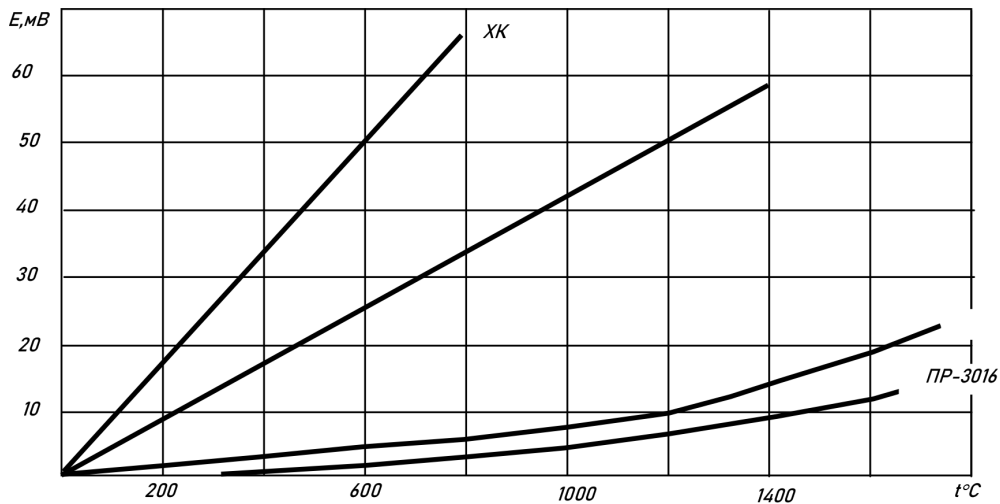


Рис. 7. Температурні залежності у восьми точках сушильної камери

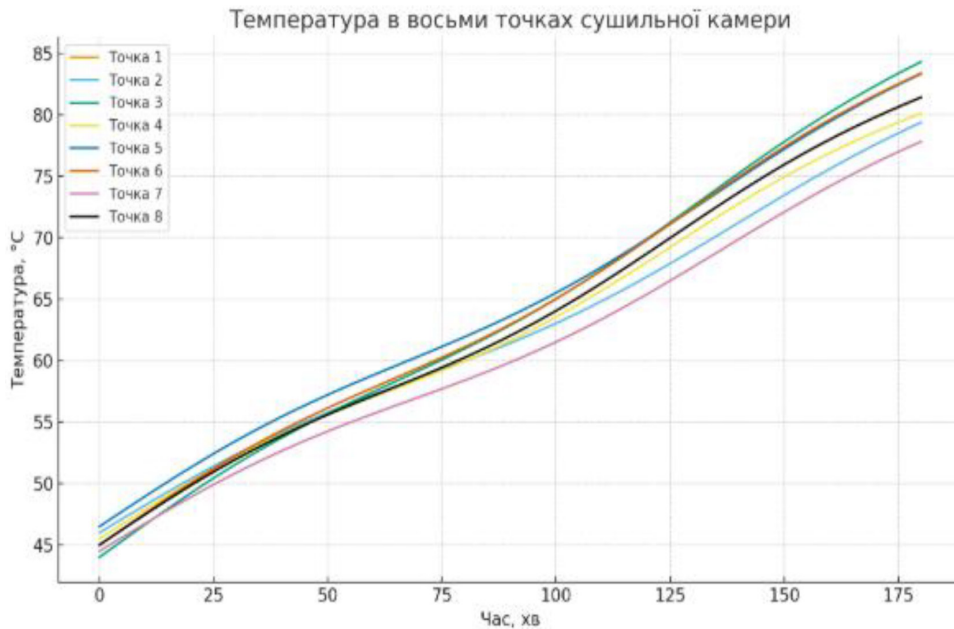


Рис. 8. Вологість та психрометрична різниця

сушіння, однак наявні й втрати через конвекцію та випромінювання. Такі дані дають змогу оцінити ККД системи та можливості оптимізації конструкції.

Отже, розроблена методика дослідження енергетичних характеристик геліосушарки та метрологічних властивостей засобів вимірювання теплотехнічних параметрів дає змогу отримувати достовірні дані про температуру, вологість й енергетичний баланс камери.

Експериментальні дослідження підтвердили її ефективність: температура в камері підтримується в межах 45–65 °С, відносна вологість зменшується з 80 % до 12 %, а енергетичний баланс дає змогу визначити шляхи втрат. Запропонована методика може використовуватися для оптимізації конструкції геліосушарок і підвищення їх енергоефективності. Зі спостережень видно, що температура найбільш стабільно підтримується в центральних точках камери, досягаючи максимуму 65 °С, тоді як на периферії та біля входу спостерігається зниження до 45 °С. Це свідчить про нерівномірність нагріву повітря, що важливо для оцінки ефективності сушіння та визначення зон, де продукт може висихати повільніше.

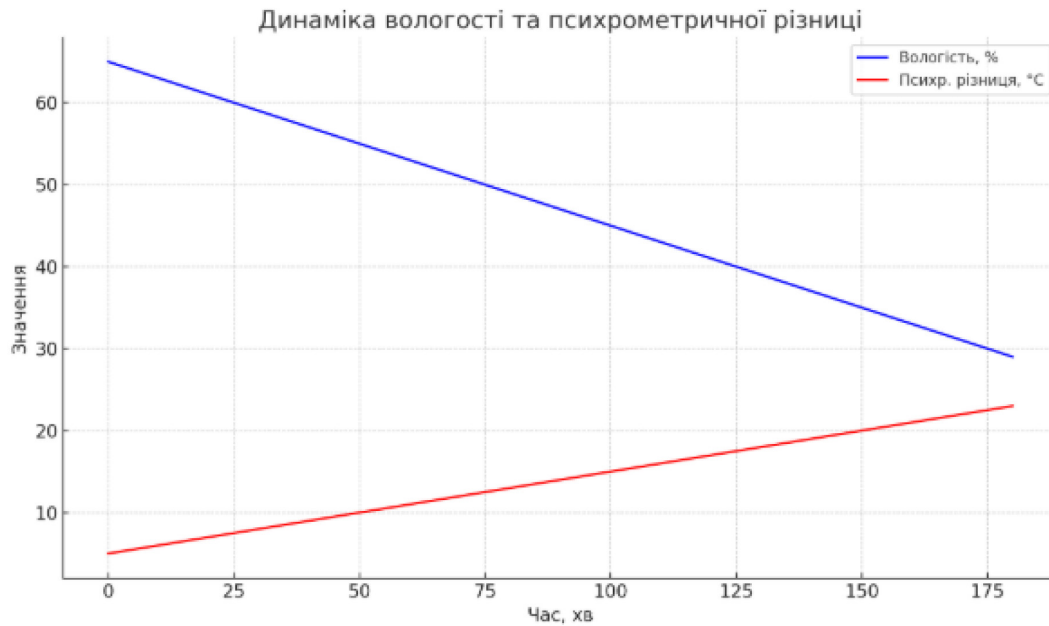


Рис. 9. Енергетичний баланс геліосушарки

Динаміка зміни температури протягом часу показує поступове встановлення теплового режиму та вплив зовнішніх факторів, як-от інтенсивність сонячного випромінювання. Аналіз графіків дає змогу оцінити стабільність режиму сушіння та рівномірність теплового поля, що є ключовим для оптимізації конструкції геліосушарки й підвищення енергоефективності процесу. Ці дані також можуть бути використані для корекції режимів експлуатації та підвищення якості готового продукту.

Наступний етап дослідження полягатиме в імітаційному комп'ютерному моделюванні процесів теплопередачі в геліосушарці за допомогою системи САПР *SolidWorks Flow Simulation*. Метою моделювання буде визначення температурних параметрів абсорбера, аналіз потоків теплоносія в камері сушарки та оцінка ефективності теплопередачі від абсорбера до робочого середовища. Для цього буде створена тривимірна геометрична розрахункова модель мінігеліосушарки з урахуванням усіх основних елементів конструкції: абсорбера, повітряних каналів, сушильної камери та вихідних отворів. У моделюванні передбачається використання реалістичних теплотехнічних властивостей матеріалів абсорбера та повітряного теплоносія, а також вхідних граничних умов, які відповідають експериментальним даним. Розрахункова модель дасть змогу отримати просторовий розподіл температури по абсорберу та камері, швидкість і напрямок потоків повітряного теплоносія, а також виявити зони нерівномірного нагріву. Отримані результати можна порівняти з експериментальними даними, що дає змогу верифікувати точність моделі та провести оптимізацію конструктивних параметрів сушарки. Такий підхід відповідає сучасним методикам теплотехнічного моделювання в науковій літературі [12], при прогнозуванні розподілу температур і потоків у таких системах сонячного сушіння.

*Висновки.* У роботі розроблено та обґрунтовано методику дослідження енергетичних характеристик геліосушарки, що дає змогу отримувати точні та відтворювані дані про температурний режим, вологість та енергетичний баланс сушильної установки.

Запропонована методика враховує розташування контрольних точок у сушильній камері, режим роботи вимірювальних приладів та необхідність корекції даних з урахуванням похибок засобів вимірювання. Установлено, що використання високоточних термометрів і психрометрів забезпечує достовірність отриманих даних і дає змогу здійснити кількісний аналіз рівно-



мірності розподілу тепла й вологості. Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність розробленої методики: температура в камері підтримується в межах 45–65 °С, відносна вологість зменшується з 80 % до 12 % протягом робочого циклу, а енергетичний баланс дає змогу визначити основні шляхи втрат й ефективність використання сонячної енергії.

Запропоновані підходи можуть бути використані для оптимізації конструкції геліосушарок, підвищення їх енергоефективності та забезпечення високої якості сушіння продуктів. Крім того, методика може слугувати основою для стандартизації досліджень теплотехнічних параметрів у таких установках та для метрологічного забезпечення вимірювань.

#### *Список використаних джерел*

1. J. Smith A. Kumar, Simulation of Solar Dryer Thermal Performance Using SolidWorks Flow Simulation, *Renewable Energy*, Vol. 182, 2022. P.1051–1064.
2. Озарків І. М., Кобринович М. С., Копинець З. П. Особливості перенесення вологи в процесі сушіння фруктів. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету*. 2007. Вип. 17.4. С. 124–125.
3. Pathare P. V. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*. 2006. N. 93. P. 285–291.
4. Goyal R. K., Kingsly A. R., Manikantan M. R., Ilyas S. M. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*. 2007. N. 79. P. 176–180.
5. Garau M. C. Drying of orange skin: drying kinetics modeling and functional properties. *Journal of Food Engineering*. 2006. N. 75. P. 288–295.
6. Menges H. O. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*. 2006. N. 47. P. 2337–2348.
7. Скляр Р. В. Доцільність використання економіко-математичних моделей в сільському господарстві. *Інноваційні технології в АПК: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Луцьк : Луцький НТУ. 2021. С. 122–124.
8. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Григоренко С. М. Методика моделювання та оптимізації структури посівних площ. *Науковий вісник ТДАТУ. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 1. №7. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-7*
9. Midilli A., Kucuk N. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2003. N. 44(7). P.1111–1122.
10. Wang Z. J. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Journal of Food Engineering*. 2006. N. 40. P. 39–46.
11. Коробка С. В. Геліосушарка з тепловим акумулятором: пат. 97139 У Україна: МПК А23L3/00 / заявник та патентовласник Коробка С.В. № UA 97139 U; заявл. 26.12.2014 ; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4. 3 с.
12. Korobka S., Babych M. Substantiation of the constructive–technological parameters of a solar fruit dryer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. N. 1/8 (85). P. 13–19.
13. Korobka S., Syrotyuk S., Zhuravel D., Boltianskyi B., Boltianska L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*, 2021, (2). P. 60–75.
14. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. *Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі: матеріали XI Міжнар. наук. конференції (Львів, 04–06 жовтня 2022 р.) / ЛНУП: За заг. ред. В. В. Снітинського. Львів : ЛНУП, 2022. С. 16–18.*
15. Болтянський Б. В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.
16. Коробка С. В., Стукалець І. Г., Бабич М. І., Баранович С. М., Скляр О. Г., Болянський Б. В., Скляр Р. В. Впровадження геліосушарок для виробництва висушених сільськогосподарських продуктів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 14, т. 2. DOI:10.32782/2220-8674-2024-24-2-7*
17. Serhiy Syrotyuk, Volodymyr Halchak, Vasyl Lopushniak, Serhii Korobka, Hanna Syrotyuk, Taras Stanytskyu, Kateryna Yankovska, Tomasz Jakubowski, Jan Giełżecki, Boris Boltyanskyi. The application of fuzzy logic algorithms in controllers for controlling the use of renewable energy sources. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 101 NR 2/2025. P.125-132. DOI:10.15199/48.2025.02.30*



18. Коробка С. В., Болтянський Б. В., Скляр Р. В., Стукалець І. Г., Шеремета Р. Б. Обґрунтування енергетичного аналізу системи фотомодуль-акумулятор. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д. т. н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С. 170–184. DOI:10.32782/2078-0877-2025-25-2-21

19. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Болтянський Б. В., Гулевський В. Б., Панов І. С. Впровадження культури сортування сміття в Україні: проблеми та позитивний досвід розвинених країн. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д. т. н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С. 157–162. DOI:10.32782/2078-0877-2025-25-2-19

20. Коробка С. В., Кригуль Р. Є., Бабич М. І., Стукалець І. Г., Сиротюк С. В., Болтянський Б. В. Опис виробничої геліосушарки з тепловим насосом. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д. т. н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С. 145–152. DOI:10.31388/2078-0877-2023-23-1-145-152.

21. Коробка С. В., Стукалець І. Г., Сиротюк С. В., Скляр О. Г., Скляр Р. В., Болтянський Б. В., Баранович С. М. Математичне моделювання процесу сушіння фруктів у геліосушарці. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д. т. н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 2. С. 78–98. DOI:10.31388/2078-0877-2023-23-2-78-98

*Стаття надійшла до редакції 29.10.2025*

*Стаття прийнята 12.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**S. Korobka<sup>1</sup>, R. Skliar<sup>2</sup>, I. Stukalets<sup>1</sup>, R. Krygul<sup>1</sup>, I. Dudko<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup> Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv**

**<sup>2</sup> Dmytro Motorny Tavsia State Agrotechnological University**

## **JUSTIFICATION OF THE METHODOLOGY FOR INVESTIGATING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A SOLAR DRYER AND THE METROLOGICAL PROPERTIES OF MEANS FOR MEASURING THERMAL PARAMETERS**

### *Summary*

The study presents the development and justification of a methodology for investigating the energy characteristics of a solar dryer, taking into account the metrological properties of measuring instruments for thermal parameters. The main focus is placed on determining the influence of heat carrier parameters, solar radiation intensity, and heat exchange efficiency on the energy performance of the system.

An analysis of measurement accuracy for temperature, humidity, and air velocity was carried out using thermocouple sensors, which made it possible to establish their metrological characteristics and evaluate measurement errors under real operating conditions. The proposed methodology provides a comprehensive evaluation, optimization of the operating modes of the solar dryer, and improvement of the reliability of experimental data. The obtained results can be applied to improve the design of solar drying units and to develop control systems for thermal parameters in renewable energy technologies. The methodology integrates experimental and analytical approaches to assess the dynamics of heat transfer and energy conversion processes within the solar drying chamber.

It also provides a basis for evaluating the influence of environmental factors on the efficiency of solar energy utilization. The systematic approach proposed in this work allows for establishing correlations between measured thermal parameters and the overall performance indicators of the system. This ensures not only accurate energy analysis but also supports further research in the development of intelligent monitoring and control systems for solar-powered thermal technologies. The obtained results contribute to improving the accuracy of experimental measurements, the reliability of energy audits, and the practical applicability of solar dryers.

**Keywords:** solar energy, solar dryer, temperature-humidity fields, heat and mass transfer, intensification, convective drying.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-8>

УДК 631.333:631.172

В. П. Кувачов, д-р техн. наук

В. М. Дружич, інженер

С. О. Шевченко, інженер

К. О. Зеленов, інженер

С. А. Інува, інженер

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-5762-256X

ORCID: 0009-0007-5361-5921

ORCID: 0009-0007-3371-1262

ORCID: 0009-0001-1235-6341

## МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЦЕСУ ПІДБИРАННЯ І ЗМІШУВАННЯ БІОМАСИ ДЛЯ ОРГАНІЧНИХ ДОБРИВ

*Анотація.* Актуальність досліджень зумовлена відсутністю механіко-технологічних основ для розробки спеціалізованого підбирача-змішувача біомаси для малих фермерських господарств, що призводить до високих витрат на виробництво компосту. Мета – підвищення техніко-експлуатаційних показників процесу підбирання й змішування біомаси шляхом обґрунтування конструктивно-технологічної схеми та параметрів агрегата. За результатами досліджень розроблено технологічну схему приготування органомінерального компосту та запропоновано конструкцію навантажувача-змішувача з дозатором мінеральних добрив. Установлено, що кінематичне узгодження швидкостей шнека та дозувального вала забезпечує стабільне й рівномірне перемішування, підвищує якість компосту та оптимізує енергоспоживання.

*Ключові слова:* сталий розвиток сільського господарства, підтримка малих фермерів, технічні інновації в аграрному секторі, агроінженерія.

*Постановка проблеми.* Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності відновлення родючості ґрунтів є використання компостування як агротехнологічного процесу [1; 2]. Компост утворюється внаслідок мікробіологічного розкладу органічних компонентів і становить собою складну багатокомпонентну систему, насичену поживними речовинами. Введення до органічної маси мінеральних добрив дає змогу формувати органомінеральний компост, який характеризується підвищеною агрохімічною ефективністю та зменшеним обсягом внесення порівняно із суто органічними субстратами. Є декілька методів приготування компосту, зокрема шаровий, осередковий та майданчиковий, проте їх практичне впровадження ускладнене технологічними обмеженнями сучасного машинного парку [3; 4]. Наявна недостатня номенклатура спеціалізованих машин, висока вартість імпортих аналогів та обмежена продуктивність створюють значні економічні витрати на виробництво одиниці компосту. У цьому контексті розробка й оптимізація параметрів навантажувача-змішувача для органомінерального компосту дає змогу інтегрувати операції завантаження та змішування органічних і мінеральних компонентів, підвищити продуктивність процесу та знизити питомі витрати на одиницю продукції. Водночас вирішення цього завдання потребує подолання наукової проблеми, пов'язаної з відсутністю механіко-технологічних основ функціонування спеціально розробленого підбирача-змішувача біомаси для малих фермерських господарств, що обмежує ефективність використання таких машин у практичних умовах.

*Аналіз останніх досліджень.* Приготування компосту, зокрема органомінерального, є високотрудомісткою та технологічно складною операцією, оскільки передбачає переміщення значних обсягів посліду, торфу та інших компонентів, а також точне дозування мінеральних



добрив [5]. Для підвищення ефективності процесу та зниження його трудомісткості застосовується механізована техніка, адаптована або спеціально розроблена для приготування компосту. До серійних машин, які використовують у цій сфері, належать, зокрема, ALLU AS 26(38), SEKO, вітчизняний навантажувач ПНД-250А, стаціонарно-пересувний змішувач-завантажувач СЗУ-20, а також пересувні, мобільні та стаціонарні засоби ПЗМ-1,5, ККС-Ф-2, СПУ-40М, ПДТ-1,5 та інші [1–6].

Аналіз наявних технічних засобів демонструє, що, незважаючи на певні дослідження в цій галузі, фізичні процеси, які відбуваються під час змішування компонентів, досліджено недостатньо [7; 8]. Це ускладнює обґрунтування оптимальних параметрів робочих органів навантажувачів-змішувачів, здатних суміщати операції змішування та навантаження одночасно. В умовах сучасного виробництва операції змішування й навантаження зазвичай виконують послідовно різними машинами, що призводить до підвищених витрат і трудомісткості. Об'єднання цих операцій у єдиному агрегаті з одночасним дозуванням мінеральних добрив дає змогу значно оптимізувати процес, зменшити витрати та підвищити продуктивність, що робить розробку й обґрунтування параметрів такого навантажувача-змішувача надзвичайно актуальним завданням.

Процеси змішування та приготування компосту залишаються предметом значного наукового інтересу, проте наявні дослідження не охоплюють досить детально фізичні закономірності взаємодії компонентів, що обмежує можливість використання цих даних для конструювання ефективних робочих органів навантажувачів-змішувачів, які поєднують операції змішування та навантаження.

*Мета досліджень* полягає в підвищенні техніко-експлуатаційних показників роботи підбирання й змішування біомаси для органічних добрив шляхом обґрунтування його конструктивно-технологічної схеми та параметрів.

*Основна частина.* Для приготування органомінерального компосту запропонована технологічна схема, за якою на підготовлений майданчик визначених розмірів завозяться торф та лігнін із формуванням торф'яної подушки товщиною 0,25–0,30 м. Надалі укладаються та розрівнюються шари посліду, торфу й соломи, чергуючи їх пошарово. Компостну масу бульдозером формують у штабелі завширшки 4–6 м та заввишки 3–4 м. Для забезпечення однорідності та активного перемішування органомінеральної маси застосовується дискова борона. Внесення мінеральних добрив здійснюється безпосередньо перед навантаженням за допомогою спеціально розробленого навантажувача-змішувача, оснащеного дозатором.

Запропонований навантажувач-змішувач призначений для рівномірного перемішування мінеральних добрив усередині компостної маси під час навантаження. Конструктивно він складається з базової машини, редуктора, закріпленого на рамі, стрічкового гвинта з приводним валом, який отримує рух від вала відбору потужності (далі – ВВП) через ланцюгову передачу, муфту та зірочку. До складу агрегата входять також відвантажувальний транспортер і бункер-дозатор із вивантажувальними отворами та дозувальним валом. Жорсткий кінематичний зв'язок між валом гвинта та дозувальним валом забезпечує синхронне обертання й точне дозування мінеральних компонентів під час переміщення компостної маси, що дає змогу підвищити рівномірність суміші та ефективність технологічного процесу.

Процес змішування та навантаження органомінерального компосту реалізується так. Під час поступального руху трактора стрічковий гвинт живильника (рис. 2 та 3), закріпленого на рамі навантажувача-змішувача, обертається на приводному валу, який отримує рух від вала відбору потужності через муфту, ланцюгову передачу та редуктор, і занурюється в пошарово розкладений бурт компосту. У результаті обертання гвинта частини компостної маси відокремлюються від бурту та переміщуються до вивантажувального транспортера. Жорсткий кінематичний зв'язок між валом гвинта та дозувальним валом забезпечує синхронне обертання й точне дозування мінеральних компонентів під час переміщення компостної маси, що дає змогу підвищити рівномірність суміші та ефективність технологічного процесу.



Рис. 1. Схема технологічного процесу приготування та змішування органомінерального компосту з одночасним навантаженням

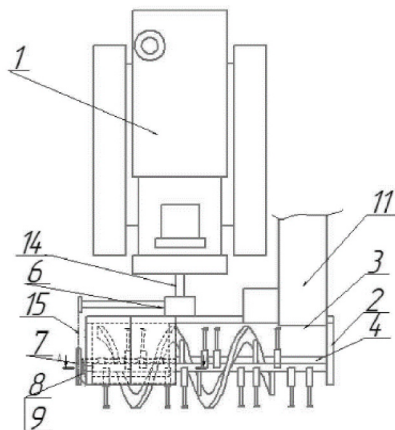


Рис. 2. Схема навантажувача-змішувача органомінерального компосту і його робочих органів:

1 – трактор; 2 – рама; 3 – вивантажувальне вікно; 4 – вал; 5 – стрічковий гвинт; 6 – редуктор; 7 – ланцюг; 8 – муфта; 9 – шестерня; 10 – бункер-дозатор; 11 – вивантажувальний транспортер; 12 – ланцюг; 13 – дозуючий вал; 14 – вал відбору потужності; 15 – ланцюг

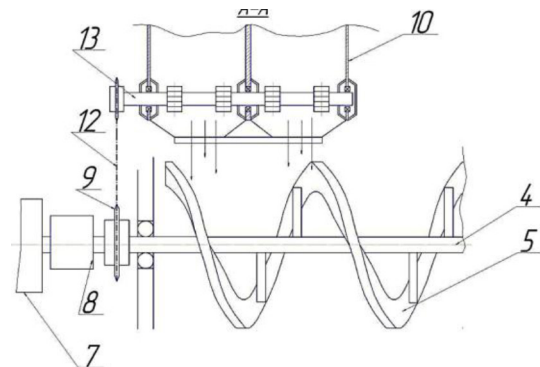


Рис. 3. Схема подання мінеральних добрив до робочого органу навантажувача-змішувача:

матичний зв'язок між валом гвинта та дозувальним валом забезпечує синхронне обертання останнього. Під час обертання дозувального вала в бункері-дозаторі здійснюється точне дозування мінеральних добрив, які надходять у зону дії стрічкового гвинта. У процесі переміщення компосту та мінеральних компонентів гвинтом до вивантажувального транспортера відбувається їх інтенсивне взаємне перемішування, що забезпечує однорідність органомінеральної маси та підвищує ефективність технологічного процесу.

До основних параметрів робочих органів навантажувача-змішувача органомінерального компосту належать режимні характеристики та швидкісні показники. До режимних параметрів належать: швидкість обертання стрічкового гвинта  $n_g, \text{хв}^{-1}$ , та його кутова швидкість  $\omega_g, \text{рад/с}$ ; швидкість обертання дозувального вала  $n_v, \text{хв}^{-1}$ , та його кутова швидкість  $\omega_v, \text{рад/с}$ . До швидкісних показників належать поступальна швидкість навантажувача  $v_{н.с.}, \text{м/с}$ , та швидкість падіння мінеральних добрив  $v_d, \text{м/с}$ . Визначення та оптимізація цих параметрів є критично важливими для забезпечення рівномірності змішування компосту та точного дозування мінеральних компонентів.

Конструктивні параметри навантажувача-змішувача органомінерального компосту класифікуються за трьома групами. Для дозувальних та подавальних робочих органів визначають такі характеристики (рис. 4 і 5): ширина ( $b_{\delta}$ ), висота ( $h_{\delta}$ ) та довжина ( $l_{\delta}$ ) бункера; його місткість ( $V_{\delta}$ ); довжина ( $l_o$ ), ширина ( $b_o$ ) та кількість ( $z_o$ ) вивантажувальних вікон; діаметр ( $D_k$ ) та ширина ( $B_k$ ) катушок дозувального вала. Окрім того, встановлюються параметри робочих поверхонь катушок, зокрема діаметр ( $D_{en}$ ), глибина западини ( $h_{en}$ ), об'єм ( $V_{en}$ ) та кількість западин ( $m_{en}$ ). Визначення й оптимізація цих параметрів є необхідними для забезпечення точного дозування мінеральних добрив та ефективного переміщення компостної маси під час роботи.

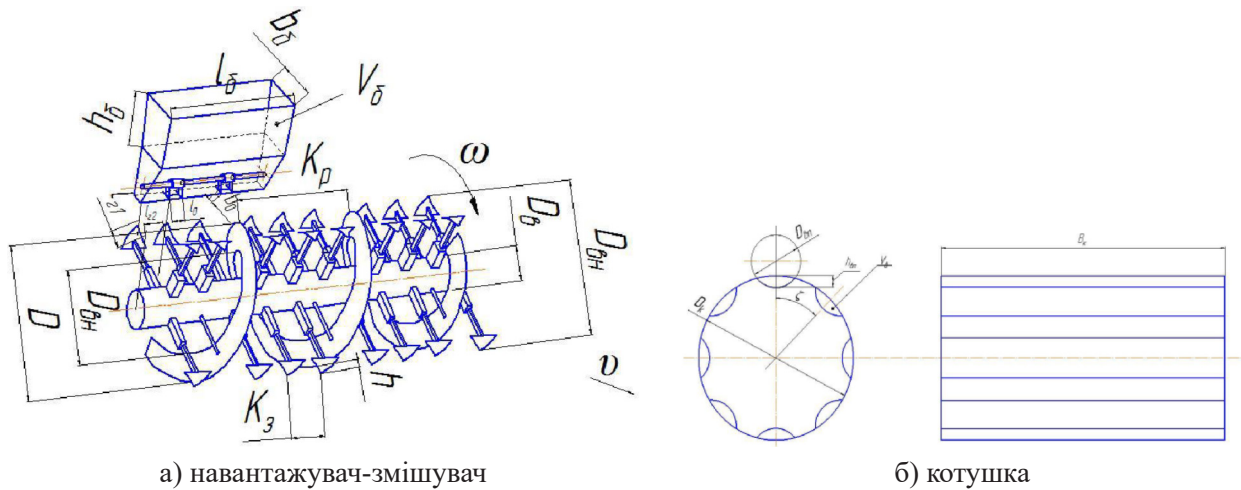


Рис. 4. Параметри робочих органів навантажувача-змішувача

Захоплення компостної маси гвинтовим робочим органом здійснюється завдяки його оберտальному руху, тоді як занурення у масив відбувається внаслідок поступального переміщення разом із навантажувачем. Так, робочий орган розглядається як рухома механічна система, поведінка якої може бути описана за допомогою системи параметричних рівнянь. Рух кожної точки робочого органу моделюється в плоскій (двовимірній) системі координат, що дає змогу математично характеризувати траєкторії переміщення матеріалу та взаємодію компонентів компосту під час процесу змішування і навантаження.

Загальна продуктивність відділення зубами робочого органу частин органічних добрив від бурту і подання їх до гвинтової поверхні гвинтового робочого органу, здійснюючи обертальний рух, переміщує масу до транспортеру, повинна бути більше за продуктивність подання компосту

$$Q_n \leq Q_e. \quad (1)$$

розгорнутому вигляді вираз (1) можна представити рівнянням:

$$A_k v_{n.c.} \leq \frac{z_k \omega B_z}{\pi} \left( \frac{D_p^2 \omega t}{4} - \frac{D_p^2 \sin(2\omega t)}{16} + \frac{v_{n.c.} D_p \cos(\omega t)}{2\omega} \right), \quad (2)$$

де  $A_k$  – площа бічної проекції западини катушки,  $m^2$ ;  
 $v_{n.c.}$  – поступальна швидкість навантажувача-змішувача,  $m/c$ ;  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання робочого органу,  $рад/c$ ;  
 $z_k$  – число западин на катушці, шт.;  
 $B_z$  – ширина зуба гвинтового робочого органу,  $m$ ;  
 $D_p$  – діаметр по ріжучих зубах гвинтового робочого органу,  $m$ .

Вираз (2) об'єднує між собою діаметр робочого органу по відокремлювальних зубах, поступальну швидкість навантажувача і кутову швидкість робочого органу, а також дають змогу обґрунтувати ці параметри.

Зокрема, рішення цього рівняння щодо поступальної швидкості має вигляд:

$$v_{n.c.} \leq \frac{\frac{1}{4\pi} z_{\kappa} \omega B_3 D_p^2 \left( \omega t - \frac{\sin(2\omega t)}{4} \right)}{A_{\kappa} - \frac{z_{\kappa} B_3 D_p \cos(\omega t)}{2\pi}}. \quad (3)$$

обраними параметрами підбирача-змішувача органо-мінерального компосту (рис. 2) рішення виразу (3) представлено на рис 5.

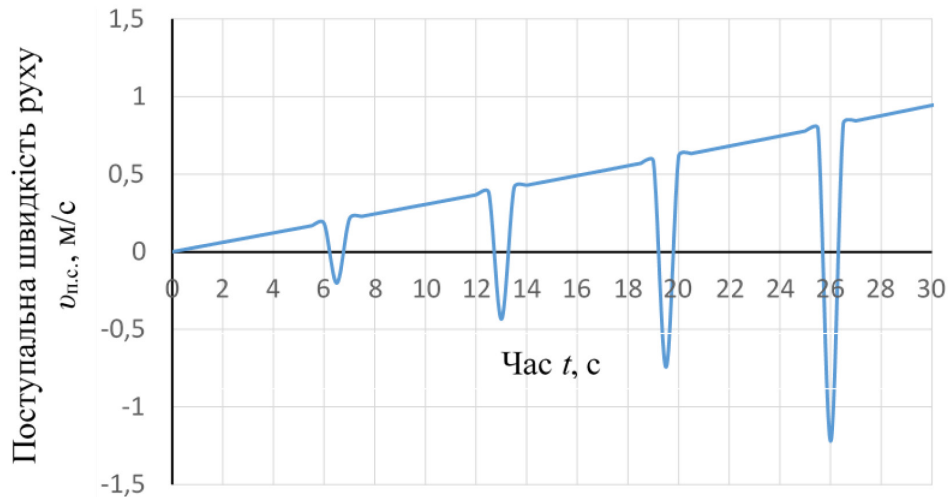


Рис. 5. Залежність поступальної швидкості руху навантажувача-змішувача органо-мінерального компосту в часі

Аналіз рис. 5 свідчить про те, що із часом межа допустимої швидкості руху навантажувача-змішувача органо-мінерального компосту збільшується і за 30 с його роботи вже дорівнює 1 м/с (3,6 км/год). Це пояснюється тим, що із часом продуктивність подачі компосту до транспортеру машини збільшується, що дає змогу збільшувати при цьому її роботу поступальну швидкість руху. Водночас на рис. 5 можна помітити, що швидкість змінюється досить нерівномірно через комбінацію лінійного та синусного членів у чисельнику та косинуса в знаменнику виразу (3). Малі тренди прямої функції швидкості незначні, вони додають тільки «хвилеподібності» на фоні періодичних від'ємних піків. Пояснити це можна тим, що траєкторія руху кожної точки гвинтового робочого органу в процесі обертального руху має вигляд циклоїдальних кривих (рис. 6). За нею швидкість обертання робочого органу вище поступальної швидкості навантажувача-змішувача органо-мінерального компосту.

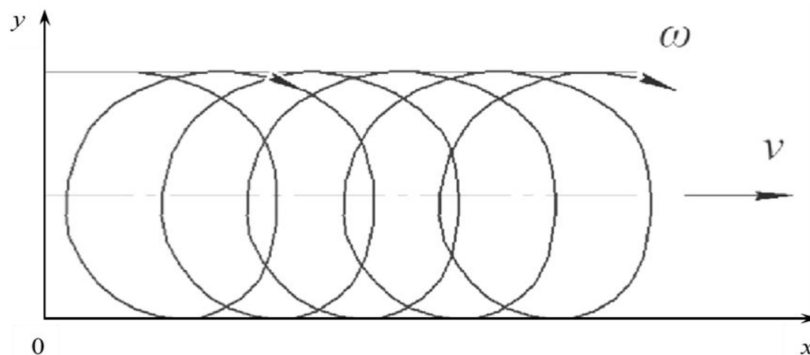


Рис. 6. Траєкторія руху точки робочого органу у вигляді циклоїди



З аналізу вищевикладеного випливає, що робота підбирача-змішувача неможлива без узгодження швидкостей руху машини та робочих органів, оскільки саме це визначає ефективність захоплення, переміщення й змішування біомаси. Тому в подальших дослідженнях потрібне обґрунтування кінематичного коефіцієнту узгодження швидкостей, що репрезентує співвідношення між лінійною швидкістю робочих органів і поступальною швидкістю руху машини. Його фізична природа полягає в забезпеченні збалансованого руху системи «машини – робочий орган – матеріал», коли обертання підбирача й поступальний рух машини взаємно доповнюють одне одного. Якщо швидкість робочих органів менша за швидкість руху агрегата, біомаса не встигає захоплюватися; якщо вони рівні – матеріал лише переміщується без достатнього перемішування; а при надмірному перевищенні швидкості робочих органів біомаса розкидається, зростають втрати й енергоспоживання. Тому кінематичний коефіцієнт є мірою узгодженості рухів, що забезпечує оптимальну траєкторію частинок біомаси, рівномірне змішування та раціональне використання енергії.

*Висновки.* Розроблена технологічна схема приготування органомінерального компосту з пошаровим укладанням торфу, лігніну та посліду та подальшим перемішуванням дисковою бороною показала ефективне формування однорідної компостної маси. Використання навантажувача-змішувача з дозатором мінеральних добрив забезпечує рівномірне розподілення компонентів, а двосекційний бункер дає змогу одночасно подавати різні види добрив. Аналіз отриманих результатів показав, що кінематичне узгодження швидкостей шнека та дозувального вала забезпечує стабільне перемішування без розсіювання матеріалу, підвищує якість компосту та оптимізує енергоспоживання. Так, запропонована конструкція і технологія дають змогу досягти високої ефективності процесу приготування органомінерального компосту.

#### *Список використаних джерел*

1. Писаренко В. М., Писаренко П. В. Органічні добрива на захисті родючості ґрунту : монографія. Полтава, 2022. 156 с.
2. Daum T. Agricultural mechanization and sustainable agrifood system transformation in the Global South. Background paper for The State of Food and Agriculture FAO Agricultural Development Economics Working Paper, 2022. 22–11. <https://doi.org/10.4060/cc2625en>
3. Królczyk Jolanta Beata, Rezwiakow Andrzej, Tukiendorf Marek. Mixing of Biomass and Coal in a Static Mixer as an Example of Technological Solutions Involving Implementation of Renewable Energy Sources. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2014. 21(4). 685–696. DOI:10.1515/eces-2014-0050
4. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Гриник І. В. Малогабаритні сільськогосподарські машини. Конструкція, теорія і розрахунок: монографія. Київ : Аграрна наука, 2017. 292 с.
5. Sayed D. F., Morad M. M., Ali M. M., & El-Maghawry H. A. Study On Some Different Operating Parameters Affecting e Performance Of Compost Turning Machines. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 2021. 48(2). 419–432.
6. Joshua T. Velasco, Gilbert L. Bandisa, Erickson N. Dominguez and Jamesly T. Andres. Design, Fabrication, and Performance Evaluation of a Small-scale Compost-Turning Machine. *Mountain Journal of Science and Interdisciplinary Research*, 2024. 84(1). DOI: 10.70884/mjsir.v84i1.406.
7. Кувачов В. П., Дружич В. М., Шевченко С. О., Зеленов К. О. Дослідження стійкості руху самохідної машини з робочими органами реактивного типу. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2024. 14(2). 15 с. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-3>
8. Кувачов В. П., Дружич В. М., Шевченко С. О., Зеленов К. О. Теоретичні основи руху самохідної машини з робочими органами реактивного типу в системі точного землеробства. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2024. 14(1). 12 с. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-4>

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2025*

*Стаття прийнята 12.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*





V. Kuvachov, V. Druzhych, S. Shevchenko, K. Zelenov, S. Inuva  
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

## MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE BIOMASS PICKING AND MIXING PROCESS FOR ORGANIC FERTILIZERS

### *Summary*

The relevance of this study arises from the absence of established mechanical and technological foundations for developing a specialized biomass picker-mixer intended for small farms. The research aims to improve the technical and operational performance of biomass collection and mixing by substantiating the design and technological parameters of a new agricultural unit.

Based on theoretical analysis and experimental justification, a technological scheme for preparing organo-mineral compost has been developed, as well as a structural design of a loader-mixer equipped with a mineral fertilizer dosing system. The proposed design integrates the operations of biomass loading and mineral fertilizer mixing into a single technological process, which significantly increases the efficiency of compost preparation.

The study establishes that the kinematic coordination between the screw conveyor and the dosing shaft ensures uniform distribution of fertilizers throughout the compost mass, contributing to the homogeneity of the mixture and optimizing energy consumption. The technological scheme includes sequential laying of peat, lignin, and manure in alternating layers, followed by active mixing and mineral enrichment. The loader-mixer uses a screw-type feeding mechanism driven by a power take-off shaft, a reduction gearbox, and a dosing bunker. A rigid kinematic connection between the auger and the dosing shaft guarantees synchronized operation and precise dosing during mixing and loading.

Mathematical modeling and analytical relationships were obtained to describe the motion parameters of the working organs, including angular and translational velocities, which determine the intensity of mixing and the rate of material feeding. The results demonstrate that the optimal ratio of screw rotational speed to the machine's forward movement determines the effectiveness of biomass capture, transportation, and mixing. Deviations from this ratio result in uneven blending or excessive energy consumption.

The proposed mechanical design and process scheme allow for the simultaneous execution of loading, mixing, and dosing operations, reducing the total time and energy required for compost preparation. Implementation of such a system in small and medium-sized farms can substantially lower production costs, improve compost quality, and contribute to sustainable agricultural development by recycling organic waste into valuable soil fertilizers.

**Keywords:** sustainable agricultural development, support for small farmers, technical innovations in the agricultural sector, agroengineering.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-9>

УДК 662.8.055

В. П. Кувачов, д-р. техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-5762-256X

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: volodymyr.kuvachov@tsatu.edu.ua

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ ВОЛОГОСТІ СИРОВИНИ ДЛЯ БРИКЕТУВАННЯ

*Анотація.* У статті досліджено вплив вологості сировини на фізичну щільність паливних брикетів, отриманих методом високотемпературного пресування з різних видів біомаси: деревної тирси, соломи та лушпиння соняшнику. Метою роботи було експериментальне встановлення критичного раціонального діапазону вологи для максимізації ступеня ущільнення. Експерименти проводили з п'ятьма рівнями вологості – від 4 % до 12 % – при сталих параметрах пресування. Аналіз результатів підтвердив нелінійний характер залежності з вираженим екстремумом. Найвища щільність була зафіксована при вологості 8 % для всіх зразків, досягаючи  $\rho = 1,25 \text{ т/м}^3$  для тирси.

Оптимум пояснюється ідеальною дією вологи як гідротермального пластифікатора для активації лігніну. Установлено, що відхилення від цього діапазону призводить до значного зниження щільності.

*Ключові слова:* брикети, сировина, брикетування, лігнін, вологість, щільність, пароутворення, температура.

*Постановка проблеми.* Дедалі більший світовий попит на відновлювані джерела енергії зумовлює необхідність підвищення ефективності та якості біопалива, зокрема паливних брикетів, виготовлених з агробіомаси та деревної тирси [1; 3]. Якість кінцевого продукту, що визначається його фізичною щільністю та механічною міцністю, безпосередньо впливає на теплотворну здатність і логістичні витрати. Процес брикетування, який базується на термопластичній активації лігніну, є складним фізико-хімічним явищем, що критично залежить від технологічних параметрів [2].

Незважаючи на широке впровадження технологій брикетування, залишається недостатньо вивченим і кількісно не обґрунтованим універсальний вплив вологості сировини на кінцеву щільність продукту за сталого режиму пресування для різних видів біомаси. У виробничих умовах часто спостерігаються значні коливання щільності брикетів при зміні джерела сировини (перехід від деревної тирси до соломи чи лушпиння), що призводить до нестабільності якості продукції та економічних втрат [4]. Дійсні наукові дані вказують на наявність екстремуму в залежності щільності від вологості, проте точне кількісне визначення оптимального діапазону для одночасного використання деревної, соломистої та олійної сировини є необхідним.

Так, проблема полягає у відсутності чіткого кількісного обґрунтування раціонального вмісту вологи для уніфікованого процесу пресування різномірної біомаси, що перешкоджає максимальній термопластичній консолідації лігніну й призводить до зниження кінцевої щільності через неефективну пластифікацію (за низької вологості) або пружну післядію (за високої вологості). Вирішення цієї проблеми має пряме практичне значення для підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності біопалива.

*Аналіз останніх досліджень.* Питання виготовлення високоякісних паливних брикетів є центральним для сучасної біоенергетики, що вимагає глибокого розуміння термогідродинамічних, реологічних та механічних процесів ущільнення. У науковій літературі підтверджено,



що ключовим механізмом, який забезпечує монолітність брикетів без зовнішніх зв'язувальних агентів, є термопластична активація лігніну. Установлено, що лігнін, як природний полімер, переходить у в'язку текучий стан за температури, що перевищує його температуру склування. Дослідження у сфері фізики полімерів та біомаси демонструють, що для абсолютно сухої деревини температура склування є високою, проте в умовах пресування критично важливу роль відіграє вода, яка виступає як високоефективний пластифікатор [5]. Наявність вологи, згідно з гідротермальною теорією, істотно знижує необхідну температуру активації лігніну, даючи йому змогу набувати достатньої пластичності для забезпечення адгезії та консолідації частинок уже за помірних температур 100–110 °С, за умови високого тиску [6; 7]. Оптимальна вологість критично необхідна для мінімізації енерговитрат на нагрівання та максимізації ефективності міжчасткового зв'язування через формування водневих та вандерваальсових сил. Установлено, що ефективність цього зв'язування безпосередньо корелює з кінцевою теплотворною здатністю брикету [8; 9].

Аналіз комплексних досліджень щодо ущільнення різних видів біомаси (деревина, солома, лушпиння) беззаперечно доводить, що залежність кінцевої щільності брикету від початкової вологості сировини має екстремальний характер, з чітко вираженим оптимальним вмістом вологи у вузькому діапазоні. Технологічні дослідження застерігають, що за низької вологості (менш ніж 5 %) матеріал зберігає високу внутрішню жорсткість і крихкість [10; 11]. Недостатність вологи для повноцінної пластифікації лігніну та геміцелюлозу вимагає застосування непропорційно високого тиску для досягнення ущільнення, що є економічно недоцільним і підвищує зношеність обладнання. Це веде до неефективної пластичної податливості та формування в брикеті великої кількості мікротріщин і внутрішніх порожнин, знижуючи кінцеву його щільність. Натомість у діапазоні високої вологості (понад 10 %) фіксується дія руйнівного механізму, пов'язаного з інтенсивним пароутворенням. Як зазначається у працях з термодинаміки пресування та механіки твердих тіл, надлишок вологи під впливом ізохоричного стиснення і температури миттєво перетворюється на пару, яка створює високий внутрішній тиск у мікропорожнинах [12]. Після зняття зовнішнього пресувального тиску внутрішній тиск пари спричиняє пружну післядію (значне розширення об'єму) та руйнування структури брикету. Це призводить до різкого зниження кінцевої щільності та критичної втрати механічної міцності. Слід зазначити, що швидкість охолодження брикету також впливає на ступінь прояву пружної післядії за надлишкової вологості. Авторитетні наукові роботи сходяться на тому, що універсальний оптимальний діапазон вологості перебуває в межах 6–10 %, оскільки він забезпечує максимальну реологічну податливість сировини за мінімальних ризиків пароутворення [13; 14]. При цьому підкреслюється, що точне значення вологості є функцією хімічного складу сировини та її фізичної структури. Різниця в хімічному складі, зокрема вміст лігніну та мінеральних домішок, може незначно зміщувати раціональний діапазон. Визначення єдиного універсального оптимуму вологості для різних видів біомаси є важливим кроком для стандартизації та уніфікації технологічних процесів на виробництвах, що використовують змішану або змінну сировинну базу, забезпечуючи стабільність якості продукції. Оптимізація вологості на етапі підготовки сировини є найбільш економічно виправданим заходом для підвищення ефективності виробництва. Контроль цього параметра дає змогу знизити експлуатаційні витрати на пресування та сушіння [15; 16].

*Формулювання цілей статті.* Метою наукової роботи є експериментальне встановлення раціонального діапазону вологості сировини (тирси, соломи та лушпиння соняшнику) для забезпечення максимальної фізичної щільності паливних брикетів, отриманих методом високотемпературного пресування за сталих технологічних режимів. Для досягнення цієї мети необхідно дослідити нелінійну залежність щільності брикетів від вологості сировини в діа-

пазоні від 4 % до 12 % для трьох різних видів біомаси, що дасть змогу охопити як умови недостатньої пластифікації, так і надмірного пароутворення. Визначити критичний оптимальний уміст вологи для кожного типу сировини, за якого досягається найвищий ступінь ущільнення.

*Основна частина.* Метою дослідження є кількісне встановлення впливу вологості сировини на фізичну щільність паливних брикетів, отриманих з різних видів біомаси: соломи, деревної тирси та лушпиння соняшнику [17; 18]. Для забезпечення порівнянності результатів експерименти проводили за сталих технологічних параметрів пресування, включно з фіксованим тиском та температурою (що відповідають умовам високотемпературної активації лігніну та інших природних зв'язувальних компонентів). Сировина була підготовлена шляхом подрібнення до оптимальної фракції в діапазоні 3–6 мм, що мінімізує вплив гранулометричного складу на процес ущільнення [19; 20]. Досліджували п'ять ключових рівнів вологості сировини 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 %, які охоплюють діапазон від критично низької до надмірної вологості. У таблиці 1 представлено результати досліджень впливу вологості сировини на щільність брикетів із трьох різних видів сировини за сталого тиску та температури пресування.

Таблиця 1

## Результати досліджень

Вологість сировини, %	4	6	8	10	12
Щільність брикетів з соломи, т/м <sup>3</sup>	1,05	1,15	1,2	1	0,9
Щільність брикетів з тирси, т/м <sup>3</sup>	1	1,18	1,25	1,12	0,95
Щільність брикетів з лушпиння соняшнику, т/м <sup>3</sup>	1	1,15	1,19	1,1	0,9

Графічна інтерпретація отриманих даних відображена на рисунку 1.

Аналіз отриманих результатів, візуалізованих на графіку (рис. 1), підтверджує нелінійний характер залежності щільності брикетів від вологості сировини для всіх трьох видів біомаси, що має чітко виражений оптимум.

Для деревної тирси максимальна щільність 1,25 т/м<sup>3</sup> досягнута за вологості 8 %. Це пояснюється тим, що за цієї вологості вода діє як гідротермальний пластифікатор, ефективно знижуючи температуру розм'якшення лігніну та сприяючи його переходу у в'язко текучий стан. Лігнін, своєю чергою, забезпечує формування міцних адгезійних зв'язків. За зниження вологості до 4 % щільність зменшується до 1,00 т/м<sup>3</sup>, що свідчить про недостатню пластичність матеріалу. Збільшення вологості до 12 % призводить до падіння щільності до 0,95 т/м<sup>3</sup> через надмірне пароутворення в умовах пресування, що спричиняє пружну післядію та розтріскування брикету після зняття тиску.

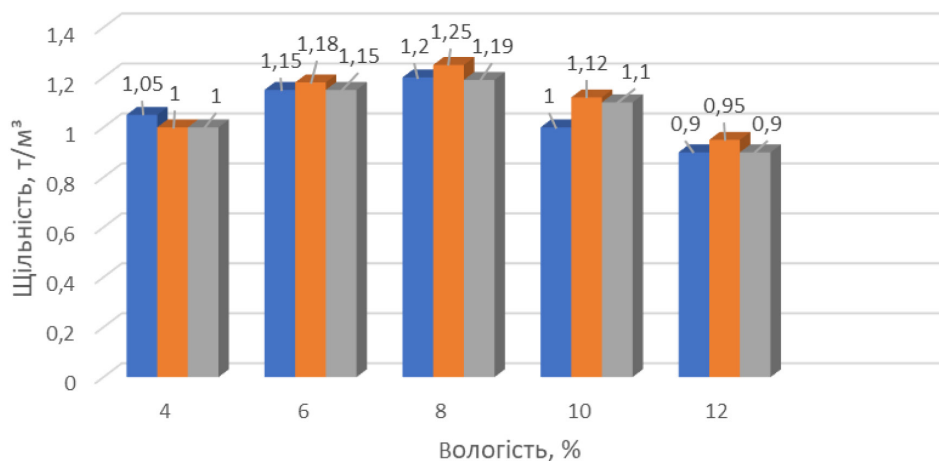


Рис. 1. Графік залежності щільності брикету від вологості для різних видів сировини



Схожа закономірність спостерігається і для соломи, де максимальна щільність  $1,20 \text{ т/м}^3$  також фіксується за вологості 8 %. Однак у випадку соломи, яка має інший лігноцелюлозний склад (вищий уміст кремнезему та нижчий уміст лігніну), діапазон робочої вологості є більш чутливим. Збільшення вмісту води в сировині до 10 % спричиняє значне зниження кінцевої фізичної щільності брикетів. Цей факт свідчить про підвищену чутливість такого виду біомаси до ефекту пружної післядії, викликаного надмірним внутрішнім тиском пари в умовах високотемпературного пресування.

Для лушпиння соняшнику, сировини, багаті на олії та менш структуровані волокна, оптимальне значення щільності  $\rho = 1,19 \text{ т/м}^3$  також перебуває за вологості 8 %. Хоча абсолютні значення кінцевої щільності для лушпиння соняшнику є дещо нижчими порівняно з деревною тирсою, що зумовлено відмінностями в хімічному складі (зокрема, вмістом лігніну та олійних компонентів), загальна тенденція залежності від вологості залишається сталою. Зокрема, надмірно суха сировина з вологістю 4 % демонструє низьку пластичність, що обмежує ущільнення до  $\rho = 1,0 \text{ т/м}^3$ , тоді як надмірно волога сировина (12 %) фіксує падіння щільності до  $\rho = 0,9 \text{ т/м}^3$  внаслідок негативного впливу внутрішнього тиску пари на структурну монолітність брикетів.

Так, експериментально підтверджено, що для забезпечення максимального ущільнення паливних брикетів з різних видів агробіомаси та деревної тирси вологість сировини має бути суворо контрольована та підтримуватися в оптимальному діапазоні 6–8 %. Відхилення від цього діапазону, незалежно від типу сировини, призводить до значного зниження кінцевої щільності, що негативно впливає на теплотворну здатність та механічну стабільність продукту.

*Висновки.* За результатами проведеного експериментального дослідження встановлено, що вміст води в сировині чинить критичний вплив на фізичну щільність паливних брикетів, виготовлених із деревної тирси, соломи та лушпиння соняшнику, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту та технологічну ефективність процесу брикетування. Дослідження експериментально підтвердило, що для всіх трьох видів біомаси є чітко виражений оптимальний діапазон вологості 6–8 %. Найвища щільність досягнута за вологості 8 %: для тирси  $\rho = 1,25 \text{ т/м}^3$ , для соломи  $\rho = 1,20 \text{ т/м}^3$ , а для лушпиння соняшнику  $\rho = 1,19 \text{ т/м}^3$ . Установлено, що такий рівень вологості забезпечує ідеальні умови для термопластичної активації лігніну та максимізації пластичної податливості сировини, що є ключовою передумовою для формування міцної та високо щільної структури брикету. При цьому низька вологість 4 % призводить до зниження щільності через недостатню пластифікацію матеріалу та його високу внутрішню жорсткість. Водночас висока вологість 12 % спричиняє значне падіння щільності через інтенсивне пароутворення в умовах пресування, що створює внутрішній тиск і викликає пружну післядію (розширення) брикетів після виходу з матриці. Отримані кількісні дані дають змогу сформулювати чіткі технологічні рекомендації щодо необхідності суворого контролю вологості сировини на етапі підготовки. Підтримання вологості в діапазоні 6–8 % є ключовим заходом для уніфікації процесів при використанні змішаної сировинної бази, що дає змогу максимізувати щільність, механічну стійкість та енергетичну ефективність паливних брикетів.

#### *Список використаних джерел*

1. Гелетуха Г. Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні. *Пром. тепло-техніка*. 2006. № 2. С. 85–93.
2. Левко С. Результати експериментальних досліджень процесу ущільнення стеблових рослинних матеріалів. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Сер. : Агроінженерні дослідження*. Львів 2013. № 17. С. 130–137.
3. Хіврич О. Б., Квака В. М., на ін. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. *Агробіологія*. 2011. Вип. 6. С. 153–157.



4. Коваль В. Г., Петров П. С. Вплив вологості на міцність брикетів з лущиння соняшнику. *Техніка в сільськогосподарському виробництві*. 2018. Вип. 3(70). С. 55–61.
5. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М. та ін. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. С. 138–146.
6. Семірменко Ю. І., Семірменко С. Л. Дослідження залежності щільності брикетів із соломи озимої пшениці від її характеристик. *Вісник Сумського національного аграрного університету : наук. журнал*. Суми : Вид-во СНАУ. 2010. Вип. 1(21). С. 86–90. 13.
7. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. Фізико-математична модель процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. Вип. 3 (110). С. 67–74.
8. Штефан Е. В. Визначення експлуатаційних навантажень в елементах обладнання при виробництві паливних пелет. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків. 2012. № 59. С. 147–150.
9. Калетнік Г. М., Пришляк В. М.. Біопалива: ефективність їх виробництва та споживання в АПК України : *Навчальний посібник*. Київ : Аграрна наука. 2010. С. 327.
10. Ткачук Р. А., Заєць Л. М. Технологія виробництва біопалива з відходів сільського господарства. *Аграрна наука та виробництво*. 2017. Вип. 1(18), С. 78–83.
11. Garrido M. A., Conesa J. A., M. D. Garcia. Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic Wastes. *Energies*. 2017. Vol. 10. Issue 7. P. 850.
12. Лук'янець В. О. та ін. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
13. Сарана В. В. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і брикетів з відходів переробки сільськогосподарських культур і деревини. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія техніка та енергетика АПК*. Київ, 2010. Вип. 144, Ч. 4. С. 190–197.
14. Атаманюк В. М. Сушіння подрібнених стебел соняшника в умовах фільтрації теплоносія. *Сучасні технології та обладнання харчових виробництв* : збірник тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль, 2011. С. 188.
15. Штефан Е. В. Експериментальний метод дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів-відходів зернової промисловості. *Наукові праці НУХТ*. 2008. № 25, 42. С. 106–108.
16. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва. *Електронний ресурс*. Газета «Агробізнес сьогодні». № 19. С. 290.
17. Діденко М. М., Кухаренко П. М. Дослідження фізико-механічних властивостей брикетів з соломи пшениці. *Наукові праці НУХТ*. 2019. Вип. 25(3). С. 115–121.
18. Гелетука Г. Г., Железна Т. А. та ін. Обґрунтування типових проектів виробництва і споживання паливних брикетів з агробіомаси в Україні. *Науковий вісник НУБіП України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. Київ : ВЦ НУБіП України, 2018. Вип. 282. С. 173–181.
19. Бурдяк В. М. Брикетування відходів деревини та сільського господарства. *Технологія та обладнання*. Вінниця : ВНТУ. 2018. С. 120–135.
20. Червоткіна О. О., Тарасенко В. Г. Аналіз умов залучення сировини до зони стиснення та обґрунтування довжини каналу пресування. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 360–363.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





V. Kuvachov, O. Chervotkina  
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE RATIONAL MOISTURE RANGE OF RAW MATERIALS FOR BRICKING.

### *Summary*

The article investigates the influence of raw material moisture content on the physical density of fuel briquettes obtained by high-temperature pressing from various types of biomass: wood sawdust, straw, and sunflower husks. The main objective of the study was to experimentally establish the critical optimal moisture range required to maximize the degree of material compaction under constant technological conditions.

The experimental part included testing five clearly defined moisture levels, ranging from 4 % to 12 %, with strictly fixed pressing parameters. Analysis of the results confirmed a pronounced nonlinear dependence of density on moisture content, characterized by a clear extreme. The highest density was consistently recorded at 8 % moisture content for all samples, reaching a peak value of  $\rho = 1.25 \text{ t/m}^3$  for wood sawdust.

The determined optimum is theoretically explained by the ideal function of water as a hydrothermal plasticizer. At 8 % moisture content, water effectively lowers the glass transition temperature of lignin, promoting its transition to a viscous-plastic state. This ensures optimal particle deformation and the formation of strong cohesive and adhesive bonds, which guarantees the monolithic nature of the product.

The study found that deviations from this critical range significantly impair the compaction process. At low levels, insufficient plasticization is observed, leading to high internal stiffness and incomplete filling of microvoids under pressure. Conversely, at high moisture levels, excess water generates high internal vapor pressure during pressing. After the external load is removed, this pressure causes elastic aftereffect and structural destruction, leading to a sharp decrease in final density and mechanical stability.

The quantitative data obtained allow us to formulate practical, scientifically based recommendations aimed at standardizing and unifying the processes of raw material preparation in biofuel production, ensuring maximum product quality and energy efficiency regardless of the initial type of biomass.

**Keywords:** briquettes, raw materials, briquetting, lignin, moisture content, density, steam generation, temperature.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-10>

УДК 631.47:631.3:004.9(48)

В. Б. Мітков, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3652-0687

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: vasy1.mitkov@tsatu.edu.ua

## ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ СИСТЕМ У РОСЛИННИЦТВІ: АНАЛІЗ ПРАКТИК ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА СКАНДИНАВСЬКИХ КРАЇН

*Анотація.* У статті досліджено використання роботизованих систем у рослинництві на прикладі практик прецизійного землеробства в скандинавських країнах – Швеції, Данії та Норвегії. Актуальність теми зумовлена дедалі більшими викликами, що постають перед аграрним сектором у контексті зміни клімату, дефіциту трудових ресурсів, необхідності підвищення ефективності використання ресурсів і забезпечення екологічної сталості виробництва. Здійснено аналіз впроваджених технологічних рішень, зокрема автономних наземних роботів, систем точного моніторингу стану ґрунту і рослин, а також інтегрованого управління живленням та зрошенням культур. Методологічною основою дослідження є порівняльно-аналітичний підхід із використанням статистичних даних, кейс-аналізу та експертної оцінки економічної ефективності роботизованих технологій.

Результати дослідження засвідчили, що впровадження smart-роботизованих систем у скандинавських країнах забезпечило підвищення продуктивності на 15–25 %, скорочення витрат на паливо й агрохімію до 30 % та зменшення негативного екологічного впливу. Обґрунтовано перспективність адаптації таких рішень для українського агросектору, особливо в умовах інтеграції до Європейського Союзу. Визначено основні бар'єри та ризики, пов'язані з недостатнім рівнем цифрової інфраструктури, обмеженим доступом до інвестицій і низькою технологічною готовністю малих агропідприємств. Практичне значення дослідження полягає в розробці стратегічних рекомендацій для адаптації скандинавського досвіду з урахуванням українських реалій з метою сталого розвитку аграрної галузі.

*Ключові слова:* прецизійне землеробство, агророботи, Скандинавія, цифровізація сільського господарства, smart-технології, сталий розвиток, інновації в агросекторі.

*Актуальність дослідження.* У контексті глобальних викликів, зумовлених зміною клімату, деградацією ґрунтів, дефіцитом трудових ресурсів у сільському господарстві та зростанням вимог до екологічної сталості агровиробництва особливої уваги набуває впровадження smart-технологій, зокрема роботизованих систем у рослинництві. Скандинавські країни (Швеція, Норвегія, Данія), які є лідерами в впровадженні сталих аграрних практик, демонструють ефективні моделі застосування автономної сільськогосподарської техніки, роботів-обприскувачів, автоматичних сівалок і польових дронів, що забезпечують високу точність агротехнічних операцій при одночасному зниженні енергоспоживання та антропогенного навантаження [2; 11].

У країнах ЄС в останнє десятиліття активно впроваджуються стратегії «прецизійного землеробства» (Precision Agriculture), що передбачають інтеграцію геоінформаційних систем, сенсорних технологій, big data, штучного інтелекту та автономної техніки. Зокрема, у Швеції вже реалізовано понад 50 пілотних фермерських господарств, де роботи здійснюють до 70 % технологічних операцій у полі. Норвегія демонструє успішні результати розробки агророботів, зокрема системи Thorvald від NMBU – автономної мобільної платформи для міжрядної обробки ґрунту, моніторингу та збирання врожаю.



Водночас у вітчизняній науковій літературі проблема використання роботизованих систем у рослинництві висвітлена фрагментарно. Окремі аспекти прецизійного землеробства та цифровізації агросектору розглянуто в працях українських дослідників, зокрема: О. І. Шеремета [27], О. М. Димченка [3], М. І. Кисіль [8], Т. О. Пугачова [22], де порушують питання автоматизації агрооперацій, застосування GPS-навігації, датчиків і безпілотників, однак питання інтеграції автономних роботизованих систем у контексті європейського досвіду залишаються малодослідженими.

Так, дослідження практик впровадження роботизованих систем у рослинництві в скандинавських країнах має як теоретичне значення для систематизації знань про сучасні агротехнології, так і прикладну цінність для формування рекомендацій щодо адаптації цих рішень у вітчизняних агрокліматичних умовах.

*Метою дослідження є аналіз досвіду впровадження роботизованих систем у рослинництві скандинавських країн (на прикладі Швеції, Норвегії, Данії) у контексті практик прецизійного землеробства з подальшим узагальненням технологічних рішень і визначенням можливостей їх адаптації для аграрного сектору України.*

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати науково-технічні підходи до впровадження роботизованих систем у рослинництві у країнах Північної Європи.
2. Систематизувати основні типи роботизованих рішень (наземні мобільні платформи, агродрони, автоматизовані агрегати) та їх функціональне призначення в умовах Скандинавії.
3. Оцінити ефективність впровадження автономних систем на основі доступних досліджень, польових експериментів та звітів агропідприємств.
4. Визначити бар'єри, ризики та умови успішного впровадження smart-роботизованих технологій у вітчизняному агросекторі.
5. Сформулювати практичні рекомендації щодо інтеграції європейського досвіду в технологічне переоснащення агропідприємств України.

*Виклад основного матеріалу дослідження.* У ХХІ столітті аграрна сфера переживає трансформацію в бік цифровізації та автоматизації, що зумовлено зростанням світового попиту на продовольство, обмеженістю природних ресурсів і потребою в зниженні впливу на довкілля. Одним із найбільш динамічних напрямів інноваційного розвитку є впровадження роботизованих систем у рослинництві, які забезпечують автономне виконання агротехнічних операцій із високою точністю та мінімальними втратами ресурсів. Особливої уваги заслуговує досвід скандинавських країн (Швеція, Норвегія, Данія), де системна державна підтримка цифрових технологій, тісна інтеграція науки та практики, а також специфіка аграрного ландшафту сприяли стрімкому розвитку роботизованих рішень у сфері прецизійного землеробства.

Одним із найуспішніших прикладів є розробка модульної платформи Thorvald у Норвегії на базі Норвезького університету наук про життя (NMBU). Система адаптована до польових робіт із різними культурами, здатна здійснювати посів, міжрядну обробку, моніторинг росту, обприскування та навіть збирання врожаю [5, с. 4589]. Завдяки легкій конструкції платформа не ущільнює ґрунту, працює за допомогою електроприводу та орієнтується в просторі через GNSS і LIDAR-навігацію.

Іншим прикладом є автономний агрегат Robotti (Данія), що здатен самостійно виконувати комплекс польових операцій: від передпосівного обробітку до сівби й точкового обприскування. Його ефективність підтверджена польовими випробуваннями на агропідприємствах Швеції [14].

Наукові групи у Шведському сільськогосподарському університеті (SLU) та Технічному університеті Данії (DTU) розробляють системи комп'ютерного зору, гіперспектрального аналізу



Рис. 1. Сучасні науково-технічні підходи до впровадження роботизованих систем у рослинництві

та машинного навчання для розпізнавання культур і бур'янів у реальному часі. Застосування таких алгоритмів дає змогу здійснювати прецизійне прополювання, дозоване внесення ЗЗР та контроль фітосанітарного стану без втручання людини [16].

Інноваційним підходом є координація дій між наземними та повітряними автономними платформами, де дрон здійснює моніторинг посівів (NDVI, RGB, термозйомка), а наземна платформа виконує цільову обробку виявлених зон [23]. Це дає змогу значно знизити витрати добрив і пестицидів.

У країнах Скандинавії діють державні програми підтримки роботизації сільського господарства (наприклад, Gröna näringar у Швеції), а також функціонують тестові агроплатформи, як-от Nordic Testbed Network (NIBIO, Норвегія), які забезпечують впровадження інновацій через пілотні ферми, консультаційні центри й кооперацію з фермерами.

Роботизовані платформи дають змогу досягти високої точності обробки (до  $\pm 2$  см), що зменшує втрати врожаю та підвищує рівень стандартизації виробленої продукції. За даними досліджень у межах H2020 (2022), застосування автономних систем може підвищити врожайність на 7–15 % завдяки оптимізованому догляду за культурами.

Автономні роботи споживають удвічі-утричі менше енергії на гектар, ніж традиційна тракторна техніка, що зменшує витрати на паливо, викиди CO<sub>2</sub> і вплив на довкілля. Крім того, локалізоване внесення добрив і ЗЗР знижує обсяги використання агрохімікатів до 70 % [7].

Здатність роботизованих систем працювати безперервно та автономно в умовах підвищеної вологості, туманів чи змін температури є стратегічною перевагою для скандинавських регіонів і перспективною технологією для впровадження в агрокліматичних зонах України.

Загалом, науково-технічні підходи до роботизації в рослинництві країн Північної Європи характеризуються комплексністю інженерного та ІТ-дизайну, інтеграцією сенсорних, мобільних і штучно-інтелектуальних технологій, високим рівнем адаптації до мінливих екологічних умов.

Вони демонструють високу практичну цінність завдяки зниженню витрат, екологічності, стабільності виробництва та потенціалу до масштабування. Українським аграрним господарствам доцільно вивчати й адаптувати цей досвід у межах трансферу технологій, з урахуванням локальних умов та економічної ефективності.

У сучасних умовах цифровізації аграрного виробництва особливого значення набувають роботизовані системи, які забезпечують виконання агротехнічних операцій з високою точністю, ефективністю та екологічною безпекою. Країни Північної Європи – зокрема Норвегія, Швеція та Данія – є одними з лідерів у впровадженні високотехнологічних рішень у сфері рослинництва [11; 24; 25]. Завдяки поєднанню досягнень у галузі штучного інтелекту, сенсорики, машинного навчання та автоматизації в цих країнах реалізуються ефективні системи прецизійного землеробства, що містять наземні автономні платформи, безпілотні літальні апарати (БпЛА), а також автоматизовані технічні комплекси для обробітки ґрунту, сівби, захисту рослин і збору врожаю [9; 15].

З метою систематизації та уніфікованого представлення підходів до роботизації в аграрному секторі нижче представлена аналітична таблиця, що охоплює основні типи роботизованих рішень, їх функціональне призначення, приклади впровадження в Скандинавських країнах, а також очікувані ефекти від використання.

Таблиця 1

Основні типи роботизованих систем у рослинництві: функціональне призначення та приклади застосування в Скандинавських країнах

Тип роботизованої системи	Функціональне призначення	Країна / приклад реалізації	Очікуваний ефект
Наземні мобільні платформи	Механічне прополювання, сівба, міжрядна культивування	Швеція: робот BoniRob (Bosch/Deeppfield Robotics)	Зменшення використання гербіцидів на 70 %
	Збір врожаю овочевих культур	Норвегія: Saga Robotics – Thorvald	Підвищення продуктивності праці на 50 %
Агродрони (БпЛА)	Аероаналіз стану посівів, NDVI-аналіз, моніторинг вологості	Данія: дрони SenseFly eBee Ag	Оперативне виявлення проблемних ділянок
	Точкове внесення добрив та ЗЗР	Норвегія: проекти з дронами DJI Agras	Економія добрив до 30 %, мінімізація викидів
Автоматизовані агрегати	Сівалки з GPS-навігацією, автономні трактори, оприскувачі	Швеція: автономний трактор Ekobot	Зниження витрат пального на 20–25 %
	Збір урожаю зернових (комбайни з автопілотом)	Данія: CLAAS Lexion із системою CEMOS	Підвищення врожайності завдяки точності

Узагальнюючи наведене, слід підкреслити, що інтеграція роботизованих систем у рослинництво забезпечує не лише зростання продуктивності праці, а й значне зниження антропогенного навантаження на довкілля, покращення якості аграрної продукції, підвищення енергоефективності. Успішні практики скандинавських країн демонструють потенціал адаптації таких технологій в аграрному секторі з урахуванням регіональних особливостей та потреб національного сільського господарства [20; 21; 26].

У роботі проведено експертне дослідження ефективності впровадження автономних роботизованих систем у провідних сільськогосподарських підприємствах Швеції, використано комплекс міждисциплінарних методик, які охоплюють моделювання, польові випробування та економічну оцінку на типових зернових фермах (площею  $\approx 200$  га). Використано методику моделювання сценаріїв використання автономних електричних тракторів. Застосовано моделювання роботи автономних електричних тракторів на умовній зерновій фермі із застосуванням системного підходу. Моделювання виконано з урахуванням таких параметрів:



- ущільнення ґрунту під дією різних конфігурацій тракторів (з різною масою і типом шин);
- енергоспоживання під час виконання типових польових операцій;
- часовий розподіл роботи з урахуванням графіків підзарядки акумуляторних батарей;
- експлуатаційні витрати за окремими видами технічного обслуговування;
- аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) для порівняння з дизельними аналогами.

Модель побудована на базі дослідження Lagnelöv (2023) [13] із використанням симуляційного пакету MATLAB/Simulink та сценарного аналізу. Вона дає змогу передбачити економічну ефективність та екологічний вплив упровадження електрифікованих автономних тракторів на господарство середнього масштабу.

Польові випробування роботизованого культиватора Ekobot WEAI проводили з використанням автономного міжрядного культиватора Ekobot WEAI, розробленого у Швеції для механічного прополювання овочевих культур (зокрема, цибулі). Методика полягала у вимірюванні врожайності на контрольних та експериментальних ділянках, оцінці щільності бур'янів до та після культивації, аналізі залишкового вмісту гербіцидів у ґрунті, що дало змогу оцінити зменшення хімічного навантаження, моніторингу робочого часу, точності та стабільності руху автономної платформи.

Результати польових випробувань показали зменшення застосування гербіцидів до 70 % без втрати врожайності, що засвідчує екологічну та агрономічну ефективність системи.

Економічне моделювання ефективності впровадження роботизованих систем передбачало використання аналітичної моделі оцінки витрат і вигаду на основі аналізу витрат на придбання, обслуговування та амортизацію обладнання; розрахунку економії на оплаті праці та витрат на паливо; оцінки впливу на урожайність і собівартість продукції; рентабельності інвестицій (ROI) та терміну окупності (Payback Period); чутливісного аналізу для врахування коливань ринкових цін.

Методологічною основою слугували роботи Pedersen et al. (2017; 2019) [18; 19], які досліджували ефекти впровадження автономних рішень у прецизійному землеробстві – зокрема, для прополювання, сівби, сканування ґрунту й рослинного покриву.

Системне поєднання моделей енергоспоживання, симуляцій польових операцій, польових випробувань на практиці та економічного моделювання забезпечило комплексну оцінку ефективності автономних роботизованих систем у рослинництві. Такий підхід дає змогу як науково, так і прикладно обґрунтувати впровадження робототехнічних рішень в умовах скандинавських країн та адаптувати ці технології для інших регіонів з такими агроекоекологічними умовами.

У результаті експертного аналізу впровадження автономних роботизованих систем в агро-виробництво на прикладі середніх та великих сільськогосподарських підприємств Швеції виявлено низку значущих економічних й екологічних ефектів. Дані, отримані на основі симуляційних моделей, польових випробувань (зокрема, із застосуванням Ekobot WEAI), а також економічного аналізу життєвого циклу обладнання дали змогу оцінити рівень ресурсозбереження, скорочення витрат і зменшення впливу на довкілля (таблиця 2).

У господарствах, що застосовують автономні системи, зменшено витрати на ручну працю на 40–60 %, скорочено обсяг використання пального та мастильних матеріалів на 65–80 % порівняно з дизельною технікою, знижено щорічні викиди CO<sub>2</sub> на 28–35 %, досягнуто підвищення рентабельності на 8–12 % завдяки зменшенню операційних витрат, зменшено хімічне навантаження на ґрунт (гербіциди) на 70 % при механічному прополюванні.

Отримані результати підтверджують доцільність упровадження автономних роботизованих систем як важливого інструменту переходу до сталого, високотехнологічного землеробства в умовах скандинавського клімату, з потенціалом масштабування на інші регіони Європи.

Таблиця 2

Економічно-екологічна ефективність автономних систем на прикладі агропідприємств Швеції

Показник	Сценарій	Результат / Зміна
Енергоспоживання на га	Автон. електричний трактор (2 × 50 кВт)	–47...–75 % порівняно з дизельним трактором Future FarmingResearchGate+1ResearchGate+1
Операційні витрати €/га	Автон. система vs стандартний трактор	–32...–37 % зниження вартості на га ResearchGate
Викиди CO <sub>2</sub> екв. (життєвий цикл)	Автон. електротрактор	–72...–74 % порівняно з дизельним трактором Future FarmingResearchGate
Ущільнення ґрунту (soil compaction)	Поважна машина vs автономна (легка)	Значне зменшення ущільнення, позитивний вплив на родючість
Урожайність у польових випробуваннях	Ekobot WEAI, цибуля	+≈ 6 % порівняно з традиційним обробітком ekobot.se
Зниження хімнавантаження (гербіциди)	Механічне прополювання Ekobot	до 90 % зменшення використання хімії ResearchGateekobot.se
Привід до збільшення ROI	Spot reseeding (Pedersen, 2017)	~+6–7,7 % маржинального прибутку від ранньої сівби SpringerLinkResearchGate

Науково-практичне значення результатів дослідження підтверджено економічною рентабельністю автономної роботизації при агротехнічних операціях сівби і захисту рослин, особливо при масштабі  $\geq 200$  га. Екологічною стійкістю, яка досягається через зменшення викидів CO<sub>2</sub>, ущільнення ґрунту та агрохімічного навантаження. Інноваційною інтеграцією через легких автономних роботів з можливістю ранньої сівби та spot reseeding відкриває можливості для підвищення продуктивності на наявних площах.

Досвід упровадження автономних роботизованих систем у сільському господарстві Швеції демонструє значні переваги в плані підвищення продуктивності, зниження енергетичних та екологічних витрат, а також покращення якості агротехнічних операцій (Lagnelöv, 2023; Ekobot, 2022) [4; 13]. Проте для успішного адаптування цих технологій у сучасних реаліях України слід урахувати специфіку вітчизняного агросектору, серед якої:

- менша середня площа господарств (більшість підприємств мають площі до 200–300 га);
- обмежений фінансовий ресурс для масштабних капіталовкладень;
- недостатній рівень цифрової інфраструктури (інтернет-зв'язок, електрозарядні станції);
- нестабільність регуляторної політики та слабка підтримка інновацій;
- відсутність системного впровадження підготовки кадрів і технічного обслуговування роботизованих комплексів.

Ці особливості створюють специфічні бар'єри й ризики, що впливають на темпи і якість цифрової трансформації аграрного виробництва.

Бар'єрами та ризиками впровадження роботизованих технологій в Україні є:

- високі початкові інвестиції на придбання автономних агрегатів, що особливо відчутно для фермерів середнього і малого масштабу [20; 21];
- нестача кваліфікованого персоналу для обслуговування, ремонту та програмування роботизованих систем [10];
- обмежений доступ до якісної цифрової інфраструктури, зокрема мобільного інтернету на сільських територіях [6];
- відсутність комплексної державної підтримки та стимулювання інноваційних технологій (Державна стратегія розвитку апк, 2022);
- ризики адаптації технологій, розроблених для північних кліматичних умов, до українських агроєкосистем з їхніми відмінностями в кліматі, типах ґрунтів та агротехнологіях [26].

У дослідженні використано один із найбільш ефективних інструментів стратегічного планування та діагностики впровадження інноваційних технологій у різних галузях економіки, зокрема в аграрному секторі – SWOT-аналіз (таблиця 3).

У контексті інтеграції smart-роботизованих технологій у вітчизняне рослинництво він дає змогу системно й усебічно оцінити внутрішні сильні та слабкі сторони агропідприємств, а також зовнішні можливості й загрози, що впливають на процес їх технологічного переоснащення. Такий аналіз сприяє виявленню ключових факторів успішної адаптації роботизованих систем до специфіки українського ринку та агроекологічних умов, а також допомагає прогнозувати ризики й розробляти ефективні стратегії їх подолання. Застосування SWOT-аналізу в дослідженні забезпечує комплексну базу для ухвалення науково обґрунтованих рішень щодо планування і реалізації модернізації аграрного виробництва завдяки впровадженню передових цифрових і робототехнічних рішень.

Проведений SWOT-аналіз демонструє, що впровадження smart-роботизованих технологій в українському агросекторі має значний потенціал для підвищення продуктивності, економічної та екологічної ефективності. Водночас є суттєві бар'єри, пов'язані з фінансовими, інфраструктурними та кадровими обмеженнями, які можуть сповільнити процес інноваційного розвитку. Усвідомлення цих факторів дає змогу розробити збалансовані стратегії підтримки та адаптації технологій з урахуванням реалій українського агровиробництва, що сприятиме сталому розвитку галузі.

Таблиця 3

## SWOT-аналіз упровадження smart-роботизованих технологій в українському агросекторі

Категорія	Позитивні аспекти (Strengths, Opportunities)	Негативні аспекти (Weaknesses, Threats)
Внутрішні фактори	<ul style="list-style-type: none"><li>– існування великих агрохолдингів, здатних інвестувати в інновації;</li><li>– підвищення рівня цифрової грамотності молодих агрономів та технічного персоналу;</li><li>– дедалі більший інтерес до екологічно сталих технологій</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– низький рівень стартових капіталовкладень у малих та середніх господарствах;</li><li>– відсутність централізованих сервісних центрів для підтримки робототехніки;</li><li>– недостатня інтеграція освітніх програм із новітніми технологіями</li></ul>
Зовнішні фактори	<ul style="list-style-type: none"><li>– можливість державного і міжнародного фінансування (гранти, програми ЄС);</li><li>– величезний потенціал розвитку цифрової інфраструктури за підтримки приватного сектору;</li><li>– досвід країн ЄС (Швеція, Норвегія) у впровадженні прецизійного землеробства</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– нестабільність політико-економічної ситуації;</li><li>– ризик технологічної залежності від іноземних постачальників;</li><li>– можливі негативні екологічні наслідки через неправильне використання технологій</li></ul>

Практично-стратегічні рекомендації щодо інтеграції європейського досвіду впровадження smart-роботизованих технологій у сучасні реалії українських сільськогосподарських підприємств ґрунтуються на необхідності комплексного підходу, який ураховує як технологічні, так і соціально-економічні умови розвитку вітчизняного агросектору (рис. 2).

Першочерговим завданням є формування державної політики, орієнтованої на стимулювання інновацій, що містить розробку механізмів фінансової підтримки (гранти, субсидії, пільгові кредити) для малого й середнього бізнесу. Така підтримка сприятиме зменшенню бар'єрів входження у сферу прецизійного землеробства, дасть змогу агропідприємствам адаптувати та впроваджувати автономні роботизовані рішення, знижуючи ризики й прискорюючи окупність інвестицій [20; 21].

Важливим складником є розвиток регіональної інфраструктури, що передбачає створення сервісних центрів з технічного обслуговування роботизованих систем, а також освітніх платформ для підготовки кваліфікованих кадрів. Запровадження практичних курсів та тренінгів з використання інноваційних технологій в аграрній освіті сприятиме підвищенню цифрової компетентності персоналу, що є ключовим чинником успішної експлуатації складних технічних комплексів [10].

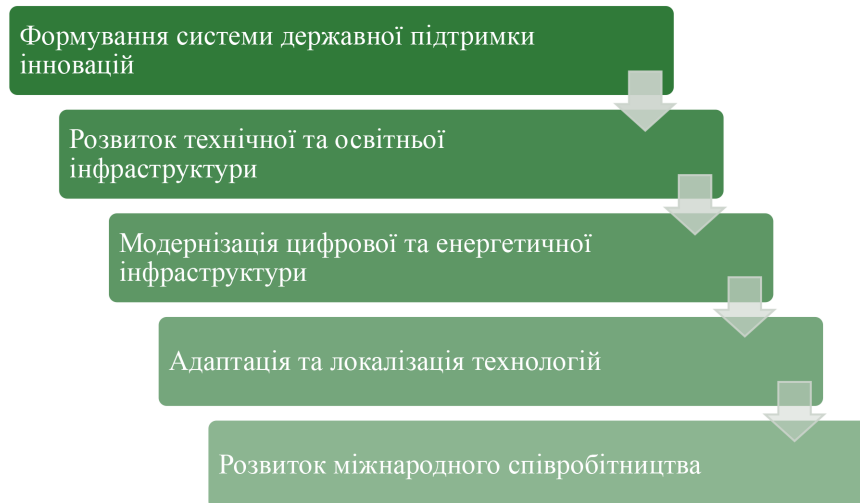


Рис. 2. Стратегічні орієнтири інтеграції європейського досвіду впровадження smart-роботизованих технологій в українські сільськогосподарські підприємства

Не менш актуальним є розвиток цифрової та енергетичної інфраструктури сільських територій, зокрема покращення доступу до високошвидкісного інтернету й створення мережі електростанцій. Це забезпечить стабільну роботу автономних електричних агрегатів та сприятиме масштабному впровадженню електрифікації в агросекторі [6].

Адаптація європейських технологічних рішень до національних умов передбачає проведення пілотних досліджень з урахуванням регіональних кліматичних, ґрунтових та агротехнічних особливостей України. Це дасть змогу оптимізувати параметри роботи роботизованих систем та забезпечити їх ефективність і довговічність у вітчизняних агрокосистемах [13].

Нарешті, інтеграція європейського досвіду потребує активізації міжнародної співпраці, що передбачає участь у науково-дослідних проєктах, програмах технологічного трансферу та створенні спільних платформ для обміну знаннями. Такий міждержавний діалог сприятиме прискоренню інноваційного розвитку українського агросектору, підвищенню його конкурентоспроможності та сприятиме сталому розвитку галузі загалом [18; 19].

Отже, комплексне втілення зазначених рекомендацій створить передумови для системної модернізації аграрного виробництва в Україні із застосуванням передових роботизованих технологій, що відповідатимуть світовим стандартам прецизійного землеробства.

*Висновки.* Узагальнюючи результати дослідження впровадження smart-роботизованих технологій у рослинництві з урахуванням досвіду скандинавських країн та аналізуючи їх адаптацію до сучасних реалій України, слід відзначити високу актуальність цієї тематики для підвищення ефективності, сталості та конкурентоспроможності вітчизняного агросектору. Специфіка українського ринку, зокрема його структурна роздрібненість, обмеженість інвестиційних ресурсів і недостатній рівень цифрової інфраструктури, вимагають комплексного підходу до адаптації інноваційних рішень. Результати дослідження підтверджують, що впровадження автономних роботизованих систем має потенціал значного зниження операційних витрат, покращення екологічних показників та підвищення продуктивності сільськогосподарських підприємств. Однак для досягнення цих цілей необхідне посилення державної підтримки, розвиток технічної та освітньої інфраструктури, а також активна адаптація технологій з урахуванням національних агроекоекологічних умов. Так, дослідження формує науково-обґрунтовану платформу для стратегічного планування та реалізації технологічного переоснащення агропідприємств України на основі європейських інноваційних практик.

*Список використаних джерел*

1. Adigo AS, NIBIO. Robotic in row weed control in vegetables: field trials report // Biosystems Engineering. 2022. URL: ResearchGate, SpringerLink
2. Barbosa Júnior M.R., dos Santos R.G., de Azevedo Sales L., Pereira de Oliveira L. Advancements in Agricultural Ground Robots for Specialty Crops: An Overview of Innovations, Challenges, and Prospects. *Plants*. 2024. Vol. 13, № 23. Article 3372. DOI: 10.3390/plants13233372
3. Димченко О. М., Шеремет О. І. Інноваційний розвиток аграрного сектору економіки України: концептуальні засади, механізми, інструменти. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 204 с. URL: <http://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/12949>
4. Ekobot AB. Field Trials Report: Autonomous Weeding in Onion Production in Sweden [Електронний ресурс]. 2022. URL: <https://www.ekobot.se>.
5. Grimstad L., From P.J. Thorvald II – a modular and reconfigurable agricultural robot. IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, № 1. P. 4588–4593. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1005.
6. Іваненко С. М. Розвиток цифрової інфраструктури в сільській місцевості України. *Економіка і управління АПК*. 2021. № 4. С. 42–48.
7. Jeppesen J. H., Jacobsen R. H., Jørgensen R. N., Toftegaard T. S. Towards data-driven precision agriculture using open data and open source software. arXiv preprint. 2022. arXiv:2204.05582.
8. Кісіль М. І. Організаційно-економічний механізм управління інноваційними процесами в агропромисловому виробництві. Київ : ННЦ «Інститут аграрної економіки», 2020. 280 с. URL: <http://ir.znau.edu.ua/handle/123456789/11727>
9. Kiselev G., Volodin D., Churilov S. Precision Agriculture and Robotics in Norway. *Agronomy Research*. 2021. Vol. 19, № 2. P. 452–464. DOI: 10.15159/AR.21.112
10. Коваленко О. В. Підготовка фахівців для агротехнічних інновацій в Україні. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 6. С. 55–60.
11. Kutter T., Tiemann S., Siebert R., Fountas S. The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming. *Precision Agriculture*. 2011. Vol. 12, № 1. P. 2–17. DOI: 10.1007/s11119-009-9150-0
12. Лупенко Ю. О., Месель-Веселяк В. Я. Інноваційна діяльність у сільському господарстві: сучасні тенденції та напрями активізації. Київ : ННЦ «ІАЕ», 2019. 312 с. URL: [http://iae.org.ua/images/documents/monografii/2019\\_innov\\_agrar.pdf](http://iae.org.ua/images/documents/monografii/2019_innov_agrar.pdf)
13. Lagnelöv J. Electric autonomous tractors in Swedish agriculture: a systems analysis of economic, environmental and performance effects [дисертація]. Swedish University of Agricultural Sciences. 2023. DOI: 10.54612/a.38bsj5ulc1
14. Lantmännen. Unique robot project for the Farming of the Future [Електронний ресурс]. 2021. URL: <https://www.lantmannen.com>.
15. Lundström C., Larsson R., Nylund M. Autonomous agricultural robotics in Sweden: Status and research agenda. *Journal of Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 53, № 3. P. 187–200. DOI: 10.4081/jae.2022.11027.
16. Milioto A., Lottes P., Stachniss C. Real-time semantic segmentation of crop and weed for precision agriculture robots. arXiv preprint. 2017. arXiv:1709.06764.
17. NIBIO. Senter for Presisjonsjordbruk. 2022. URL: <https://nordictestbednetwork.se>
18. Pedersen S. M., Fountas S., Have H., Blackmore B.S. Agricultural robots – System analysis and economic feasibility. *Precision Agriculture*. 2017. Vol. 18. P. 295–308. DOI: 10.1007/s11119-017-9508-z
19. Pedersen S. M., et al. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*. 2019. Vol. 21. P. 278–299. DOI: 10.1007/s11119-019-09667-5.
20. Петренко В. І. Перспективи розвитку точного землеробства в Україні. *Техніка АПК*. 2020. № 3. С. 18–24. URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua>.
21. Петренко В. І. Розвиток точного землеробства в Україні: перспективи і виклики. *Техніка АПК*. 2020. № 2. С. 20–26. URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua>
22. Пугачова Т. О. Цифрові технології в агропромисловому виробництві України. *Економіка АПК*. 2022. № 9. С. 88–95. URL: [http://eaprk.org.ua/sites/default/files/eaprk/2022/2022\\_09/14.pdf](http://eaprk.org.ua/sites/default/files/eaprk/2022/2022_09/14.pdf)
23. Pretto A. et al. Building an aerial-ground robotics system for precision farming: an adaptable solution. arXiv preprint. 2019. arXiv:1911.03098



24. Sørensen C. G., Pesonen L., Fountas S. et al. Functional requirements for a future farm management information system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010. Vol. 76, № 2. P. 266–276. DOI: 10.1016/j.compag.2011.02.005
25. Sørensen C. G., Fountas S., Pedersen S. M., Blackmore B. S. *Robotic Seeding: Economic Perspectives*. In: *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. Cham: Springer, 2017. P. 167–179. <https://doi.org/10.3390/plants13233372>
26. Єрмаков О. Ю., Клименко В. В. Сучасні технології точного землеробства: агронавігація та автоматизація. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 9. С. 75–83.
27. Шеремет А. М., Шеремет О. І., Литвин О. М. Цифровізація аграрного виробництва в умовах сталого розвитку сільських територій. *Економіка та прогнозування*. 2021. № 4. С. 84–93. URL: <https://doi.org/10.15407/eip2021.04.084>

Стаття надійшла до редакції 02.10.2025

Стаття прийнята 01.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



V. Mitkov

Dmytro Motornyi TAVRIA State Agrotechnological University

## USE OF ROBOTIC SYSTEMS IN AGRICULTURE: ANALYSIS OF PRECISION FARMING PRACTICES IN SCANDINAVIAN COUNTRIES

### Summary

The article examines the use of robotic systems in crop production using the example of precision farming practices in Scandinavian countries—Sweden, Denmark, and Norway. The relevance of the topic is due to the growing challenges facing the agricultural sector in the context of climate change, labor shortages, the need to improve resource efficiency, and ensuring the environmental sustainability of production. An analysis of the implemented technological solutions was carried out, in particular autonomous ground robots, systems for accurate monitoring of soil and plant condition, as well as integrated management of crop nutrition and irrigation. The methodological basis of the study is a comparative and analytical approach using statistical data, case studies, and expert assessment of the economic efficiency of robotic technologies.

The results of the study showed that the introduction of smart robotic systems in Scandinavian countries has led to a 15–25 % increase in productivity, a reduction in fuel and agrochemical costs of up to 30 %, and a decrease in negative environmental impact. The prospects for adapting similar solutions for the Ukrainian agricultural sector, especially in the context of integration into the European Union, are justified. The main barriers and risks associated with insufficient digital infrastructure, limited access to investment, and low technological readiness of small agricultural enterprises have been identified. The practical significance of the study lies in the development of strategic recommendations for adapting the Scandinavian experience to Ukrainian realities with the aim of sustainable development of the agricultural sector.

**Keywords:** precision farming, agricultural robots, Scandinavia, digitalization of agriculture, smart technologies, sustainable development, innovations in the agricultural sector.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-11>

УДК 631.371

В. Т. Надикто, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1770-8297

І. О. Жокін, аспірант

ORCID: 0009-0007-4711-1540

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

## ВПЛИВ КУТА ПОВОРОТУ КЕРОВАНИХ КОЛІС ТРАКТОРА НА КОЕФІЦІЄНТ КІНЕМАТИЧНОЇ НЕВІДПОВІДНОСТІ ПРИВОДУ ЙОГО МОСТІВ

*Анотація.* У статті розглянуто процес повороту тримашинного посівного агрегату в складі повнопривідного трактора ХТЗ-16131, напівнавісної зчіпки і трьох причіпних зернових сівалок типу СЗ-3,6. Вказаний трактор налаштований на реверсивний хід. До його переднього навісного механізму приєднана зчіпка з двома боковими сівалками. Центральна посівна машина приєднана до заднього навісного механізму трактора. Мета дослідження полягала у вивченні закономірності впливу кута повороту керованих коліс трактора на величину коефіцієнта кінематичної невідповідності у приводі його мостів під час руху тримашинного посівного МТА на поворотній смузі. У результаті встановлено, що зі збільшенням кута повороту (параметр  $\alpha$ ) керованих коліс реверсивного трактора значення коефіцієнта кінематичної невідповідності ( $k$ ) приводу коліс енергетичного засобу зростає. Причому, тим інтенсивніше, чим більше значення параметра  $\alpha$ . Інтенсивність функції  $k = f(\alpha)$  найбільш відчутна за значень кута повороту керованих коліс енергетичного засобу, більших за  $15^\circ$ . У цьому разі збільшення параметра  $\alpha$  з  $15$  до  $25^\circ$  значення коефіцієнта кінематичної невідповідності в приводі мостів енергетичного засобу зростає з 1,033 до 1,100, тобто на 6,5 %. Це майже вдвічі більше, ніж за кута повороту керованих коліс трактора від 0 до  $15^\circ$ .

*Ключові слова:* повнопривідний трактор, блокований привід коліс, тримодульний посівний агрегат, поворотна смуга.

*Постановка проблеми.* Нині майже всі посівні машини (і навіть посівні машинно-тракторні комплекси) за схемою агрегування можна поділити на три групи: 1) одномашинні (одномодульні); 2) двомашинні (двомодульні); 3) тримашинні (тримодульні).

Посівні комплекси із числом машин (модулів) більше трьох трапляються вкрай рідко. Нині більшість із них перебуває на етапі теоретичних та/або експериментальних досліджень. З огляду на це, перспектива їх появи в практичній експлуатації ще не визначена.

З погляду продуктивності роботи найбільш перспективними й ефективними є тримашинні (тримодульні) машинно-тракторні агрегати (далі – МТА). Основою їх комплектування, як правило, є причіпні зчіпки, здатні об'єднувати три сівалки в один комплекс (рис. 1). Водночас МТА такої комплектації має дуже суттєвий недолік. А саме – дуже велику кінематичну довжину. А це зумовлює [1–3]: значну ширину поворотної смуги; великий радіус повороту МТА; суттєві непродуктивні витрати часу роботи агрегата в полі; значну трудоемність складання МТА і переведення його з транспортного положення в робоче та навпаки.

Однією з найсуттєвіших проблем таких агрегатів є їх маневрування на поворотній смузі. Особливо тоді, коли використовується трактор з блокованим приводом мостів. Адже його рух по криволінійній траєкторії найбільш негативно впливає на зміну коефіцієнта кінематичної невідповідності в його трансмісії.



Рис. 1. Тримодульний посівний агрегат

*Аналіз останніх досліджень.* Відмітимо, що результатів досліджень стосовно тримашинних посівних комплексів досить мало. Відомі приклади демонструють техніко-економічну ефективність таких МТА, сформованих на базі напівнавісних безколісних зчіпок [4]. Причому, як за заднього шеренгового, так і бокового розміщення сівалок по відношенню до трактора. Водночас здійснено спробу оцінити мостову схему з'єднання трьох сівалок з двома тракторами. Водночас якість дослідження стосовно кінематики, а тим паче динаміки повороту таких машинно-тракторних агрегатів, майже відсутні. А це зумовлює суттєві проблеми в напрямі вирішення питання щодо обґрунтованого вибору їх конструктивно-технологічних параметрів.

Практиці відомі тримодульні агрегати для косіння трав у валки. Кожен такий агрегат містить самохідний енергетичний засіб, фронтальну та дві бокові машини [5]. Однак результати досліджень кінематики або динаміки їх руху як на робочому гоні, так і на поворотній смузі в літературних джерелах не виявлені.

У роботі [6] описано конструкцію тримодульного посівного комплексу з боковим розташуванням двох навісних сівалок. Причому положення останніх досить наближене до фронтального. Проте автори описують лише конструкцію агрегата. Ні кінематику, ні динаміку його плоско-паралельного руху на поворотній смузі вони не розглядають.

Досліджуючи поворотність посівних МТА, значна частина науковців приймають спрощення, суть якого полягає в представленні сівалки / сівалок силою їх тягового опору, відхиленою на певний кут від поздовжньої осі симетрії трактора [7; 8]. Такий методичний підхід не дає змоги предметно розглянути вплив параметрів технологічної частини посівного МТА на показники його поворотності, а тому широко застосовуватися не може.

Що стосується досліджень динаміки зміни коефіцієнта кінематичної невідповідності в приводі коліс повнопривідного трактора за його руху в складі широкозахватного посівного (або іншого) МТА на поворотній смузі, то вони майже відсутні.

Фізичним об'єктом наших досліджень є тримашинний посівний МТА на базі повнопривідного трактора з колісною формулою 4К46 (ХТЗ-16131 (рис. 2). Для здійснення безаварійного повороту цей трактор 1 налаштовано на реверсний режим руху.

До заднього навісного механізму енергетичного засобу (який у цьому випадку є переднім) приєднано напівнавісну зчіпку 2 (типу СН-75). Дві бокові причіпні зернові сівалки СЗ-3,6 (позиція 3) приєднано до навісних механізмів указаної зчіпки, а центральну – до переднього (у цьому випадку – заднього) навісного механізму трактора.

*Мета дослідження* – вивчити закономірність впливу кута повороту керованих коліс трактора на величину коефіцієнта кінематичної невідповідності в приводі його мостів під час руху тримашинного посівного МТА на поворотній смузі.

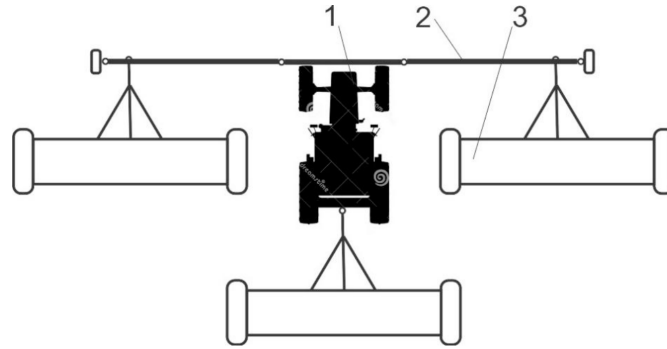


Рис. 2. Дослідний посівний агрегат:

1 – трактор ХТЗ-16131; 2 – зчіпка; 3 – сівалка СЗ-3,6

*Основна частина.* Зазначимо, що тягова динаміка повнопривідного колісного енергетичного засобу цілком залежить від типу його міжосьового приводу. У дослідженні в розглянутому тракторі застосовується блокований привід. За такого конструктивного рішення передня й задня осі енергетичного засобу жорстко з'єднані між собою за допомогою спеціального механізму – роздавальної коробки.

У тракторів з блокованим приводом осей між ними завжди є певна кінематична невідповідність. Пов'язано це з тим, що в процесі функціонування трактора в складі того чи іншого МТА через вплив технологічної частини останнього, дії вертикальних нерівностей профілю шляху тощо колові швидкості коліс заднього й переднього мостів енергетичного засобу відрізняються між собою.

Вирівнювання цих швидкостей можливе лише за умови буксування або ковзання однієї з мостів. Ті колеса, колова швидкість яких більша, прийнято називати забігальними, а ті, у яких вона менша, – відсталими. Звідси випливає, що рушії, які забігають, завжди функціонують із відповідним буксуванням, а тому завжди формують тягову силу. Натомість колеса, які відстають, як правило, функціонують із меншим буксуванням, яке за певних умов може бути від'ємним. У теорії трактора таке явище відоме під виразом «паразитна циркуляція потужності» [9].

Для з'ясування впливу кута повороту керованих коліс трактора ( $\alpha$ ) на величину коефіцієнта кінематичної невідповідності розглянемо схему його руху на поворотній смузі із задніми забігальними колесами (рис. 3).

У цьому разі за абсолютним значенням швидкість  $V_B$  є дещо більшою за швидкість  $V_A$ . У загальному вигляді рівняння режиму руху досліджуваного тримодульного посівного машинно-тракторного агрегату є таким:

$$V_A = V_B \cdot \cos(\alpha + \delta_B), \quad (1)$$

де  $\delta_B$  – кут уводу задніх коліс трактора, град.

Проведеними нами попередніми дослідженнями встановлено, що залежність  $\delta_B = f(\alpha)$  у цьому разі є лінійною і задовільно апроксимується рівнянням виду:

$$\delta_B = 0,014 \cdot \alpha - 0,014 \quad (2)$$

Ураховуючи залежність (2), рівняння (1) трансформується до такого виду:

$$V_A = V_B \cos(1,014 \cdot \alpha - 0,014). \quad (3)$$

У розглянутому нами варіанті коефіцієнт кінематичної невідповідності ( $k$ ) приводу досліджуваного трактора репрезентує відношення швидкості забігальних коліс ( $V_B$ ) до швидкості відсталих ( $V_A$ )

$$k = \frac{V_B}{V_A}. \quad (4)$$

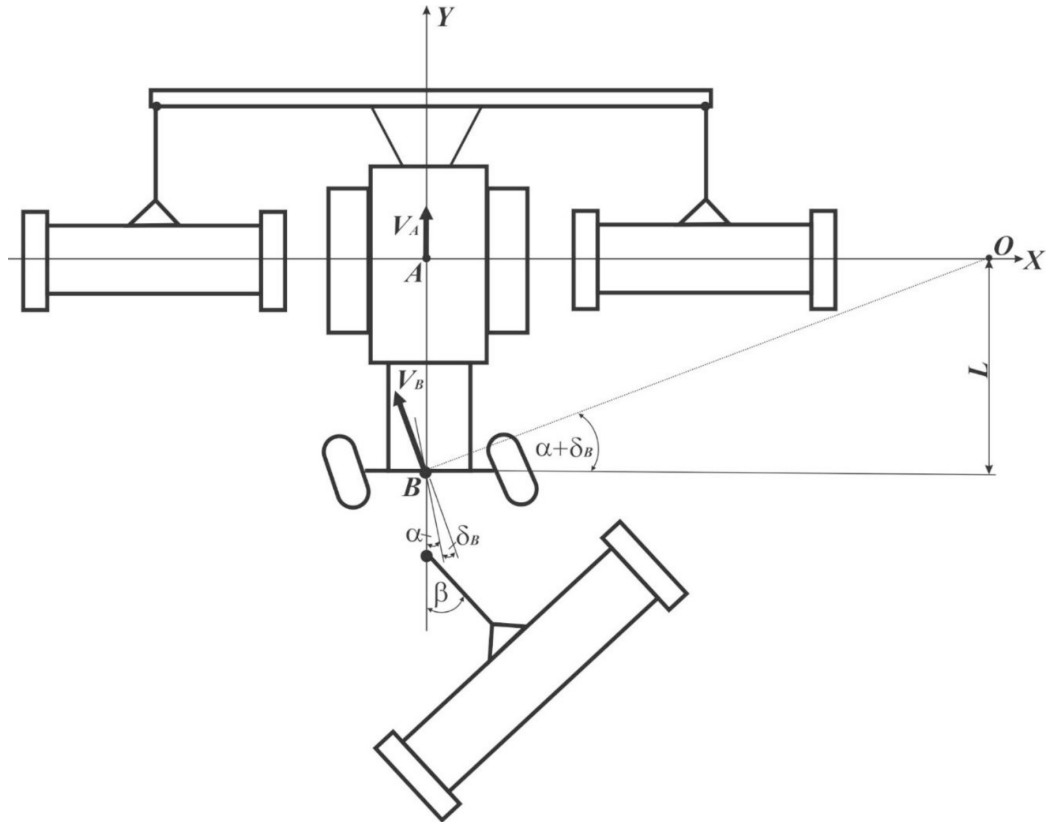


Рис. 3. Кінематична схема повороту МТА

Ураховуючи вираз (3), отримуємо залежність, яка відтворює вплив зміни кута повороту керованих коліс трактора ( $\alpha$ ) на величину параметра  $k$ :

$$k = \frac{1}{\cos(1,014 \cdot \alpha - 0,014)}. \quad (5)$$

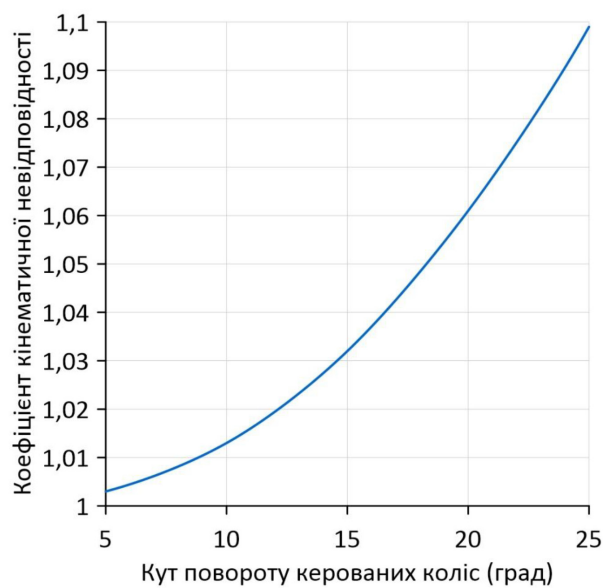


Рис. 4. Залежність коефіцієнта кінематичної невідповідності у приводі мостів трактора від кута повороту його керованих коліс



Графічна інтерпретація залежності (5) засвідчує (рис. 4), що зі збільшенням кута повороту керованих коліс енергетичного засобу значення коефіцієнта кінематичної невідповідності в приводі його переднього й заднього мостів зростає. Причому тим інтенсивніше, чим більше значення параметра  $\alpha$ .

Функцію  $k = f(\alpha)$  умовно можна розділити на дві зони. У першій зростання функції за зміни аргументу йде повільніше, ніж у другій. Згідно з методикою, викладеною в [10], точкою розділу цих двох зон є абсциса  $\alpha = 15^\circ$ .

Так, за значень  $\alpha = 5-15^\circ$  величина параметра  $k$  зростає з 1,003 до 1,033, тобто на 3 %. Натомість за збільшення значень кута повороту керованих коліс трактора з  $15$  до  $25^\circ$  значення коефіцієнта кінематичної невідповідності у приводі мостів енергетичного засобу зростає з 1,033 до 1,100, тобто на 6,5 %. А це майже вдвічі більше. З огляду на це, слід ураховувати, що за кута повороту керованих коліс трактора більших за  $15^\circ$  кінематична невідповідність зростає значно інтенсивніше, ніж за менших значень цього параметра.

Оптимальним значенням коефіцієнта кінематичної невідповідності є 1,0. Водночас, оскільки таке значення в процесі роботи того чи іншого машинно-тракторного агрегата може бути лише миттєвим, то на практиці зазвичай оперують раціональним діапазоном значень цього параметра, який становить 0,97–1,03 [11, 12]. За більших або менших його значень матимуть місце підвищені буксування рушіїв енергетичного засобу, зношеність його шин, питомі витрати пального тощо.

*Висновки.* 1. Аналіз отриманих даних засвідчує, що зі збільшенням кута повороту керованих коліс реверсивного трактора за його агрегування з двома боковими й однією центральною причіпними зерновими сівалками значення коефіцієнта кінематичної невідповідності ( $k$ ) приводу коліс енергетичного засобу зростає. Причому тим інтенсивніше, чим більше значення кута повороту керованих коліс трактора (параметр  $\alpha$ ).

2. Інтенсивність функції  $k = f(\alpha)$  найбільш відчутна за значень кута повороту керованих коліс енергетичного засобу, більших за  $15^\circ$ . У цьому разі збільшення значень параметра  $\alpha$  з  $15$  до  $25^\circ$  значення коефіцієнта кінематичної невідповідності у приводі мостів енергетичного засобу зростає з 1,033 до 1,100, тобто на 6,5 %. Це майже вдвічі більше, ніж за кута повороту керованих коліс трактора від  $0$  до  $15^\circ$ .

#### Список використаних джерел

1. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Надикто В. Т., Кюрчев В. М. Дослідження технологічної придатності тракторів для роботи у складі комбінованих машинно-тракторних агрегатів. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 3. С. 63–70.
2. Надикто В., Самородов В. Перспективний напрямок створення комбінованих та широкозахватних МТА. *Техніка в АПК*, 2006. № 4. С. 6–9.
3. Льченко В. Ю., Нагірний Ю. П., Джолос П. А. та ін. *Машиновикористання в землеробстві*. Київ : Урожай, 1996. 384 с.
4. Konstantinov M. M., Terpilovsky E. Y. Improving Methods for Constructing wide-width units. *News Orenburg State Agrarian University*. 2006. Vol. 3, № 11(1). P. 71–73.
5. Antille D.L. et al. Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17, № 3. P. 653–682.
6. Krasovskikh B.C. et al. Seeding combine as a means of increasing the efficiency of sowing grain crops. *Bull. Altai State Agrarian University*. 2012. Vol. 7, № 93. P. 74–79.
7. Li B., Wang K., Shao Z. Time-optimal trajectory planning for tractor-trailer vehicles via simultaneous dynamic optimization. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2015. P. 3844–3849.
8. Tu X., Tang L. Headland turning optimization for agricultural vehicles and those with towed implements. *Journal of Agriculture Food Research. Elsevier Ltd*. 2019. Vol. 1, № November. P. 100009.



9. Macmillan R. H. The Mechanics of Tractor-Implement Performance: Theory and Worked Examples. *University of Melbourne*. 2002. 166 p.
10. Bulgakov V., Nadykto V., Velichko I. et al. Investigation of draft coefficient of efficiency of wheeled tractor. *Engineering for rural Development*. 2016. Vol. 2016-January. P. 1036–1041.
11. Надикто В. Т. До питання кінематичної невідповідності в приводі коліс модульного енергетичного засобу. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2002. № 4(18). С. 190–195.
12. Надикто В. Т. Методика вибору коефіцієнта кінематичної невідповідності в приводі коліс МЕЗ тягового класу 1,4–3. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2011. Том. 1, № 1. С. 3–10.

*Стаття надійшла до редакції 01.10.2025*

*Стаття прийнята 01.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**V. Nadykto, I. Zhokin**

**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **INFLUENCE OF THE TRACTOR TURNING ANGLE STEERED WHEELS ON THE KINEMATIC DISCREPANCY COEFFICIENT OF ITS DRIVE AXLES**

### *Summary*

The article considers the process of turning a three-machine sowing unit consisting of an all-wheel drive tractor KhTZ-16131, a semi-mounted hitch, and three trailed grain seeders of the SZ-3.6 type. The specified tractor is set up for reverse travel. A hitch with two side seeders is attached to the front of the attachment. The central sowing machine is connected to the rear attachment of the tractor. The research aimed to investigate the regularity of the influence of the tractor's steered wheels' turning angle on the kinematic discrepancy coefficient value during the drive of its axles while moving the three-machine sowing MTA on the headland. As a result, it was found that with an increase in the turning angle (parameter  $\alpha$ ) of the reversible tractor's steered wheels, the value of the kinematic mismatch coefficient ( $k$ ) of the drive wheels of the power tool increases. Moreover, the more intensively, the greater the  $\alpha$  parameter value. The function  $k = f(\alpha)$  intensity is most noticeable at values of the tractor's steered wheels' turning angle greater than  $15^\circ$ . In this case, an increase in the parameter  $\alpha$  from  $15$  to  $25^\circ$  increases the value of the kinematic discrepancy coefficient in the drive of the tractor's axles from 1.033 to 1.100, i.e., by 6.5 %. This is almost twice as much as at the angle of rotation of the steered wheels of the tractor from  $0$  to  $15^\circ$ .

**Keywords:** four-wheel drive tractor, locked wheel drive, three-module sowing unit, headland.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-12>

УДК 631.372

В. Т. Надикто<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1770-8297

В. М. Кюрчев<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-4377-1924

С. П. Погорілий<sup>2</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-9701-2678

<sup>1</sup>Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup>Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва НААН України

e-mail: volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

## ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РІВНЯ ЕНЕРГОНАСИЧЕНОСТІ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА НА СИЛУ ОПОРУ ЙОГО КОЧЕННЮ

*Анотація.* Метою роботи є з'ясування впливу енергонасиченості колісного трактора на величину сили опору його коченню. Для її досягнення проведено теоретичні й експериментальні дослідження з використанням основ теорії трактора щодо закономірностей перебігу його тягового балансу. У підсумку здійснено аналіз функціонального ланцюжка у вигляді «збільшення рівня енергонасиченості трактора (параметр  $E_n$ ) – зростання швидкості руху енергетичного засобу (параметр  $V$ ) – зростання тягового опору агрегата (параметр  $P_{кр}$ )». Установлено, що зростання значення сили  $P_{кр}$  від параметра  $V$  за законом параболи за певних умов може викликати як зменшення, так і збільшення значення сили опору коченню трактора. Зростання рівня параметра  $E_n$  залежно від зумовленого цим процесом збільшення швидкості руху енергетичного засобу може спричинити як зростання, так і зменшення сили опору його кочення ( $P_f$ ). За умови паритетного впливу зміни значень параметрів  $E_n$  і  $V$  на величину сили  $P_f$  її значення може бути інваріантним відносно зміни рівня енергонасиченості трактора. Установлення однозначності впливу рівня енергонасиченості трактора на величину його опору коченню потребує проведення фундаментальних наукових досліджень.

*Ключові слова:* тяговий баланс, тягове зусилля, тяговий опір, рушій, швидкість руху, вертикальне навантаження.

*Постановка проблеми.* Однією з важливих характеристик будь-якого трактора є тяговий баланс [1]. Найбільш повний перелік й аналіз його складників викладений у [2]. Для практичного застосування тяговий баланс доцільно розглядати через призму особливостей режиму функціонування машинно-тракторного агрегата (далі – МТА). Їх сутність полягає в такому: а) швидкість руху більшості агрегатів у межах 5–12 км/год; б) режим руху максимально наближений до усталеного; в) незначний (до 3°) схил профілю більшості полів. З огляду на це, тяговий баланс трактора зводиться до досить тривіального аналітичного виразу [1–3]:

$$P_k = P_f + P_{кр}, \quad (1)$$

де  $P_k$  – дотична сила тяги трактора, кН;

$P_f$  – сила опору коченню енергетичного засобу, кН;

$P_{кр}$  – сила тягового опору трактору, кН.

*Аналіз останніх досліджень.* Як показує аналіз рівняння (1), що більша сила  $P_f$ , то більшу дотичну силу тяги має реалізувати трактор за умови незмінності сили  $P_{кр}$ . З огляду на це, зменшення значення сили опору коченню енергетичного засобу було й залишається одним із найважливіших завдань його експлуатації. Нині її актуальність зумовлена зародженням в усьому світі, а в Україні, зокрема, тягово-енергетичної концепції тракторобудування [4]. Згідно з її положеннями, енергонасиченість колісних тракторів у 2030 році може сягнути позначки щонайменше 25 кВт/т [5].

© В. Т. Надикто, В. М. Кюрчев, С. П. Погорілий, 2025



Поряд з перевагами ця концепція вимагає розроблення відповідної системи агрегування енергетичних засобів. Одним із її положень є з'ясування впливу енергонасиченості трактора на силу опору коченню. До того ж наукових результатів, направлених на розв'язання цієї проблеми, майже немає.

*Мета дослідження* – з'ясувати вплив енергонасиченості колісного трактора на величину сили опору його коченню.

*Результати досліджень.* Досить часто з достатньою для практики точністю силу опору коченню трактора виражають як добуток його сили ваги ( $G$ ) на коефіцієнт опору коченню ( $f$ ), тобто  $P_f = f \cdot G$ . Водночас за більш предметного розгляду цієї залежності її прийнято виражати загальновідомим рівнянням, яке випливає з формули Гранвуане-Горьчкіна для одиночного колісного рушія:

$$P_f = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{G_k^4}{k \cdot b \cdot D^2}}, \quad (2)$$

де  $G_k$  – вертикальне навантаження на колісний рушій, кН;

$k$  – коефіцієнт об'ємної деформації ґрунту, кН/м<sup>3</sup>;

$b, D$  – ширина і діаметр шини колеса відповідно, м.

У джерелі [2] ця залежність більш інформативна, але й більш складна:

$$P_f = k \cdot b \cdot h^2 + k_{ш} \cdot G_k \cdot \sqrt[3]{\frac{h_{ш}}{D}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu \cdot G_k \cdot k_s \cdot h_{ш}}{D}, \quad (3)$$

де  $h$  – глибина колії після проходу рушія, м;

$k_{ш}$  – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від матеріалу шини, конструкції її каркаса та інших факторів (визначається експериментально);

$h_{ш}$  – величина прогину шини колеса, м;

$\mu$  – коефіцієнт тертя протектора шини по опорній поверхні;

$k_s$  – кінематичний коефіцієнт, що враховує відмінність поверхні реальної шини від циліндричної, а також нахил площини обертання колеса до поверхні кочення.

Практичне застосування залежності (3) суттєво обмежують коефіцієнти  $k_{ш}$  і  $k_s$ . Для отримання їх значень потрібно провести серію досить складних і трудомістких експериментальних досліджень.

Ураховуючи залежності, які визначають глибину колії (параметр  $h$ ) та прогин шини колеса (параметр  $h_{ш}$ ), отримано такий вираз для визначення сили опору коченню одиночного рушія:

$$P_f = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot G_k^4 \cdot \rho \cdot \sqrt{2r \cdot b}}{k_1 \cdot b \cdot D \cdot (\sqrt[3]{b \cdot k_1^2 \cdot G_k} + \pi \cdot \rho \cdot \sqrt{2r \cdot D})}}. \quad (4)$$

У виразі (4) прийнято такі позначення:  $\rho$  – тиск повітря в шині, кПа;  $r$  – радіус шини колеса в поперечному розрізі, м;  $k_1$  – твердість ґрунту, кПа.

Вплив більшості параметрів, які входять до виразів (2)–(4), досліджено й викладено в роботах [6–8]. Аналіз їх матеріалів, а також формул (2)–(4), засвідчує, що сила опору коченню трактора безпосередньо не залежить ні від потужності двигуна ( $N_e$ ), ні від його (трактора) енергонасиченості ( $E_n$ ). Утім, такий функціональний зв'язок є. У роботі [9] розглядається така залежність:

$$N_e = \frac{(P_{кр} + P_f) \cdot V \cdot G}{\eta_{мп} \cdot [G \cdot (1 - a) - P_{кр} \cdot b]}, \quad (5)$$

де  $V$  – швидкість руху трактора, м/с;

$\eta_{мп}$  – ККД трансмісії трактора;

$a, b$  – константи лінійної апроксимації залежності буксування трактора від сили  $P_{кр}$ .

Коли врахувати, що  $E_n = N_e/G$ , то із залежності (5) після відповідних перетворень отримаємо таке:

$$P_f = \frac{E_n \cdot \eta_{mp} \cdot G \cdot (1-a) - P_{кр} \cdot (E_n \cdot \eta_{mp} \cdot b + V)}{V}. \quad (6)$$

На перший погляд, у цьому рівнянні сила опору коченню трактора ( $P_f$ ) безпосередньо й однозначно залежить від енергонасиченості трактора ( $E_n$ ). А саме: що більше значення параметра  $E_n$ , то більше значення сили  $P_f$ . Насправді це не так однозначно. Нагадаємо, що головною метою зростання енергонасиченості трактора є перспектива збільшення його швидкості руху в складі того чи іншого МТА. З огляду на це, з аналізу рівняння (6) випливає таке. Збільшення значення параметра  $E_n$  сприяє зростанню значення сили  $P_f$ . Водночас спричинене ростом енергонасиченості трактора збільшення швидкості його руху (параметр  $V$ ) зумовлює зменшення значення цієї сили. У підсумку можливі три варіанти отриманого результату:

1) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *зростання* сили опору його коченню. Це можливо за випереджального збільшення значення параметра  $E_n$  порівняно зі зростанням значення параметра  $V$ ;

2) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *зменшення* сили опору його коченню. Цього можна досягнути за умови випереджального зростання значення параметра  $V$  відносно збільшення параметра  $E_n$ ;

3) значення сили опору коченню трактора *інваріантне* відносно зміни рівня його енергонасиченості. Такий результат матиме місце за умови паритетного впливу зміни значень параметрів  $E_n$  і  $V$  на  $P_f$ .

Проблема полягає в тому, що нині науковій спільноті невідомий закон зміни швидкості руху трактора в залежності від збільшення рівня його енергонасиченості. З огляду на це, у подальшому аналізі спробуємо установити приблизний характер функціонального зв'язку  $V = f(E_n)$ .

З урахуванням тягового балансу трактора (1) рівень його енергонасиченості можна виразити так:

$$E_n = \frac{N_e}{G} = \frac{P_k \cdot V}{G} = \frac{(P_f + P_{кр}) \cdot V}{G}.$$

Звідси можна записати, що:

$$V = K \cdot E_n, \quad (7)$$

де  $K = G/P_f + P_{кр}$  – безрозмірний коефіцієнт.

Якщо тепер вираз (7) підставити у (6), то в підсумку отримаємо, що:

$$P_f = \frac{\eta_{mp} \cdot G \cdot (1-a) - P_{кр} \cdot (\eta_{mp} \cdot b + K)}{K}. \quad (8)$$

Аналізуючи вираз (8), не важко помітити, що величина сили  $P_f$  взагалі не залежить від рівня енергонасиченості трактора. Та чи відповідає це дійсності?

Із курсу теорії сільськогосподарських машин відомо, що тяговий опір ґрунтообробного знаряддя залежить від швидкості його руху [10]. Причому за нелінійним законом. Приведемо підтвердження цього факту на основі аналізу даних, отриманих для орного МТА в складі трактора ХТЗ-17021 та п'ятикорпусного плуга ПЛН-5-35 (рис. 1).

У цьому дослідженні швидкість руху орного МТА змінювали від 6 до 10 км/год шляхом добору відповідної передачі. Тяговий опір плуга реєстрували за допомогою установленої на орному знарядді спеціальної тензومترичної ланки (див. рис. 1).

Необхідні для контролю буксування оберти коліс реєстрували за допомогою установлених на передньому лівому рушії трактора герметичних контактів (герконів). Режим руху орного

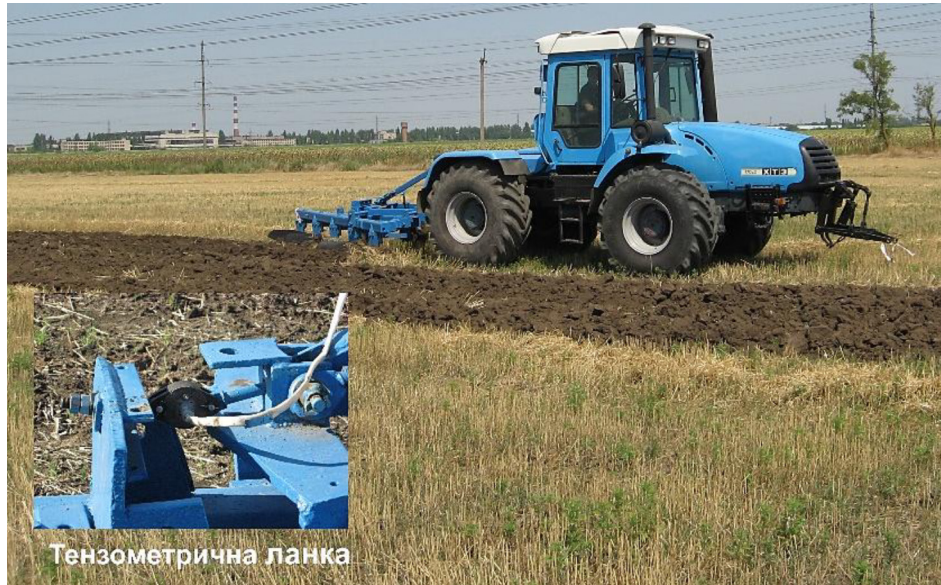


Рис. 1. Орний МТА на основі трактора ХТЗ-17021

МТА добирали таким, щоб максимальне значення буксування трактора ХТЗ-17021 не перевищувало  $\delta = 15\%$ . У такому разі для цього трактора маємо лінійну функціональну залежність  $\delta = a \cdot P_{кр} + b$ . Значення констант апроксимації при цьому такі:  $a = 0,27$ ;  $b = 0,04$  [9].

Електричні сигнали від тензометричної ланки та герконів записували на microSD, яка була встановлена у вимірювальному комплексі на базі Arduino Uno. Оцифровані результати вимірювань обробляли в програмному середовищі Microsoft Excel.

За результатами досліджень з'ясовано, що залежність тягового опору плуга ПЛН-5-35 від швидкості руху МТА в діапазоні 6–10 км/год задовільно (з коефіцієнтом детермінації 0,98) апроксимується параболічною залежністю (рис. 2). Майже всі експериментальні дані функції  $P_{кр} = f(V)$  потрапляють у довірчий інтервал, визначений статистичним рівнем значущості 0,05.

За такого результату є всі передумови стверджувати про існування функціонального ланцюжка такого виду:

«збільшення  $E_n \rightarrow$  зростання  $V \rightarrow$  зростання  $P_{кр}$ ».

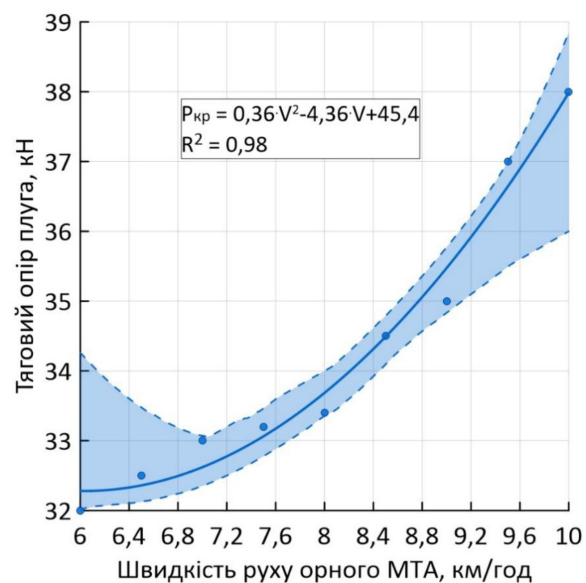


Рис. 2. Залежність тягового опору плуга від швидкості руху орного МТА в межах 6–10 км/год



Результатом дії цієї закономірності, як засвідчує аналіз рівняння (8), мало б бути зменшення значення сили  $P_f$ . Тобто величина останньої тим менша, чим більше значення сили  $P_{кр}$ . Водночас, як впливає з природи коефіцієнта  $K$  [вираз (7)], його значення залежить від сили  $P_{кр}$ . З огляду на це, однозначно стверджувати про те, що зростання тягового опору зняряддя зумовлює зменшення сили опору коченню трактора не можна. Як не можна безпідставно стверджувати й про протилежний результат – збільшення сили  $P_f$ .

Неврахування факту зростання швидкості руху МТА (параметр  $V$ ) завдяки підвищенню рівня енергонасиченості трактора (параметр  $E_n$ ) привело авторів роботи [11] до принципово помилкового висновку. Згідно з виведеним ними рівнянням збільшення рівня енергонасиченості трактора зумовлює зменшення сили опору коченню трактора:

$$P_f = \frac{f \cdot V \cdot g \cdot P_{кр}}{\eta_{мп} \cdot E_n}. \quad (9)$$

Цей постулат вони рекомендують ураховувати при проектуванні енергонасичених тракторів. Водночас при аналізі рівняння (9) не було враховано, що збільшення енергонасиченості трактора потенційно зумовлює підвищення швидкості його руху. А оскільки при цьому вплив параметрів  $E_n$  і  $V$  на значення сили  $P_f$  у формулі (9) протилежний, то, як і в проаналізованому нами випадку вище, отримуємо три аналогічні варіанти. Перші два з них мають дещо іншу інтерпретацію. А саме:

1) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *зменшення* сили опору його коченню. Цього досягнути можна за випереджального збільшення значення параметра  $E_n$  порівняно зі зростанням значення параметра  $V$ ;

2) зростання рівня енергонасиченості трактора зумовлює відповідне *збільшення* сили опору його коченню. Таке можливе за умови випереджального зростання значення параметра  $V$  відносно збільшення параметра  $E_n$ .

Суть третього варіанта, який, найімовірніше, варто вважати скоріше випадковим і перехідним, ніж закономірним, в обох випадках залишається такою ж.

Як бачимо, достовірність висунутого авторами роботи [11] постулату можлива лише за прояву умов першого варіанта. Але доказів цього факту в указаному джерелі немає. Інших спроб з'ясувати вплив підвищення рівня енергонасиченості трактора на силу опору його кочення в наукових джерелах авторами цієї статті не виявлено.

Та попри це, підвищення рівня енергонасиченості трактора – це не абстрактний шлях реалізації його тягово-енергетичної концепції, а вимоги сьогодення. Хоча б тому, що супроводжуване підвищенням енергонасиченості трактора зростання швидкості його робочого руху створює передумови для підвищення продуктивності роботи МТА. А таке завдання було, є і в оглядовому майбутньому постійно залишатиметься актуальною.

Інше діло – доцільний рівень збільшення значення параметра  $E_n$  для трактора тягово-енергетичної концепції. Що стосується методичних основ розв'язання цієї проблеми, то вони досить предметно викладені в публікації [4].

*Висновки.* Зростання рівня енергонасиченості трактора (параметр  $E_n$ ) залежно від зумовленого цим процесом збільшення швидкості руху енергетичного засобу (параметр  $V$ ) може зумовлювати як зростання, так і зменшення сили опору його кочення ( $P_f$ ).

За умови паритетного впливу зміни значень параметрів  $E_n$  і  $V$  на величину сили  $P_f$  її значення може бути інваріантним відносно зміни рівня енергонасиченості трактора.

Установлення однозначності впливу рівня енергонасиченості трактора на величину його опору коченню потребує проведення фундаментальних наукових досліджень. Високий пріоритет цього завдання зумовлений прогресувальним у всьому світі напрямом практичної реалізації тягово-енергетичної концепції трактора.

*Список використаних джерел*

1. Білоконь Я. Ю., Окоча А. І., Войцехівський С. О. Трактори та автомобілі : підручник. Київ : Вища освіта. 2003. 560 с.
2. Кутьков Г. М. Трактори і автомобілі. Технологічні властивості. М. : КолосС. 2004. 504 с.
3. Macmillan R.H. The Mechanics of Tractor-Implement Performance: Theory and Worked Examples. *University of Melbourne*. 2002. 166 с.
4. Надикто В. Т. Визначення раціонального рівня енергонасиченості колісних тракторів. *Вісник аграрної науки*. 2024. № 6. С. 64–71.
5. Надикто В. Т., Величко О. В. Прогноз розвитку енергонасиченості сільськогосподарських тракторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2015. Вип. 1 (100). С. 147–151.
6. Gent Alan Neville and Walter Joseph D. Pneumatic Tire. *Mechanical Engineering Faculty Research*. 2006. 854 p. [https://ideaexchange.uakron.edu/mechanical\\_ideas/854](https://ideaexchange.uakron.edu/mechanical_ideas/854)
7. Sauret C., Bascou J., de Saint Remy, N., Pillet H. et.al. Assessment of field rolling resistance of manual wheelchairs. *Journal of Rehabilitation Research and Development*. 2012. Vol. 49. Issue 1. P. 63–74.
8. Wiegand B. P. Estimation of the rolling resistance of tires. *SAE Technical Paper*. 2016. № 2016-01-0445
9. Nadykto V., Golub G., Hutsol T. et al. Optimization of the parameters of tillage units. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 10074.
10. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. та ін. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку. Київ : Вища освіта, 2005. 464 с.
11. Гуськов В. В., Велєв Н. Н., Атаманов Ю. Є. та ін. Трактори: теорія. М. : Машинобудування, 1988. 376 с.

Стаття надійшла до редакції 01.10.2025

Стаття прийнята 22.10.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



V. Nadykto<sup>1</sup>, V. Kyurchev<sup>1</sup>, S. Pohorilyi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

<sup>2</sup>Institute of Mechanics and Automatics of agroindustrial production of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

## DETERMINING THE INFLUENCE OF THE WHEELED TRACTOR ENERGY SATURATION LEVEL ON ITS ROLLING RESISTANCE

### *Summary*

The goal of this article is to investigate the impact of energy saturation on the magnitude of rolling resistance in a wheeled tractor. Theoretical studies were conducted using the basics of tractor theory in terms of the regularities of its traction balance. Experimental studies were performed using strain gauge equipment and the Arduino Uno microcontroller. Experimental data were processed in Microsoft Excel and Grapher 17 software and graphics environments. The functional chain was analyzed in the form of “increase in the level of tractor energy saturation (parameter  $E_n$ ) – increase in the speed of the energy vehicle movement (parameter  $V$ ) – increase in the traction resistance of the unit (parameter  $P_{kr}$ )”. It was established that an increase in the value of the force  $P_{kr}$  from the parameter  $V$ , according to the law of the parabola, under certain conditions can cause both a decrease and an increase in the value of the tractor’s rolling resistance force. An increase in the level of the parameter  $E_n$ , resulting from the speed of movement of the energy vehicle, can cause both an increase and a decrease in the force of its rolling resistance ( $P_f$ ). Under the condition of parity, the influence of changes in the values of the parameters  $E_n$  and  $V$  on the value of the force  $P_f$  can be invariant with respect to changes in the level of tractor energy saturation. Establishing the uniqueness of the influence of the level of tractor energy saturation on the value of its rolling resistance requires conducting fundamental scientific research.

**Keywords:** traction balance, traction force, traction resistance, engine, speed, vertical load.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-13>

УДК 624.04:539.3:519.6

Д. Г. Одновол, ст. викл.

ORCID: 0009-0004-7238-7424

А. Ф. Дяденчук, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-6625-9985

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: dmytro.odnovol@tsatu.edu.ua

## ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРІВ БАЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАМИ ТРАКТОРА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB: АНАЛІТИЧНИЙ, ЧИСЕЛЬНИЙ ТА РОБАСТНИЙ ПІДХОДИ ДЛЯ СУЦІЛЬНИХ І ПОРОЖНИСТИХ ПЕРЕРІЗІВ

*Анотація:* У статті розглянуто аналітичний, чисельний та робастний підходи до оптимізації розмірів балкових елементів рами трактора з використанням середовища MATLAB. Побудовано математичну модель мінімізації маси балки за умов обмежень на міцність і жорсткість, що формулюється як задача нелінійного програмування з двома змінними (ширина і висота перерізу). Для базового випадку отримано аналітичний розв'язок, який узгоджується з результатами чисельної мінімізації методом послідовного квадратичного програмування. Проведено параметричний аналіз впливу граничного прогину та навантаження на оптимальні геометричні характеристики, досліджено робастність розв'язку при випадкових відхиленнях сили  $\pm 20\%$ , а також порівняно суцільні й порожнисті перерізи. Показано, що порожнистий профіль забезпечує зменшення маси до 25 % без порушення вимог до міцності та жорсткості. Додатково виконано оцінку втомної довговічності за критеріями Гудмана-Содерберга та визначено запас стійкості балки до крутильно-вигинного викривлення. Отримані результати підтверджують ефективність використання MATLAB для конструкційної оптимізації елементів рам тракторів та підвищення їх енергоефективності.

*Ключові слова.* оптимізація конструкцій, MATLAB, нелінійне програмування, міцність і жорсткість, робастна оптимізація, втомна довговічність, стійкість балки, рамна конструкція трактора, порожнистий профіль, метод скінченних елементів.

*Постановка проблеми.* Оптимізація конструкційних параметрів є ключовим завданням у багатьох галузях – від авіації та машинобудування до енергетики, біомедичних технологій і аграрної техніки. Вона дає змогу досягати балансу між ефективністю, надійністю та ресурсозбереженням. У сучасному тракторобудуванні ключовим завданням залишається пошук конструкційних рішень, які забезпечують оптимальне співвідношення між масою, міцністю та довговічністю несучих елементів. Основу більшості рамних конструкцій становлять поздовжні та поперечні балки, які сприймають значні згинальні й крутильні навантаження під час роботи машини в полі, на дорогах або при транспортуванні навісного обладнання. Надмірна маса балкових елементів негативно впливає на експлуатаційні характеристики техніки, зокрема збільшує витрати пального, погіршує динаміку руху й призводить до підвищеного тиску на ґрунт. Водночас зменшення маси без урахування вимог міцності та жорсткості може призвести до передчасного руйнування або деформації рами.

Традиційно проектування балкових елементів базується на емпіричних методах або спрощених розрахункових схемах, що не враховують взаємодії між геометричними параметрами, фізико-механічними властивостями матеріалу та реальними експлуатаційними навантаженнями. Унаслідок цього конструкції можуть мати надлишкову масу або нерівномірний запас міцності, що знижує ефективність використання матеріалу та ускладнює забезпечення надій-



ності. Застосування методів оптимізаційного проектування дає змогу перейти від інтуїтивного добору параметрів до науково обґрунтованого визначення раціональних розмірів перерізів балок на основі математичних моделей і чисельних алгоритмів. Особливої актуальності набуває використання методів нелінійного програмування (далі – НЛП) для задач мінімізації маси за наявності нелінійних обмежень на міцність і жорсткість. Такий підхід дає змогу отримати аналітичні або чисельні розв’язки, що забезпечують мінімальну масу за умови дотримання допустимих напружень і прогинів. Для балкових елементів рами трактора доцільно розглядати змінні параметри ширини та висоти поперечного перерізу, а також, у разі порожнистих профілів, товщину стінки.

Ефективним інструментом реалізації таких розрахунків є програмне середовище MATLAB, яке забезпечує широкий набір функцій для розв’язання задач оптимізації, символічної математики та інженерного аналізу. Зокрема, використання алгоритмів `fmincon`, `ga`, `patternsearch` та інструментарію Optimization Toolbox дає змогу проводити чисельну мінімізацію маси балки з урахуванням нелінійних обмежень, а також перевіряти чутливість моделі до змін навантаження, модуля пружності чи допустимих напружень. MATLAB також забезпечує можливість побудови графічних залежностей, аналізу збіжності та порівняння варіантів суцільних і коробчастих перерізів, що значно підвищує точність та інформативність результатів.

Розв’язання зазначеної задачі дасть змогу сформуванню універсальної методикою оптимізації балкових елементів, яку можна інтегрувати в процес комп’ютерного проектування рам сільськогосподарських машин. Це, своєю чергою, сприятиме підвищенню енергоефективності, зниженню матеріалоемності та збільшенню ресурсу тракторів нового покоління.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій:* Мінімізація маси конструкцій за умови забезпечення необхідних показників міцності, жорсткості й довговічності є фундаментальною проблемою в машинобудуванні та аграрній техніці. Для тракторів і сільськогосподарських машин вона має особливе значення, оскільки безпосередньо впливає на економічність, продуктивність та ресурс несучих систем.

Теоретичні основи оптимізації конструкцій закладено в класичних працях, наприклад, в [1], де сформульовано принципи варіаційного підходу до побудови оптимальних процесів. Класичні підходи до аналізу напружено-деформованого стану розвинулися в роботі [27], що стали методологічною основою для подальших чисельних методів. Прикладні аспекти оптимізації сталевих конструкцій ґрунтовно висвітлено в монографіях [2; 3], де описано алгоритми мінімізації ваги балок і рам на основі градієнтних та еволюційних методів.

Останні дослідження демонструють впровадження методу скінченних елементів (далі – МСЕ) у задачі оптимізації елементів тракторів. У роботі [19] тривимірне моделювання корпусу коробки передач трактора дало змогу знизити масу на 12–15 % при збереженні допустимих напружень. Автори роботи [20] пропонують фреймворк топологічної оптимізації для ферм і рамних конструкцій у MATLAB, де гомогенізаційний підхід забезпечує плавний перехід від суцільного матеріалу до перфорованої структури та може бути адаптований до тонкостінних рам тракторів.

Розвиток обчислювальної механіки дав змогу поєднати МСЕ-аналіз із параметричною оптимізацією. У роботі [6] використано ANSYS Workbench для оптимізації нижнього важеля вертикального вальцьового млина, застосувавши багатопараметричний аналіз. Автори [7] виконали модальний аналіз рами скутера, продемонструвавши, що зміна геометрії збільшує першу власну частоту на 15 %. У працях [8–12] FEM-аналіз застосовано до рам автомобілів і тракторів, з урахуванням жорсткості, втоми та крутильних коливань, що забезпечило приріст ресурсу на 10–25 %. Такі підходи розвинуто в працях [13–15], де систематизовано методи інтеграції FEM-моделей у процес параметричної оптимізації кузовів і рам. В умовах невизна-



ченостей дедалі більшої актуальності набуває робастна (стійка) оптимізація, яка спрямована на підвищення надійності конструкцій за варіативності навантажень і матеріальних параметрів. У статті [21] запропоновано алгоритм робастної топологічної оптимізації для рамних систем із варіаціями фізико-механічних властивостей, що знижує ризик перевищення граничних напружень. Праця [22] демонструє зменшення чутливості сталевих рам до випадкових змін жорсткості на 10–20 %. У статті [23] розглянуто мінімізацію ваги плоскої ферми з квадратними порожнистими перерізами (SHS) за допомогою алгоритму диференціальної еволюції, що підтверджує ефективність порожнистих профілів у транспортних рамах.

Українські науковці долучаються до глобальних тенденцій у галузі конструкційної оптимізації аграрної техніки, пропонуючи власні наукові рішення. У роботі [4] розглянуто способи підвищення ресурсу роботи тонкостінних елементів рами машини КС-6Б шляхом варіювання товщини й форми перерізів. Автор [5] дослідив вплив геометрії рамних профілів на розподіл напружень і довів, що коробчасті перерізи забезпечують оптимальне співвідношення «маса – жорсткість». Додатково в статті [28] показано ефективність застосування ANSYS для зниження маси деталей машин без втрати міцності, а результати в роботі [29] підтверджують, що робастна оптимізація в MATLAB підвищує надійність балкових конструкцій за випадкових відхилень параметрів. MATLAB дедалі частіше використовують як універсальне середовище для моделювання, чисельного аналізу та оптимізації. У статті [24] реалізовано повний цикл оптимізації порожнистого вала – від формулювання задачі до SQP-розв'язку в MATLAB та перевірку результатів в ANSYS. Автори роботи [25] пропонують багатоцільову оптимізацію балки з прямокутним перерізом, враховуючи міцність, прогин і вартість зварювання. Оскільки оптимізація рамних конструкцій часто включає суперечливі цілі (наприклад, мінімізація ваги та максимізація жорсткості) вона є багатокритеріальною. Метод NSGA-II зарекомендував себе як ефективний інструмент для пошуку Парето-оптимальних рішень. Додатково, для підтвердження застосовності інших сучасних високопродуктивних метаевристичних підходів, як-от оптимізація рою частинок (PSO), варто звернути увагу на роботу, що адаптує ці методи саме для багатокритеріальної оптимізації проектування [26], що є важливим для порівняльного аналізу чисельних та робастних підходів. Ці дослідження доводять, що MATLAB є ефективною платформою для реалізації алгоритмів нелінійної, багатокритеріальної та робастної оптимізації в механічних системах.

Проаналізовані джерела демонструють еволюцію методів – від аналітичних моделей до інтегрованих цифрових технологій проектування. Сучасні дослідження поєднують аналітичну теорію міцності, нелінійне програмування, скінченно-елементне моделювання та чисельну оптимізацію в MATLAB, що дає змогу створювати легкі, міцні та надійні конструкції рам тракторів із коробчастих і тонкостінних профілів.

Такий підхід надає можливості для автоматизації конструкторських рішень, підвищення ресурсу й зниження матеріалоемності машинобудівної продукції.

*Формулювання мети статті.* Метою дослідження є розроблення та верифікація математичної моделі оптимізації геометричних параметрів балки рами трактора, яка забезпечує мінімальну масу конструкції за умови дотримання вимог міцності, жорсткості й технологічних обмежень. Для досягнення поставленої мети передбачається використання методів нелінійного програмування в поєднанні із чисельними алгоритмами, реалізованими в середовищі MATLAB, а також проведення аналізу чутливості моделі до зміни вихідних даних.

Основна ідея полягає у формулюванні універсального підходу до визначення ширини, висоти та товщини стінки прямокутного або коробчастого перерізу балки, який забезпечує мінімальну масу елемента рами при обмеженнях на напруження та прогин. Це дає змогу отримати компромісне рішення між масою, жорсткістю та довговічністю конструкції, що особливо



важливо для сучасних тракторів, де кожен кілограм металу впливає на паливну економічність, динаміку руху та ресурс машини.

Так, досягнення поставленої мети дає змогу поєднати аналітичні та чисельні методи для практичного розв'язання задач конструкційної оптимізації в аграрному машинобудуванні, підвищуючи ефективність, ресурс і технологічність рам тракторів нового покоління.

*Основна частина.* Для демонстрації практичного застосування моделі розглянемо приклад із заданими характеристиками матеріалу та навантаження. У цьому контексті оптимізація балкових елементів рами трактора полягає у визначенні таких геометричних параметрів перерізу (ширини  $b$  та висоти  $h$ ), які забезпечують мінімальну масу конструкції за умов дотримання граничних критеріїв міцності та жорсткості.

*Математична модель задачі оптимізації.* Розглянута задача належить до класу нелінійного програмування, оскільки обмеження мають ступеневий характер і не є лінійними функціями параметрів [1; 2; 27].

Модель базується на консольній балці довжиною  $L$ , навантаженій на вільному кінці силою  $F$ . Матеріал балки – сталь із густиною  $\rho$  та модулем Юнга  $E$ . Допустимі значення напружень і прогинів задаються як  $\sigma_{\max}$  і  $\delta_{\max}$  відповідно.

Цільова функція може бути записана як:

$$m(b, h) = \rho b h L, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $b, h$  – геометричні розміри прямокутного перерізу, м;  $L$  – довжина балки, м.

Завдання полягає в мінімізації  $m(b, h)$  (аналогічні постановки подаються в [2; 6; 24]):

$$\min_{b, h} f(b, h) = \rho L b h.$$

Система обмежень формулюється так:

– *обмеження міцності:* максимальні нормальні напруження в небезпечному перерізі балки:

$$\sigma(b, h) = \frac{M_{\max} \cdot c}{I} = \frac{FL(h/2)}{(bh^3/12)} = \frac{6FL}{bh^2} \leq \sigma_{\max}. \quad (2)$$

де  $M_{\max} = FL$  – максимальний згинальний момент,

$$I = \frac{bh^3}{12} \text{ – момент інерції відносно нейтральної осі,}$$

$$c = h/2 \text{ – відстань до крайнього волокна.}$$

Це обмеження гарантує, що максимальні напруження не перевищують допустимі для матеріалу.

– *обмеження жорсткості (прогину):* прогин кінця консольної балки при силі  $F$  дорівнює:

$$\delta(b, h) = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{4FL^3}{Ebh^3} \leq \delta_{\max}. \quad (3)$$

Це обмеження забезпечує геометричну стабільність елемента під навантаженням [4; 12; 16].

– *обмеження на змінні:*

$$b_{\min} \leq b \leq b_{\max}, \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}, \quad (4)$$

що відповідає технологічним та конструкційним межам:  $5 \text{ мм} \leq b, h \leq 80 \text{ мм}$  (0.005–0.08 м).

Повна математична модель:

$$\min_{b, h} f(b, h) = \rho L b h; \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{6FL}{bh^2} \leq \sigma_{\max}, \\ \frac{4FL^3}{Ebh^3} \leq \delta_{\max}, \\ b_{\min} \leq b \leq b_{\max}, h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \end{array} \right. \quad (6)$$

Завдання є двовимірною нелінійною задачею з двома нерівностями й двома обмеженими змінними, що розв'язується методами послідовного квадратичного програмування (SQP), внутрішніх точок або еволюційними алгоритмами [2; 13; 22].

*Аналітичне рішення для базового випадку.* За умови, що обидва обмеження активні в оптимумі, отримаємо систему рівнянь:

$$\frac{6FL}{bh^2} = \sigma_{\max}, \quad \frac{4FL^3}{Ebh^3} = \delta_{\max}.$$

Звідси аналітично:

$$h^* = \frac{2\sigma_{\max}L^2}{3E\delta_{\max}}, \quad b^* = \frac{6FL}{\sigma_{\max}h^{*2}}.$$

Для прикладних даних:  $F = 3000$  Н,  $L = 0.5$  м,  $E = 210$  ГПа,  $\sigma_{\max} = 160$  МПа,  $\delta_{\max} = 0,002$  м,  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup> отримаємо:  $h^* = 0,0635$  м = 63,5 мм,  $b^* = 0,01395$  м = 13,95 мм,  $m^* = 3,48$  кг.

Розв'язок підтверджує висновки попередніх досліджень [6; 8; 12], що оптимум досягається при граничних станах за міцністю і жорсткістю.

Отримані результати збігаються з аналітичними розрахунками ( $b \approx 0.0139$  м,  $h \approx 0.0635$  м,  $m \approx 3.48$  кг). Алгоритм демонструє стабільну збіжність навіть при зміні початкових умов, що узгоджується з висновками про робастність рішень, наведених у [21–23].

*Фізичний зміст і узагальнення.* Побудована модель дає змогу мінімізувати масу балки при заданих граничних умовах, виявити вплив параметрів  $F$ ,  $E$ ,  $\sigma_{\max}$ ,  $\delta_{\max}$  на оптимальні геометричні розміри, а також дослідити компроміс між жорсткістю та масою, що відповідає конструкційній логіці «жорсткість ↔ економічність».

Розширення моделі для порожнистих перерізів передбачає заміну площі  $A = bh - (b - 2t)(h - 2t)$  та моменту інерції  $I = \frac{bh^3 - (b - 2t)(h - 2t)^3}{12}$ , що дає змогу виконати оптимізацію за трьома змінними ( $b$ ,  $h$ ,  $t$ ), аналогічно підходам у роботах [23–25].

Так, запропонована математична модель є універсальною основою для подальшого розширення – у напрямі робастної оптимізації, топологічних модифікацій або оптимізації коробчастих профілів рам тракторів.

*Результати моделювання та обговорення.* Застосування MATLAB спрощує реалізацію моделі, оскільки забезпечує готові засоби для символьного диференціювання (перевірка критичних контрольних точок), аналізу чутливості, багатокритеріальної оптимізації (функції `fgoalattain`, `gamultiobj`) та зв'язку з FEM-середовищами (ANSYS, COMSOL) [18; 24].

*Вихідні дані для чисельного експерименту:* Для перевірки побудованої математичної моделі проведено чисельні розрахунки в середовищі MATLAB із використанням функції `fmincon` (алгоритм SQP). Вихідні параметри (таблиця 1) вибрано відповідно до умов реальної балки рами трактора середнього класу тяги.

Розв'язання задачі НЛП за даними таблиці 1 дало результати, наведені в таблиці 2.

Таблиця 1

## Вихідні параметри

Параметр	Позначення	Значення	Примітка
Сила навантаження, Н	$F$	3000	реакція навісного агрегату
Довжина балки, м	$L$	0.5	проліт між опорами
Модуль Юнга, Па	$E$	$2,1 \cdot 10^{11}$	сталь S355
Густина матеріалу, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	7850	–
Допустиме напруження, Па	$\sigma_{\max}$	$160 \cdot 10^6$	межа текучості /1,5
Допустимий прогин, м	$\delta_{\max}$	$2 \cdot 10^{-3}$	конструкційний ліміт
Межі змінних, мм	$b, h$	5–80	технологічні обмеження

Розраховані значення повністю збігаються з аналітичним розв'язком, що підтверджує коректність математичної моделі.

Обидва обмеження (за напруженням та прогином) активні, тобто в оптимальній точці вони виконуються як рівності. Це означає, що конструкція працює «на межі» своїх допустимих параметрів – типовий результат для задач мінімізації маси [2; 6; 24].

Таблиця 2

## Результати оптимізації

Параметр	Позначення	Оптимальне значення
Ширина перерізу, м	$b^*$	0,01395
Висота перерізу, м	$h^*$	0,06349
Маса балки, кг	$m^*$	3,48
Напруження, МПа	$\sigma(b^*, h^*)$	160
Прогин, м	$\delta(b^*, h^*)$	0,002

*Параметричний аналіз впливу обмежень.* Для дослідження чутливості оптимуму виконано параметричне варіювання допустимого прогину  $\delta_{\max}$  і сили навантаження  $F$ .

Оптимізаційна модель для суцільного прямокутного перерізу в MATLAB (fmincon, алгоритм SQP) дала стабільний збіг з аналітичним розв'язком. За початкових параметрів:

$$F = 3000 \text{ Н}, L = 0.5 \text{ м}, E = 210 \text{ ГПа}, \sigma_{\max} = 160 \text{ МПа}, \delta_{\max} = 2 \text{ мм отримано:}$$

$$b^* = 13.95 \text{ мм}, h^* = 63.49 \text{ мм}, m^* = 3.48 \text{ кг.}$$

У цій точці обидва обмеження активні:

$$\sigma(b^*, h^*) \approx 160 \text{ МПа}, \delta(b^*, h^*) \approx 0.002 \text{ м.}$$

Це означає, що балка спроектована з мінімально можливою масою при повному використанні допустимих параметрів.

За результатами побудови карт рівнів у середовищі MATLAB:

- лінії рівних напружень мають форму гіперболічних кривих  $\sigma \sim 1/(bh^2)$ ;
- лінії рівного прогину мають крутішу залежність  $\delta \sim 1/(bh^3)$ ;
- ділянка допустимих рішень ( $\sigma \leq \sigma_{\max}, \delta \leq \delta_{\max}$ ) обмежена з двох боків, а мінімум маси лежить на її межі (рис. 1).

*Фізичний зміст.* Зі збільшенням висоти перерізу жорсткість зростає кубічно, тоді як маса – лише лінійно, тому оптимум завжди зміщується до максимально можливої висоти в межах технологічного діапазону.

Проведено серію оптимізацій при зміні допустимого прогину  $\delta_{\max}$  у межах 0,5–3,0 мм. Відповідні результати наведено в таблиці 3.

У зоні  $\delta_{\max} \geq 2$  мм активними залишаються обидва обмеження, оптимальні розв'язки змінюються плавно, при  $\delta_{\max} < 1.5$  мм висота досягає межі 80 мм, тому далі підвищується лише

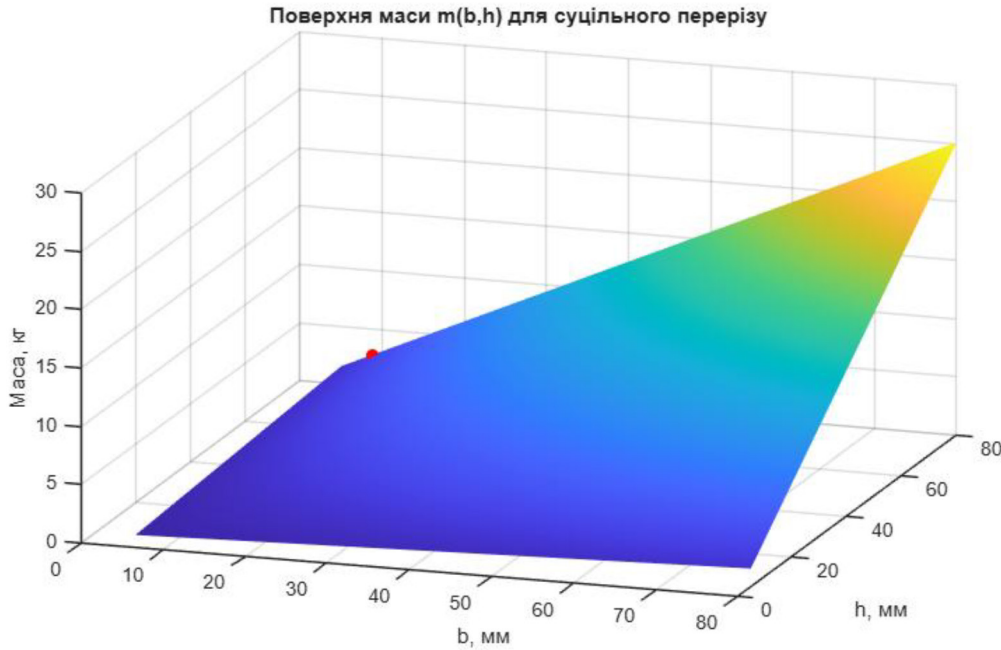


Рис. 1. Поверхня маси  $m(b, h)$  для суцільного перерізу

Таблиця 3

Вплив допустимого прогину на оптимальні параметри балки

$\delta_{\max}$ , мм	$h^*$ , мм	$b^*$ , мм	Маса, кг	Активні обмеження
3.0	42.3	31.4	5.22	$\sigma, \delta$
2.0	63.5	13.9	3.48	$\sigma, \delta$
1.5	80.0	9.3	2.92	$\delta$ , граничне обмеження за висотою
1.0	80.0	13.9	4.38	$\delta$ , граничне обмеження за висотою
0.8	80.0	17.4	5.48	$\delta$ , граничне обмеження за висотою

ширина  $b$ , що веде до різкого зростання маси. Так, при трикратному зменшенні допустимого прогину маса збільшується майже у 2,5 раза, а конструкція переходить у «зону жорсткості», де геометричні параметри обмежені технологічними межами.

Крива залежності  $m(\delta_{\max})$  має різкий перегин у точці, де висота  $h$  упирається в технологічне обмеження (рис. 2).

Проведено серію розрахунків при фіксованому значенні допустимого прогину  $\delta_{\max} = 2$  мм для різних значень навантаження  $F \in [2000; 4000]$  Н (табл. 4, рис. 3).

Висота  $h^*$  залишається сталою, оскільки визначається вимогами до жорсткості, які не залежать від навантаження за активних  $\sigma$  і  $\delta$ . Ширина  $b^*$  зростає майже лінійно з  $F$  (пропорційно), як і маса. Так, збільшення навантаження на 30 % дає зростання маси на  $\approx 20$  %. Це підтверджує лінійно-пропорційну залежність маси від навантаження за фіксованих обмежень – характерну для задач НЛП, де обидва обмеження активні.

Для оцінки стійкості оптимального рішення до варіацій навантаження застосовано моделювання методом Монте-Карло ( $N = 2000$ ), де навантаження  $F$  розподілене рівномірно в межах  $\pm 20$  % від номінального значення (рис. 4).

За номінальних параметрів  $b^* = 13.95$  мм,  $h^* = 63.49$  мм,  $P(\sigma \leq \sigma_{\max}, \delta \leq \delta_{\max}) \approx 50$  %, тобто половина випадків (коли  $F > F_0$ ) перевищують межі. Для підвищення надійності до 95 % треба врахувати 95-й перцентиль  $F_{95} \approx 1.19F_0$ . Тоді оптимальне рішення:  $b_{95} = 16.6$  мм,  $h_{95} = 63.5$  мм,  $m_{95} = 4.14$  кг. Це означає, що гарантування надійності потребує приблизно 19 % приросту

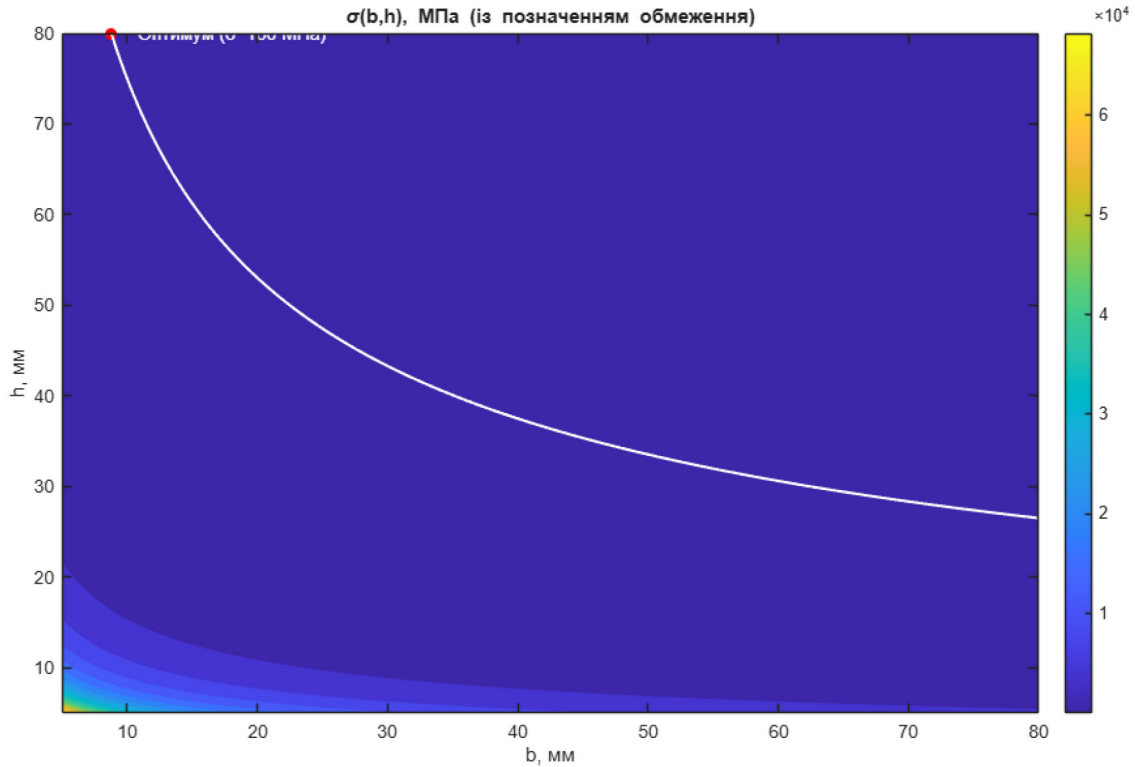


Рис. 2. Розподіл напружень

Таблиця 4

Вплив сили навантаження на оптимальні параметри

$F$ , Н	$h^*$ , мм	$b^*$ , мм	Маса, кг	Активні обмеження
2000	63.5	9.3	2.32	$\sigma, \delta$
2500	63.5	11.6	2.90	$\sigma, \delta$
3000	63.5	13.9	3.48	$\sigma, \delta$
3500	63.5	16.3	4.06	$\sigma, \delta$
4000	63.5	18.6	4.64	$\sigma, \delta$

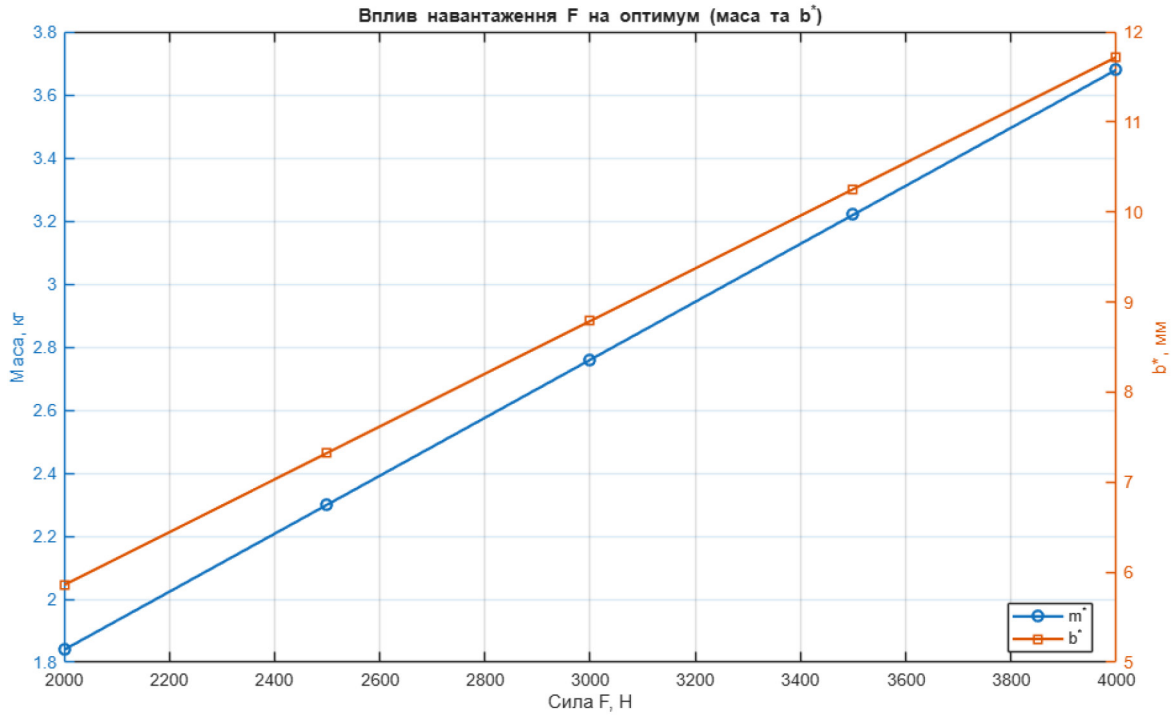
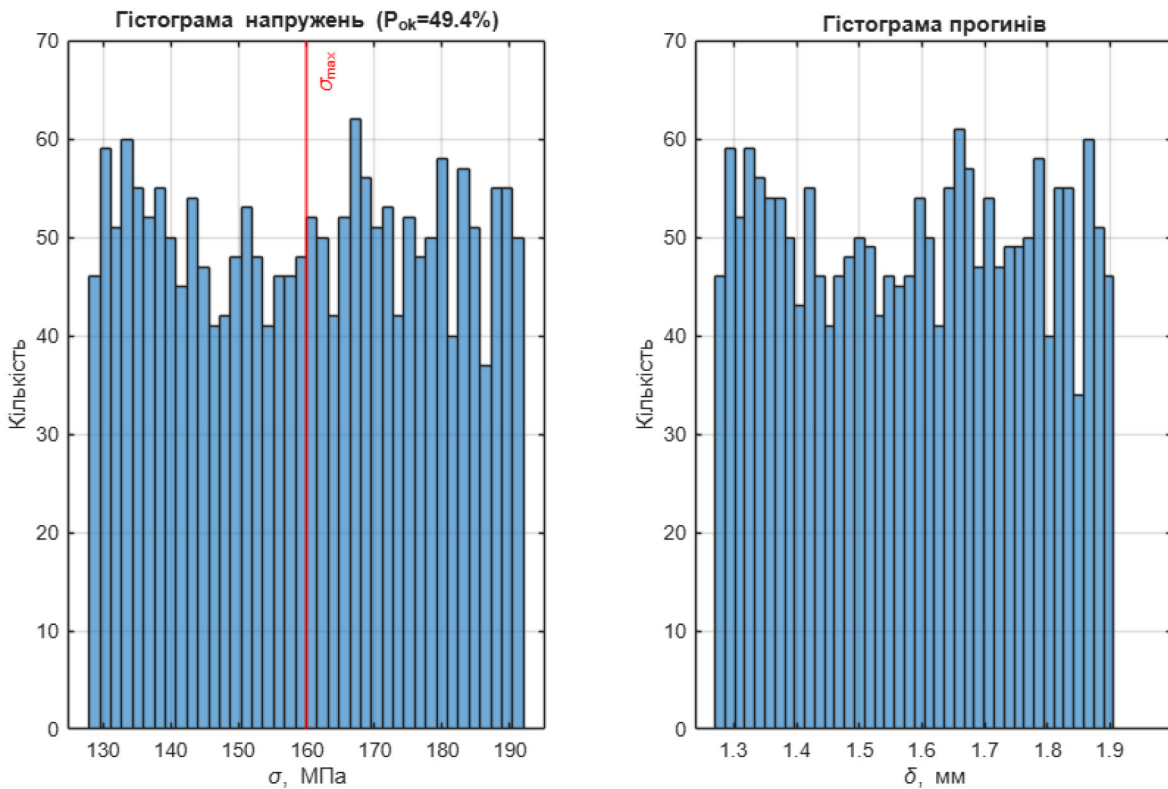
ширини та маси, що узгоджується з рекомендаціями щодо введення стохастичного запасу в геометричні параметри конструкцій [21; 22].

У межах дослідження розглянуто порожнистий прямокутний профіль типу RHS (Rectangular Hollow Section) з товщиною стінки  $t = 4$  мм. Оптимізацію виконано за трьома змінними (шириною  $b$ , висотою  $h$  та товщиною  $t$ ) із використанням інструментів MATLAB. Підсумкові результати наведено в таблиці 5.

Заміна суцільного перерізу на порожнистий зменшує масу на 22–25 %, не порушуючи критеріїв  $\sigma$  та  $\delta$ . При цьому запас міцності зростає ( $\sigma = 156$  МПа  $< \sigma_{\max}$ ). Порожнистий профіль ефективніший за критерієм «жорсткість/маса» та технологічно зручніший при зварюванні рамних вузлів. Такі висновки підтверджено в роботах [4; 23], де для сталевих тонкостінних ферм отримано зниження ваги до 25 %.

Для балок рами трактора важливо забезпечити відсутність резонансів під дією коливань двигуна та навісного обладнання. Першу власну частоту консольної балки визначає формула Ейлера-Бернуллі:

$$f_1 = \frac{\beta_1^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}, \beta_1 = 1.875. \tag{6}$$

Рис. 3. Вплив навантаження  $F$  на оптимумРис. 4. Монте-Карло: розподіли  $\sigma$  і  $\delta$ 

Для оптимального суцільного перерізу  $b^* = 13.95$  мм,  $h^* = 63.49$  мм:  $f_1 \approx 310$  Гц. Для порожнистого RHS  $40 \times 60 \times 4$  мм:  $f_1 \approx 295$  Гц. Робоча частота двигуна трактора зазвичай 20–120 Гц, тож обидві конструкції поза резонансною зоною. Проте зменшення товщини або висоти може знизити  $f_1$  до 200 Гц, що потребує додаткового контролю (дослідження аналогічні [13; 15; 16]).

Таблиця 5

## Порівняння типів перерізів

Тип балки	$b$ , мм	$h$ , мм	$t$ , мм	Маса, кг	Прогин, мм	Напруження, МПа
Суцільна	13.95	63.49	–	3.48	2.00	160
RHS	40.0	60.0	4.0	2.72	2.05	156
RHS (оптиміз.)	38.5	58.2	3.9	2.68	1.98	159

У реальних умовах експлуатації рама трактора зазнає циклічних навантажень – змінних у часі сил і моментів під час руху по пересіченій місцевості, при роботі з навісним обладнанням тощо. Навіть якщо максимальні напруження не перевищують границю текучості, накопичення втомних пошкоджень може спричинити появу тріщин.

Для сталевих елементів перевірку виконують за критерієм Гудмана або Содерберга [30–31], який ураховує одночасну дію середнього ( $\sigma_m$ ) і амплітудного ( $\sigma_a$ ) напруження:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} \leq 1, \quad (7)$$

де  $S_e$  – границя витривалості ( $\approx 0.5 \sigma_{\max}$ ),  $S_u$  – тимчасовий опір розриву.

Результати MATLAB-розрахунків: для балки з оптимальними параметрами  $b^* = 13.95$  мм,  $h^* = 63.49$  мм,  $\sigma_{\max} = 160$  МПа, прийнято:  $\sigma_a = 0.5\sigma_{\max} = 80$  МПа,  $\sigma_m = 80$  МПа,  $S_e = 80$  МПа,  $S_u = 600$  МПа. Отже:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1.0 + 0.133 = 1.133 > 1.$$

Це означає, що при повному циклі навантаження запасу втомної міцності недостатньо, і балка може працювати лише в напівциклічному режимі (зниження амплітуди або підвищення допустимого прогину). Для реальних умов, коли дійсне амплітудне напруження не перевищує  $0.3\text{--}0.4\sigma_{\max}$ , умова Гудмана виконується ( $\text{Goodman} \approx 0.6\text{--}0.8 < 1$ ), тобто витривалість забезпечується.

У межах оптимального варіанта запас втомної міцності перебуває на грані допустимого, що потребує додаткового врахування при реальному проектуванні. Для забезпечення надійності конструкції доцільно застосовувати коефіцієнт запасу в межах 1.2–1.3 або перейти на порожнистий профіль типу RHS, який ефективніше працює на згин і характеризується нижчим рівнем напружень.

Використання MATLAB-скрипта дає змогу оперативно оцінювати індекс Гудмана при зміні сили, циклічності навантаження або матеріалу, що особливо корисно на стадії ескізного проектування.

Навіть за умови дотримання допустимих напружень балка може втратити стійкість у площині згину внаслідок крутильного викривлення [32]. Критичний момент для консольної балки визначається за спрощеною формулою:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{KL^2}, \quad (8)$$

де  $K$  – коефіцієнт закріплення (для консольного кінця  $K \approx 1.0$ ).

За розрахункових даних  $E = 210$  ГПа,  $I = bh^3/12 = 2.25 \cdot 10^{-8}$  м<sup>4</sup>,  $L = 0.5$  м, отримаємо:

$$M_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 2.25 \cdot 10^{-8}}{0.5^2} \approx 1.86 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Прикладений момент:

$$M_{applied} = F \cdot L = 3000 \cdot 0.5 = 1500 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Аналіз  $M_{applied}/M_{cr} = 0.081 \ll 1$ .

Отже, загальна стійкість балки забезпечена з великим запасом – понад 12-кратним. Для RHS-профілю запас ще більший завдяки більшій жорсткості за тієї самої маси). За таких умов балка не втратить стійкості при номінальних навантаженнях, а запас стійкості  $\geq 10$  разів дає змогу розглядати спрощену 1D-модель як адекватну для початкового етапу проєктування. MATLAB-модуль може автоматично порівнювати  $M_{applied}$  і  $M_{cr}$ , виявляючи потенційно критичні конфігурації.

Побудова карт (номограм) дає змогу візуально оцінити, як змінюються маса балки  $m(b, h)$ , напруження  $\sigma(b, h)$ , прогин  $\delta(b, h)$  у межах допустимого діапазону геометричних параметрів.

*Результати в MATLAB:* для сітки  $b, h \in [5, 80]$  мм побудовано контурні діаграми:

1. Маса конструкції набуває мінімальних значень  $m \approx 3\text{--}4$  кг у зоні  $b \approx 14\text{--}20$  мм,  $h \approx 60\text{--}70$  мм. Зі збільшенням ширини та висоти маса зростає майже лінійно, що відповідає аналітичній моделі.

2. Напруження  $\sigma(b, h)$  зменшується пропорційно  $1/h^2$  та  $1/b$ . Рівні  $\sigma = 160$  МПа формує межу допустимої зони, за яку виходити не можна. На висоті понад 70 мм запас міцності стає надлишковим, що не дає додаткових переваг з точки зору оптимізації.

3. Прогин  $\delta(b, h) \propto 1/h^3 b$  демонструє найвищу чутливість до висоти. Умова  $\delta \leq 2$  мм формує вузьку смугу допустимих комбінацій, яка майже збігається з лінією  $\sigma \leq \sigma_{max}$ . Саме ця зона визначає положення оптимуму.

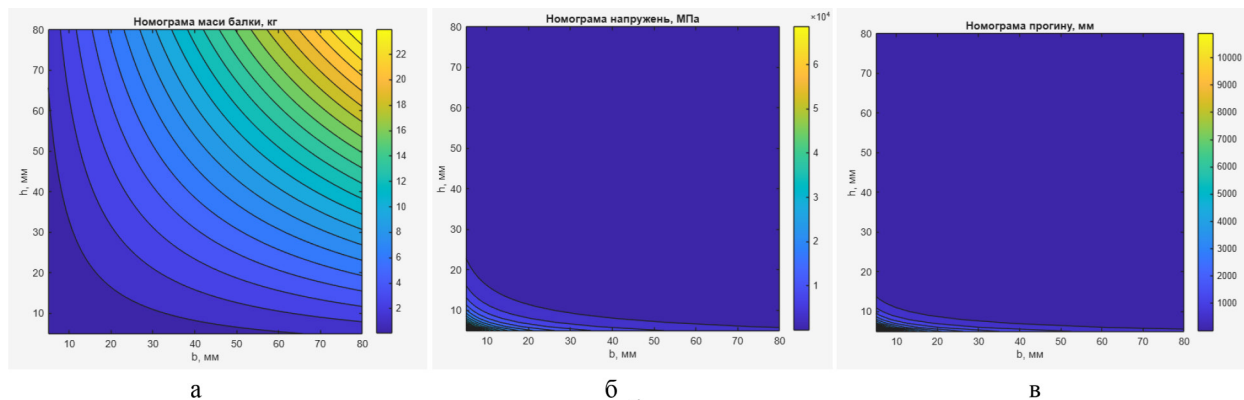


Рис. 6. Номограми: (а) маса, (б) напруження, (в) прогин

Номограми, побудовані на основі моделювання, підтверджують, що оптимальне рішення розташовується на перетині двох рівнянь  $\delta = \delta_{max}$  і  $\sigma = \sigma_{max}$ . Візуальний аналіз дає змогу швидко дібрати геометрію балки під будь-які параметри  $F$ ,  $\delta_{max}$ ,  $\sigma_{max}$  без повторного запуску оптимізатора. Запропонована методика може бути реалізована в MATLAB як модуль Design Map Generator і використана як довідковий інструмент для конструкторів.

*Висновки.* У роботі розроблено й верифіковано математичну модель оптимізації геометричних параметрів балки рами трактора з метою мінімізації маси за умов обмежень на міцність і жорсткість. Проведені числові дослідження в MATLAB, включно з розширенням на порожністі перерізи, аналізом робастності та модальною перевіркою. Отримані результати узгоджуються з аналітичними оцінками та даними літератури й можуть бути безпосередньо інтегровані в процес інженерного проєктування.

Базовий оптимум для суцільного перерізу при  $F = 3000$  Н,  $L = 0.5$  м,  $E = 210$  ГПа,  $\sigma_{max} = 160$  МПа,  $\delta_{max} = 2$  мм становить  $b^* \approx 13.95$  мм,  $h^* \approx 63.49$  мм,  $m^* \approx 3.48$  кг. В оптимальній точці одночасно активні обмеження за напруженням і прогином, що свідчить про роботу конструкції «на межі».



Аналіз чутливості до жорсткісного критерію показує, що зменшення  $\delta_{\max}$  різко підвищує оптимальну висоту  $h$  і масу. За наявності технологічної межі  $h \leq 80$  мм подальше «стиснення» прогину змушує збільшувати  $b$ , що призводить до експоненційного росту маси.

При фіксованих  $\sigma_{\max}$ ,  $\delta_{\max}$ , висота  $h^*$  залишається сталою, оскільки визначається жорсткістю, тоді як масу і ширину  $b^*$  масштабує сила  $F$  майже лінійно.

У разі стохастичного навантаження ( $\pm 20\%$  до  $F$ ): номінальний оптимум забезпечує  $\approx 50\%$  імовірність виконання обмежень. Для досягнення надійності на рівні  $95\%$  потрібна адаптація під  $F_{95} \approx 1.19F_0$ , що передбачає збільшення ширини  $b$  на  $\approx 19\%$  і маси до  $\approx 4.14$  кг.

Порожністі RHS-профілі забезпечують – зменшення маси  $20\text{--}25\%$  при дотриманні  $\sigma$  і  $\delta$ , за умови контролю місцевої стійкості (співвідношення  $b/t$ ,  $h/t$ ) і технологічних обмежень. Це підтверджує доцільність коробчастих перерізів для рамних елементів.

Модальна перевірка показала, що перша власна частота оптимальних варіантів  $\approx 300$  Гц, що суттєво перевищує діапазон робочих частот збудження ( $20\text{--}120$  Гц), тож ризик резонансних явищ відсутній за розглянутих умов, а спрощена модель є адекватною для етапу ескізного проектування.

*Практичні рекомендації для конструкторів.* Оптимізацію варто починати з визначення висоти перерізу  $h$ . умови жорсткості (прогину), далі «підтягувати»  $b$  під умову міцності. Такий підхід забезпечує мінімізацію маси конструкції за заданих граничних критеріїв. У випадках, коли висота  $h$  досягає технологічної межі, варто очікувати стрімкого зростання маси. У таких ситуаціях доцільно переглянути  $\delta_{\max}$  або перейти на RHS, який забезпечує кращу ефективність при згині. Для забезпечення робастності конструкції рекомендовано орієнтуватися на перцентиль навантаження (наприклад, 95-й), що дає змогу досягти необхідного рівня надійності без складних стохастичних моделювань.

При використанні RHS-профілів слід перевіряти місцеву стійкість (співвідношення  $b/t$ ,  $h/t$ ), відповідність вимогам до зварних швів і доступність сортаменту. У типових вузлах рами профіль  $40 \times 60 \times 4$  мм часто забезпечує суттєве зменшення маси без втрати працездатності.

Контроль модальної поведінки конструкції передбачає утримання першої власної частоти  $f_1$  із запасом понад верхню межу робочих частот. За потреби слід збільшувати  $h$  або локально підсилювати вузли.

*Обмеження дослідження:* розглянута балкова модель (Ейлер–Бернуллі) без геометричної / матеріальної нелінійності та без складних комбінованих навантажень (крутіння, випадкові спектри). Перевірка втоми подана в межах методології, але без повного спектрального навантаження й без випробувальних даних конкретної рами.

*Перспективи подальших досліджень:*

1. Подальше розширення передбачає перехід до оптимізації порожнистих RHS-профілів з трьома змінними  $b$ ,  $h$ ,  $t$  з урахуванням норм місцевої стійкості, додавання зсуву / крутіння та критерію Мізеса для більш повного опису напружено-деформованого стану.

2. У напрямі робастної та багатокритеріальної оптимізації доцільно формувати цільову множину, що містить масу, запас міцності, собівартість, технологічність. Побудова Pareto-фронту дасть змогу враховувати невизначеності в параметрах  $F$ ,  $E$ ,  $\sigma_{\text{дон}}$  та допуски геометрії.

3. CAE-верифікація передбачає побудову твердотільної моделі вузла рами в середовищах ANSYS/COMSOL, перенесення оптимальних параметрів з MATLAB, FEM-валідація  $\sigma$ ,  $\delta$ ,  $f_1$ , локальних концентрацій, моделювання зварних швів і технологічних відхилень, порівняння з аналітичними формулами.

4. Автоматизація та інтеграція містять створення бібліотеки номограм/карт вибору ( $m\text{--}\sigma\text{--}\delta\text{--}f_1$ ) для швидкого добору перерізів, зв'язок MATLAB  $\leftrightarrow$  CAD/PLM для автоматичної генерації креслень і специфікацій з урахуванням каталожних розмірів.



Запропонована методика дає змогу отримувати конструктивно раціональні перерізи балок рам тракторів з мінімальною масою за заданих критеріїв працездатності, забезпечує прозору перевірку чутливості та робастності й легко масштабується до порожнистих профілів і більш складних умов навантаження. Інтеграція з інструментами FEM (ANSYS/COMSOL) формує завершений інженерний цикл «аналітика → оптимізація → верифікація», науково-дослідних і розробних робіт, зокрема, для практичного інженерного проектування.

#### *Список використаних джерел*

1. Математична теорія оптимальних процесів / Л. С. Понтрягін, В. Г. Болтянський, Р. В. Гамкрелідзе, Є. Ф. Міщенко. М. : Наука, 1976. 391 с.
2. Farkas J., Jarmai K. Optimum Design of Steel Structures. Berlin : Springer, 2008. 268 p. DOI: 10.1007/978-3-642-36868-4\_8
3. Williams A. Construction Management and Design of Industrial Concrete and Steel Structures. Boca Raton: CRC Press, 2015. 391 p. DOI: 10.1201/EBK1439815991
4. Рыбак Т. І., Сташків М. Я., Олексюк В. П., Анвар Махді. Підвищення ресурсу роботи тонкостінних елементів рами машини КС-6Б. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ». Сер. Гідравлічні машини та гідроагрегати*. 2022. № 1. С. 150–156.
5. Ярмак М. Оцінка впливу різноманітних форм рамної конструкції на її міцнісні якості. *Вісник машинобудування та САПР*. 2022. № 1. С. 145–153.
6. Wei W., Shen J., Yu H., Chen B., Wei Y. Optimization Design of the Lower Rocker Arm of a Vertical Roller Mill Based on ANSYS Workbench. *Applied Mechanics and Materials*. 2021. Vol. 11, No 21. P. 10408. DOI: 10.3390/app112110408
7. Balaguru S., Natarajan E., Ramesh S., Muthuvijayan B. Structural and Modal Analysis of Scooter Frame for Design Improvement. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 16. P. 1459–1464. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.340
8. Shen J. F., He Y. J., Yu Y. C. Frame Strength and Stiffness Analysis Based on ANSYS. *Journal of Mechanical Design*. 2015. P. 2038–2041. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.743.324
9. Liu L., Huang Z. Analysis on Intensity and Stiffness of Frame Based on ANSYS. *Journal of Shuzhou College*. 2008. Vol. 23, No 3. P. 143–147.
10. Huang G., Shen G., Huang C. Improvement on the Finite Element Analytical Model of Automobile Frame. *Journal of Machine Design*. 2007. Vol. 24, No 12. P. 176–178.
11. Wang W., Xin Y. Finite Element Modeling and Analysis for the Modals of Vehicle Frame. *Machine Design and Manufacturing*. 2009. No 11. P. 53–54.
12. Shang G. Y., Wang L., Liu M. Finite Element Analysis and Optimization of the Frame Strength in a Semi-Trailing Tractor. *Modern Manufacturing Technology & Equipment*. 2007. No 6. P. 39–41.
13. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering Analysis with ANSYS Software*. 2nd ed. Oxford : Elsevier, 2018. 562 p. DOI: 10.1016/C2016-0-02553-7
14. Huang T., Huang J. *Automotive Body Structure Design*. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006. 350 p.
15. Chen X., Yu X., Lin S. Calculation of Static Stiffness of Car Body and Optimization Analysis. *Automotive Technology*. 2004. No 1. P. 15–21.
16. Gao S., Shen Z., Zhang Q. Research on the Measures for Enhancing the Torsional Rigidity of Automotive Frames. *Automotive Engineering*. 1996. Vol. 18, No 2. P. 72–76.
17. Beevers A., Steidler S. M., Durodola J. Analysis of Stiffness of Adhesive Joints in Car Bodies. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 118, No 1. P. 95–100. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00827-6
18. Кондраг'єва Н. О., Дьоміна Н. А., Одновол Д. Г., Леонтьєва В. В. MATLAB – інструмент сучасної математичної підготовки інженерів. *Development of Modern Science: Experimental and Theoretical Research: Scientific Multidisciplinary Monograph*. Varna, 2025. P. 367–393.
19. Finite Element Analysis and Optimization of Tractor Gearbox Body under Various Working Conditions. 2020. URL: <https://www.bohrium.com/paper-details/finite-element-analysis-and-optimization-of-tractor-gearbox-body-under-various-kinds-of-working-conditions/817398256936943617-9354>



20. Larsen S. D., Sigmund O., Groen J. P. Optimal Truss and Frame Design from Projected Homogenization-Based Topology Optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2018. Vol. 57, No 4. P. 1461–1474. DOI: 10.1007/s00158-018-1948-9
21. Robust Topology Optimization of Frame Structures under Geometric or Material Properties Uncertainties: Preprint. 2021. URL: [https://www.researchgate.net/publication/316252194\\_Robust\\_topology\\_optimization\\_of\\_frame\\_structures\\_under\\_geometric\\_or\\_material\\_properties\\_uncertainties](https://www.researchgate.net/publication/316252194_Robust_topology_optimization_of_frame_structures_under_geometric_or_material_properties_uncertainties). DOI: 10.1007/s00158-017-1686-4
22. Kupiec M., Łodziński P. K. Robust Optimization of the Steel Single-Story Frame. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2020. Vol. 58, No 3. P. 545–556.
23. Structural Optimization of Hollow-Section Steel Trusses by Differential Evolution Algorithm: Preprint. 2019. URL: [https://www.researchgate.net/publication/392885776\\_Optimization\\_of\\_Hollow-Section\\_Steel\\_Beams\\_Through\\_Algorithm-Aided\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/392885776_Optimization_of_Hollow-Section_Steel_Beams_Through_Algorithm-Aided_Design).
24. Mercy J. R., Stephen S. E. A., Edna K. R. J. Design Optimization of a Hollow Shaft through MATLAB and Simulation Using ANSYS. Coupled Systems Mechanics. 2022. Vol. 11, No 3. P. 259–266. DOI: 10.12989/csm.2022.11.3.259
25. Design Optimization of a Welded Beam – MATLAB & Simulink 2020. URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/multiobjective-optimization-welded-beam.html>
26. Ray T., Liew K. M. The Particle Swarm Metaphor for Multidisciplinary Design Optimization. Engineering Optimization. 2002. Vol. 34, No 2. P. 141–153. DOI: 10.1080/03052150210756
27. Опір матеріалів: підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський; за ред. Г. С. Писаренка. Київ : Вища школа, 1993. 655 с.
28. Дуганець В. І., Федірко П. П., Оленюк О. А. Комп'ютерне моделювання напружень і деформацій у робочих органах під час польових умов експлуатації. Подільський вісник: с.-г., техн., екон. науки. 2025. Вип. 46. С. 35–42. DOI: 10.37406/2706-9052-2025-1.35
29. Liang H., Zhao W., Ahmed A. Numerical and Robust Optimization of Structural Beam Elements Using MATLAB Environment. American Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2025. Vol. 9, No 1. P. 1–8. DOI: 10.11648/j.ajmme.20250901.11
30. Goodman J. Mechanics Applied to Engineering. 9th ed. London: Longmans, Green, 1930. 657 p.
31. Soderberg C. R. Working Stresses. Transactions of the ASME. 1930. Vol. 52, No APM-52-2. P. 13–28.
32. Galambos T. V., Surovek A. E. Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2008. 393 p. DOI: 10.1002/9780470276853

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



**D. Odnovol, A. Dyadenchuk**  
**Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University**

**OPTIMIZATION OF TRACTOR FRAME BEAM DIMENSIONS  
IN MATLAB ENVIRONMENT: ANALYTICAL, NUMERICAL,  
AND ROBUST APPROACHES FOR SOLID  
AND HOLLOW CROSS-SECTIONS**

*Summary*

This study presents an integrated analytical, numerical, and robust optimization framework for determining the optimal geometric dimensions of tractor frame beam elements within the MATLAB computational environment. The problem is formulated as a nonlinear programming (NLP) task aimed at minimizing beam mass under dual constraints of strength and stiffness, expressed via maximum bending stress and allowable deflection limits. The analytical solution, derived from Euler–Bernoulli beam theory, was validated using the Sequential Quadratic Programming (SQP) algorithm implemented through MATLAB's `fmincon` function, demonstrating excellent convergence and consistency between analytical and numerical results.



A series of parametric and sensitivity analyses were conducted to evaluate the influence of allowable deflection, external load magnitude, and geometric bounds on the optimal beam dimensions. The results indicate that stiffness constraints dominate mass minimization, and tightening the deflection limit leads to a nonlinear increase in beam height and overall weight. Robust optimization was performed using the Monte Carlo simulation method to account for stochastic variations in load and material properties ( $\pm 20\%$ ). It was found that achieving 95 % reliability requires approximately a 20 % increase in beam width, resulting in a comparable rise in mass.

Additionally, solid rectangular sections were compared with hollow rectangular (RHS) profiles, demonstrating that the latter can achieve a 20–25 % reduction in mass while maintaining equivalent stress and deflection levels. Fatigue verification based on the Goodman–Soderberg criteria confirmed that the optimized beam design ensures sufficient endurance under variable cyclic loading. A lateral-torsional buckling (LTB) check revealed that the critical bending moment exceeds the applied moment by more than an order of magnitude, ensuring global stability.

The proposed methodology offers a unified MATLAB-based approach that integrates analytical modeling, numerical optimization, and probabilistic robustness assessment. It serves as a practical decision-support tool for engineers engaged in designing lightweight and durable structural components of agricultural machinery and tractor frames, contributing to energy efficiency and material savings in modern agro-industrial engineering.

**Keywords:** structural optimization; MATLAB, nonlinear programming, strength and stiffness, robust optimization, fatigue durability, beam stability, tractor frame structure, hollow profile, finite element method.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-14>

УДК 631.234:635.64+578

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-8510-7146

В. Ф. Ялпачик, д-р. техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-0349-2448

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, ст. викл.

ORCID: 0000-0002-4974-5201

О. О. Червоткіна, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

О. П. Прокопенко, асистент

ORCID: 0009-0005-7304-923X

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: nadiia.palianychka@tsatu.edu.ua

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПЛОДІВ ПІД ЧАС ХОЛОДИЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ

*Анотація.* У статті представлено результати дослідження найбільш ефективних технічних рішень та засобів контролю якості плодоовочевої продукції до охолодження та під час її зберігання, з урахуванням фізичних показників стану плодів. Установлено, що підвищення точності контролю можливе шляхом визначення вмісту соку за допомогою послідовного вимірювання тиску всередині плоду. Наведено конструктивні особливості та описано принцип роботи пристрою для визначення гідростатичного тиску в плодах. Додатково запропоновано метод контролю якості продукції, що базується на покроковому вимірюванні зміни електричного опору в плодах, занурених в електроліт. Порівняння отриманих результатів із даними традиційних методів підтвердило ефективність і доцільність використання розроблених технологічних рішень та приладів.

*Ключові слова:* плодоовочева продукція, зберігання, якість, пристрій, метод контролю, плоди, вимірювання.

*Постановка проблеми.* Тривале зберігання плодоовочевої продукції зі збереженням якості залишається однією з ключових проблем післязбиральної логістики та харчової промисловості. На півдні України сезон активного плодоношення триває орієнтовно три місяці й зазвичай завершується в середині жовтня, що зумовлює потребу в технологіях, здатних мінімізувати втрати під час міжсезонного постачання [1; 2]. Саме тому впровадження сучасних технологій, які забезпечують уповільнення мікробного псування, збереження структури тканин, оптимальний газовий режим і контроль температури, має стратегічне значення для зменшення втрат та продовження термінів реалізації плодоовочевої продукції. Додатково важливим чинником є також контроль якісних показників продукції протягом зберігання. Тож актуальним питанням залишається встановлення оптимальних методів та апаратів для визначення якості плодоовочевої продукції під час зберігання.

*Аналіз останніх досліджень.* Протягом останніх років науковці суттєво просунулися у вивченні фундаментальних та прикладних аспектів холодильного оброблення під час зберігання плодоовочевої продукції [3–8]. Наразі для контролю стану та визначення якісних характеристик фруктів і овочів застосовують різні прилади та методи оцінювання.

Прилад «Хориспект» застосовується для оцінювання якості плодів за кольором м'якоті. У його конструкцію входять: джерело світла, збирна лінза, пара інтерференційних світлофільтрів, світлова щілина, інтегрувальна сфера (кулі типу Ульбрихта), фотоелемент, пульт керування та блок живлення. Принцип роботи базується на тому, що модифікований світловий потік проходить крізь зразок і потрапляє на фотоелемент, а отримана вихідна напруга має кореляцію з показниками якості плодів. До недоліків такого обладнання належать обмежена точність та значна тривалість проведення вимірювань.



Для визначення електрофізичних характеристик фруктів і овочів використовують спеціальний вимірювальний пристрій, до складу якого входять: генератор, міст опору, мілівольтметр, омметр та вимірювальна комірка. Зразок розміщують у комірці, після чого за показниками приладів і розрахунковими формулами визначають питомий електричний опір, значення якого тісно пов'язане з фізіологічним станом продукту [3]. Основним недоліком обладнання є недостатня точність, оскільки під час вимірювань не враховують температурні зміни середовища та самого об'єкта аналізу.

Ще одним технічним засобом для контролю якості плодоовочевої продукції є система, до складу якої входять конвеєрний механізм, фотодатчик, вимірювальний модуль зі схемою фіксації браку, газоаналізатор та маркувальний блок, оснащений датчиком швидкості руху продукції [4]. Основні недоліки цієї установки полягають у тому, що вона не забезпечує оцінювання якості всієї партії за репрезентативною вибіркою та не може ефективно застосовуватися в польових умовах.

Для оцінювання ступеня стиглості та якості кавунів застосовують ударний пристрій, робота якого базується на аналізі затухання звукової хвилі. Конструктивно він складається з пластикового циліндричного корпусу, соленоїда, п'єзоелектричного датчика та джерела живлення на 24 В. За отриманими осцилограмами виконують розклад у ряд Фур'є та визначають коефіцієнт затухання, значення якого має чіткий зв'язок зі зрілістю плода [5]. До недоліків такого обладнання належать значна тривалість вимірювань, складність обробки сигналів і, відповідно, відсутність можливості оперативного отримання результатів.

За даними різних авторів [6–8], хімічний склад персиків характеризується такими показниками: вуглеводи становлять близько 77 %, частка білків і клітковини – по 6,7 %, мінеральних речовин – приблизно 4,4 %. Кислотність соку перебуває в межах 3,2–5,0 %, вміст фруктози становить 3,9–4,4 %, глюкози – 4,2–6,9 %, сахарози – 4,8–10,7 %, загальна кислотність – 0,2–1,0 %, а кількість води сягає 80–87 %. Варто підкреслити, що серед плодоовочевої продукції, яку зберігають шляхом охолодження, персики відрізняються одним із найвищих рівнів вологи та вільних кислот, тоді як питома теплоємність сухої речовини є однією з найнижчих і становить 1397 Дж/(кг · К). Значна частка водорозчинних вітамінів, зокрема вітаміну С (5–10 мг %), ускладнює забезпечення стабільної харчової та біоенергетичної цінності під час зберігання.

На відміну від коренеплодів, бульбоплодів і зерняткових фруктів, повноцінна технологія тривалого зберігання персиків досі не сформована. Найдоступнішим і найбільш екологічно безпечним способом, описаним у наукових джерелах, є зберігання в модифікованому газовому середовищі. Проте навіть цей метод дає змогу уповільнювати псування плодів лише протягом приблизно двох місяців [6].

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою цієї роботи є дослідження та визначення найбільш ефективних технологічних рішень і приладів для контролювання якості плодоовочевої продукції до охолодження та в процесі зберігання. Для досягнення поставленої мети необхідно реалізувати комплекс взаємопов'язаних завдань, серед яких:

- установа теплових та електрофізичних параметрів плодів;
- визначення строків дозрівання, добір і сортування плодів, придатних до тривалого зберігання, з використанням об'єктивних методів контролю та спеціалізованого обладнання;
- добір оптимальних режимів зберігання на основі отриманих характеристик та проведеного попереднього сортування;
- удосконалення контролю якості плодоовочевої продукції шляхом визначення вмісту соку за результатами послідовного вимірювання тиску всередині плода з використанням трубки температурної десорбції та напівпровідникового детектора, а також подальшої математичної обробки даних, що дає змогу підвищити точність оцінювання фізіологічного стану продукції під час зберігання.

*Основна частина.* Для оцінювання стану плодоовочевої продукції під час зберігання визначають уміст соку, здійснюючи послідовні вимірювання тиску всередині плода за допомогою трубки температурної десорбції та напівпровідникового детектора, після чого отримані дані проходять математичну обробку [9].

Досліджуваний плід фіксують і стискають за допомогою порожнистого еластичного елемента, всередині якого використовується повітря або азот високого ступеня очистки. Цей елемент може змінювати свій об'єм шляхом нагнітання або випускання газу. Повітряний насос подає газ у стискальний елемент, а датчик тиску фіксує отримані значення. Аналого-цифровий перетворювач переводить результати вимірювань у цифровий формат і формує сигнал тиску. Пристрій керування виконано у вигляді контролера, який розраховує поточне значення тиску в еластичній оболонці та подає керівний сигнал на систему стравлювання газу.

Для практичної реалізації запропонованого методу створено пристрій для визначення гідростатичного тиску в плодах [9]. Вимірювання гідростатичного тиску здійснюється за допомогою спеціально сконструйованого приладу, що містить сталеву трубку 5 з отворами 6 по всій довжині та діаметру, плоску гумову трубку 1 із застібкою на липучці, ручний повітряний насос 2 та манометр 3 (рис. 1).

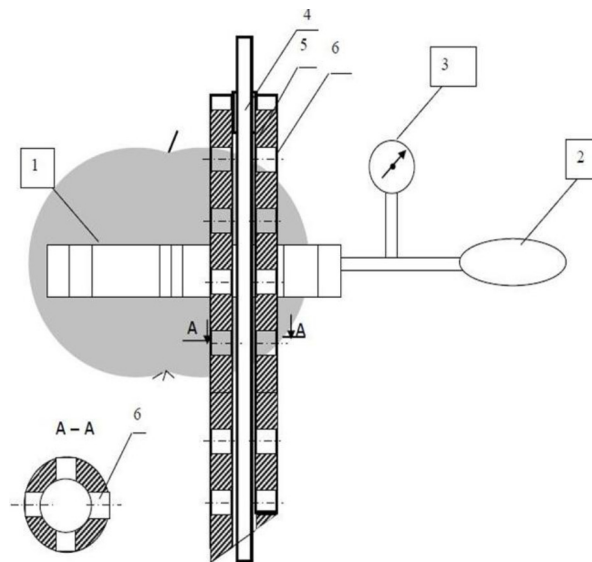


Рис. 1. Пристрій для вимірювання тиску з метою контролю якості плодоовочевої продукції:

1 – плоска гумова трубка; 2 – ручний насос для подачі повітря; 3 – манометр; 4 – шомпол; 5 – сталевая трубка з системою отворів; 6 – отвір

Процедура вимірювання тиску здійснюється так: сталеву трубку проколюють плід так, щоб її верхній та нижній кінці виходили за межі фрукту. Після цього канал трубки очищають за допомогою спеціального шомпола 4 й очікують, доки витікання соку повністю припиниться.

Після припинення виділення соку плід обгортають плоскою гумовою трубкою 1, яку фіксують на поверхні за допомогою липучки. Далі за допомогою насоса 2 поступово підвищують тиск, який передається на плід. У момент появи першої краплі соку з отвору манометр 3 фіксує значення тиску. Це показання відповідає гідростатичному тиску всередині плода. Експериментальні випробування проводили для баклажанів, кабачків, томатів, яблук та персиків.

Додатково запропоновано метод контролю якості плодоовочевої продукції, який передбачає поетапне вимірювання зміни електричного опору в діапазоні частот змінного струму від 1 до 100 кГц у плоді, зануреному в електроліт. Після цього обчислюють математичне очікування електричного опору та визначають фізіологічний стан плоду за відхиленням отриманого



поточного значення від розрахункового. Вимірювання функції зміни опору проводять у вертикальній та горизонтальній площинах, а оцінювання стану плоду здійснюють за величиною відхилення від математичного очікування в обох осях [10].

Досліджуваний плід фіксують за допомогою прищипок уздовж вертикальної осі (для зерняткових культур – уздовж напрямку насінневої камери) та занурюють в електропровідний розчин між двома стаціонарно встановленими електродами. Під час повороту плоду на  $360^\circ$  реєструють зміну електричного опору, після чого визначають математичне очікування опору і оцінюють стан плоду за величиною відхилення поточного значення. Після завершення першого вимірювання плід закріплюють у положенні, перпендикулярному попередній осі, та проводять повторний експеримент.

Отже, вимірювання зміни електричного опору у двох взаємно перпендикулярних площинах дає змогу виявляти ділянки пошкодження тканин, розташовані поблизу або безпосередньо на осях обертання, а також визначати нерівномірність розподілу крохмалю. Цей показник тісно корелює з фізіологічним станом плодів, оскільки в процесі дозрівання нагромадження крохмалю відбувається у двох напрямках: вертикально – від плодоніжки до насінневої камери, та горизонтально – від периферійних паренхімних тканин під шкіркою до центру. Тканини з високим умістом крохмалю мають більший питомий електричний опір, тому під час дозрівання спостерігаються зміни електричного опору залежно від напрямку прикладеного електричного поля. У пошкоджених ділянках уміст крохмалю знижений, відповідно й електричний опір менший порівняно зі здоровими тканинами. Поворот плоду або бульби відносно стаціонарно розташованих електродів забезпечує точне позиціонування у взаємоперпендикулярних осях та підвищує достовірність оцінювання їх стану.

Для зерняткових культур встановлено такі критерії оцінювання: якщо відхилення поточного значення електричного опору від математичного очікування хоча б за однією з осей перевищує 2 %, плід класифікують як пошкоджений. Фрукти вважають такими, що досягли знімальної стиглості, коли для перпендикулярної осі кожне з відхилень опору перебуває в межах 5–7 %.

Для овочевої продукції критерієм оцінювання є таке правило: якщо відхилення поточного значення електричного опору від математичного очікування за однією або обома осями перевищує 2 %, бульбу вважають пошкодженою.

Для практичного впровадження запропонованого методу створено сканувальний пристрій для контролю якості плодової та овочевої продукції. Конструктивно він містить генератор, міст опору, омметр і вимірювальну комірку. Остання виконана у вигляді ємності, заповненої електролітом зі стаціонарно встановленими в ньому електродами та закривається кришкою. Дно, кришка та бічні стінки комірки оснащені пазами, у яких розміщено прищипки у двох взаємно перпендикулярних площинах. Пристрій обладнано електроприводом і мікропроцесорним блоком з дисплеєм для реєстрації результатів [9].

Технічна ідея та принцип дії запропонованої конструкції пояснюються на рис. 2, де наведено схему пристрою контролю якості плодовоовочевої продукції та будову вимірювальної комірки.

Система контролю якості плодової та овочевої продукції містить такі основні вузли: генератор 1, міст опору 2, вимірювальну комірку 3, омметр 4, мікропроцесорний блок 5 та електропривод 6. Генератор 1 електрично з'єднано з мостом опору 2, до якого підключено вимірювальну комірку 3. Вона, своєю чергою, зв'язана з омметром 4, від якого електричні сигнали передаються на мікропроцесор 5. Також до вимірювальної комірки 3 під'єднано електропривод 6.

Вимірювальна комірка виконана у вигляді ємності 7 з кришкою 8. Усередині електроліту розташовано два електроди 9. Конструкція оснащена спеціальними прищипками 10, які встановлюються в пази 11, що дає змогу обертати плід 12 у двох взаємно перпендикулярних площинах.

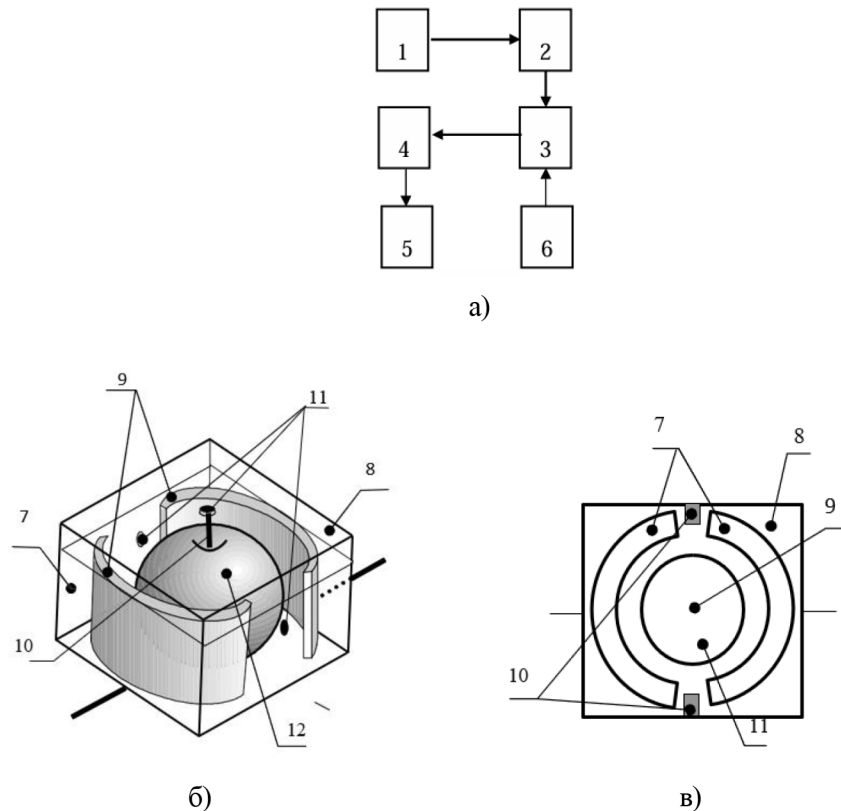


Рис. 2. Пристрій для контролю якості плодоовочевої продукції:

а) електрична схема підключення: 1 – генератор; 2 – міст опору; 3 – вимірювальний осередок; 4 – омметр; 5 – мікропроцесорний блок; 6 – електропривод; б) аксонометричне зображення вимірювальної комірки з яблуком; в) вигляд зверху: 7 – ємність; 8 – кришка; 9 – електроди; 10 – прищіпки; 11 – пази; 12 – плід

Технологічна послідовність роботи пристрою для експрес-оцінювання придатності плодової та овочевої продукції до заморожування полягає в такому. Генератор 1 та вимірювальну комірку 3 під'єднують до моста опору 2 за допомогою електричних дротів. Далі вимірювальну комірку 3 електрично з'єднують з омметром 4, після чого у комірку, використовуючи прищіпки 10 та пази 11, розташовані на кришці 8 та дні ємності 7, фіксують плід 12. Після увімкнення генератора 1 чекають установлення сталого значення опору на омметрі 4, після чого активують електропривод 6 і виконують вимірювання під час обертання плоду навколо його вертикальної осі. Отримані дані проходять математичну обробку, а результати відображаються на дисплеї мікропроцесора 5. Далі, використовуючи пази 11 та прищіпки 10 на стінках комірки 4, плід 12 закріплюють у положенні, перпендикулярному попередній осі, після чого генератор 1 та електропривод 6 знову вмикають і виконують повторне вимірювання.

Отримані результати порівнюють із табличними даними, сформованими на основі попередніх експериментів. Під час цих випробувань проводили паралельний контроль якості плодоовочевої продукції: традиційними методами та за допомогою запропонованого пристрою. У процесі перевірки встановлено, що результати оцінювання якості плодоовочевої продукції, отримані за допомогою запропонованих пристроїв, повністю збігаються з даними, отриманими традиційними методами. Це підтверджує доцільність й ефективність використання розроблених технічних засобів та методик для контролю якості плодоовочевої продукції під час холодильного зберігання.

**Висновки.** Проблема тривалого зберігання плодів й овочів залишається актуальною через їх високу чутливість до механічних впливів та температурних коливань, а також через особли-

вості хімічного складу, дихальних процесів і фізико-механічних характеристик, що ускладнюють збереження товарних властивостей та харчової цінності. Запропоновано метод визначення якості плодів за показником умісту соку, що передбачає послідовне вимірювання тиску всередині плоду з використанням трубки температурної десорбції та напівпровідникового детектора. Розроблено конструкцію відповідного пристрою та експериментально підтверджено його працездатність на зразках баклажанів, кабачків, томатів, яблук і персиків. Додатково запропоновано метод оцінювання якості плодів та овочів шляхом поетапного вимірювання електричного опору в плодах, занурених в електроліт. Експериментальні дослідження, проведені на яблуках, підтвердили чутливість методу до змін фізіологічного стану продукції. Порівняння результатів, отриманих за допомогою нових пристроїв, із даними традиційних методів контролю показало їх повну узгодженість, що свідчить про достовірність та точність запропонованих технологічних рішень. У подальшому планується проведення випробувань у виробничих умовах для визначення практичної ефективності та доцільності впровадження розроблених пристроїв на підприємствах, що спеціалізуються на холодильному зберіганні плодоовочевої продукції.

#### Список використаних джерел

1. Duan Y., Wang L., Sun D. Postharvest precooling of fruit and vegetables: A review. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 100. P. 278–291.
2. Кюрчев С. В., Верхоланцева В. О., Паляничка Н. О. Ефект зберігання ягід після застосування холоду. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. 2022. Вип. 13. Том 1.
3. Tang S., Li H., Zhao X. Effect of different postharvest pre-cooling treatments on quality of horticultural crops. *Food Science and Technology*, 2024.
4. Li T., Chen W., Huang P. Impact of on-site cold storage on post-harvest losses in fruit supply chains. *International Journal of Refrigeration*. 2025. 146420.
5. UC Davis Postharvest Technology Center. Stonefruit: Internal Breakdown (Chilling Injury). University of California, 2023.
6. Albornoz K., Ramirez M., Pérez D. Dissecting postharvest chilling injury through biotechnology. *Postharvest Biology and Technology*, 2022.
7. Кюрчев С. В., Верхоланцева В. О., Паляничка Н. О. Дослідження холоду при зберіганні ягід Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання. ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, Т. 2. С. 46–53.
8. Ivanova I., Serdiuk M., Malkina V., Tonkha O., Tsyz O., Shkinder-Barmina A., Verkholtantseva V., Palianychka N., Mushtruk M., Rozbytka T. Factorial analysis of taste quality and technological properties of cherry fruits depending on weather factors. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. Slovakia, 2022. Vol. 16. P. 341–355.
9. Ялпачик В. Ф. Нові методи контролю якості плодів при зберіганні холодом. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2013. Вип.13. Том 7. С. 3–10.
10. Ялпачик В. Ф. Теплофізичні характеристики гарбузів, кабачків, кукурудзи молочної спілості, солодкого перцю та їх прогнозування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2014. Вип.14. Том 2. С. 55–60.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**N. Palianychka, V. Yalpachyk, A. Kovalov, O. Chervotkina, O. Prokopenko**  
**Dmytro Motornyi Tavrria State Agrotechnological University**

## **INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR FRUIT QUALITY CONTROL DURING REFRIGERATED STORAGE**

### *Summary*

The article presents a study of the most effective technological solutions and devices for controlling the quality of fruit and vegetable products before cooling and during storage depending on physical indicators. The problem of long-term storage of fruits and vegetables remains relevant due to their high sensitivity to mechanical influences and temperature fluctuations, as well as due to the peculiarities of the chemical composition, respiratory processes and physical and mechanical characteristics that complicate the preservation of marketable properties and nutritional value. Based on the analysis, it was established that the efficiency of post-harvest storage of fruit and vegetable products can be increased by using modern methods of controlling its physiological state at all stages of storage. A method for determining fruit quality by the juice content indicator is proposed, which involves sequential measurement of pressure inside the fruit using a temperature desorption tube and a semiconductor detector. The design of the corresponding device was developed and its performance was experimentally confirmed on samples of eggplants, zucchini, tomatoes, apples and peaches. Additionally, a method for assessing the quality of fruits and vegetables by step-by-step measurement of electrical resistance in fruits immersed in electrolyte was proposed. Experimental studies conducted on apples confirmed the sensitivity of the method to changes in the physiological state of the product. Comparison of the results obtained using new devices with data from traditional control methods showed their full consistency, which indicates the reliability and accuracy of the proposed technological solutions. It was established that new methods allow reducing the time of quality control due to increased automation of the process and minimization of manual operations.

**Keywords:** fruit and vegetable products, storage, quality, device, control method, fruits, measurements.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-15>

УДК 621.225.001.4

А. І. Панченко<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина<sup>1</sup>, д-р. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

О. С. Ковязін<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

І. А. Панченко<sup>1</sup>, асистент

ORCID: 0000-0003-2150-4278

А. А. Волошин<sup>2</sup>, викладач спецдисцип.

ORCID: 0009-0004-3850-7613

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> ВСП «Мелітопольський фаховий коледж Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного»

e-mail: voloshinaa2012@gmail.com

## ЗМІНА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ З ПЛАНЕТАРНИМИ ГІДРОМОТОРАМИ ЗА РІЗНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Анотація.* На сьогоднішній день актуальним завданням є створення самохідних машин спеціального призначення (дорожніх, будівельних, сільськогосподарських тощо) підвищеної мобільності. Для покращення функціональних параметрів мехатронних систем самохідних машин із гідравлічним приводом ходової частини проведені експериментальні дослідження мехатронної системи самохідної машини з гідравлічним приводом ходової частини з регульованим насосом та мехатронними модулями на базі планетарних гідромоторів та обґрунтуванні раціональні режими експлуатації регульованого насоса та планетарних гідромоторів, що покращують функціональні параметри мехатронної системи самохідної машини з гідравлічним приводом мехатронних модулів (мотор-коліс) на базі планетарних гідромоторів.

*Ключові слова.* мехатронна система, гідравлічний привід, мехатронний модуль, планетарний гідромотор, регульований аксіально-поршневий насос, функціональні параметри.

*Постановка проблеми.* На сьогоднішній день актуальним завданням є створення самохідних машин спеціального призначення підвищеної мобільності (сільськогосподарських, комунальних, дорожніх, будівельних тощо). Під мобільністю самохідної техніки мається на увазі здатність пересуватись і маневрувати на місцевості при виконанні відповідної технологічної операції з максимальним (постійним) відбором потужності від ведучого двигуна. Одним з основних факторів, що визначають покращення показників мобільності машини, є вдосконалення характеристик мехатронних систем ходової частини самохідної техніки, що має виражену тенденцію до використання гідравлічних безступінчастих трансмісій [1–3]. Використання мехатронних модулів на базі планетарних гідромоторів у трансмісіях цього типу дає змогу відмовитися від традиційного компонування ходових частин самохідної техніки, а також використовувати активні причіпні модулі з провідними осями [4; 5]. Тому дослідження зміни вихідних характеристик мехатронних систем з гідравлічним приводом ходової частини самохідної техніки, залежно від умов експлуатації, є актуальним завданням.

*Аналіз останніх досліджень.* Аналіз проведених досліджень показав [6; 7], що мобільність самохідних машин може бути істотно підвищена при використанні в ходовій частині мехатронної системи з гідравлічним приводом. Така мехатронна система, як правило, представлена насосом та гідромоторами [8]. Особлива увага приділена системам гідравлічного приводу, які використовують в автомобільних трансмісіях. Наведено результати моделювання повних приводних циклів на прикладі муфти повного приводу з електрогідравлічним приводом [9]. Запро-



поновано математичні моделі процесів, що відбуваються в насосі та гідромоторі, що описують статичні та динамічні властивості мехатронної системи. Проведено випробування мехатронної системи з двома моделями: одна спрощена, що містить константи ефективності, а інша розширена з різними значеннями ефективності. Недоліком такої мехатронної системи є малий діапазон зміни навантажувального передавального відношення та обов'язкове застосування бортових редукторів із великим передатним числом. Це ускладнює конструкцію трансмісії загалом, роблячи її більш трудомісткою, дорогою у виготовленні та менш надійною в експлуатації.

Застосування в складі мехатронних систем із гідравлічним приводом ходової частини самохідних машин – планетарних гідромоторів – викликає необхідність дослідження зміни функціональних характеристик мехатронних систем [10]. Розглянуто динамічні характеристики гідравлічного приводу мехатронних систем із гідромашинами планетарного типу. Обґрунтовано конструктивні особливості їх системи роторів [11] та системи розподілу робочої рідини [12; 13]. Наведено конструктивні особливості планетарних гідромоторів серії ПРГ потужністю від 8 кВт до 33 кВт, що призначені для гідрофікації приводів активних робочих органів та ходових систем сільськогосподарської, будівельної, дорожньої та іншої мобільної техніки [14]. Не досліджено зміну функціональних параметрів мехатронних систем із гідравлічним приводом мехатронних модулів ходової частини самохідної техніки на базі планетарних гідромоторів залежно від умов експлуатації.

З огляду на це, роботу присвячено визначенню впливу умов експлуатації самохідної техніки на зміну функціональних параметрів їх мехатронних систем з гідравлічним приводом мехатронних модулів на базі планетарних гідромоторів.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Підвищення мобільності самохідної техніки шляхом покращення функціональних параметрів їх мехатронних систем із гідравлічним приводом мехатронних модулів на базі планетарних гідромоторів.

Для покращення функціональних параметрів мехатронних систем самохідних машин із гідравлічним приводом ходової частини необхідно: провести експериментальні дослідження мехатронної системи самохідної машини з гідравлічним приводом ходової частини з регульованим насосом та мехатронними модулями на базі планетарних гідромоторів; обґрунтувати раціональні режими експлуатації регульованого насоса та планетарних гідромоторів, що покращують функціональні параметри мехатронної системи з гідравлічним приводом мехатронних модулів ходової частини самохідної машини.

*Основна частина.* Для дослідження впливу експлуатаційних умов на зміни функціональних характеристик мехатронної системи з гідравлічним приводом ходової частини самохідної техніки розроблено методичні рекомендації щодо проведення експериментальних досліджень. Методичні рекомендації містять методику визначення кількості повторюваності дослідів, методику вимірювання вихідних (вхідних) параметрів гідромашин, що входять до складу мехатронної системи [5; 15]. Під експлуатаційними умовами (режимами експлуатації) мехатронної системи в роботі розуміється змінне навантаження в приводі ходової частини самохідної техніки й частота обертання рушіїв (коліс), що змінюється. Зміна навантаження в гідроприводі ходової системи в умовах експлуатації характеризується перепадом тиску  $\Delta p$  робочої рідини.

Досліджувана мехатронна система самохідної техніки з гідравлічним приводом мехатронних модулів ходової частини складається з регульованого насоса та двох мехатронних модулів (мотор-коліс) на базі планетарних гідромоторів. Регульований аксіально-поршневий насос має вбудовану конструкцію запобіжних клапанів та робочий об'єм 89 см<sup>3</sup>.

Виконавчою ланкою досліджуваної мехатронної системи є мехатронний модуль (мотор-колесо) на базі планетарного гідромотора, представленого уніфікованим рядом з робочими обсягами – 160, 320 та 630 см<sup>3</sup> [5; 15].



Мехатронна система має регулятор, що забезпечує роботу двигуна (ДВЗ) самохідної машини в режимі постійної потужності. Потужність насоса підтримувалася постійною шляхом зміни параметра регулювання насоса  $e_1$  та при зміні навантаження визначається перепадом тиску  $\Delta p$  робочої рідини в гідроприводі мехатронної системи.

Так, потужність на валу насоса визначається виразом:

$$N_1 = k \cdot \Delta p \cdot e_1 \cdot n_1 = \text{const}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $n_1$  – частота обертання вала насоса.

При розрахунковому діапазоні навантаження ходової системи (трансмисії)  $D = 2$ , параметр регулювання насоса змінюється в межах  $e_1 = 0,5 \dots 1,0$ , а перепад тиску –  $\Delta p = 0,5 \cdot \Delta p_{\text{ном}} \dots \Delta p$ . При цьому справедливий вираз  $\Delta p \cdot e_1 = 0,5 \cdot \Delta p_{\text{ном}} = \text{const}$ . У цьому разі потужність на валу насоса дорівнює:

$$N_1 = 0,5 \cdot k \cdot \Delta p_{\text{ном}} \cdot n_1, \quad (2)$$

де  $\Delta p_{\text{ном}}$  – номінальний перепад тиску в мехатронній системі.

При зміні навантажувального діапазону трансмісії до  $D = 3$  параметр регулювання насоса змінюється в межах  $e_1 = 0,33 \dots 1,0$ , а перепад тиску –  $\Delta p = 0,33 \cdot \Delta p_{\text{ном}} \dots \Delta p$ . При цьому справедливий вираз  $\Delta p \cdot e_1 = 0,33 \cdot \Delta p_{\text{ном}} = \text{const}$ , а потужність на валу насоса в цьому випадку дорівнює:

$$N_1 = 0,33 \cdot k \cdot \Delta p_{\text{ном}} \cdot n_1. \quad (3)$$

При експлуатації самохідної техніки частота обертання вала ДВЗ (дизеля) підтримувалася постійною за допомогою всережимного регулятора. Це дало змогу дослідити зміну вихідних характеристик гідроприводу мехатронної системи при двох фіксованих значеннях частоти обертання провідного вала насоса (1500 та 2500  $\text{хв}^{-1}$ ).

Відомо [15], що зі збільшенням параметра регулювання насоса  $e_1$ , об'ємний  $\eta_{v1}$ , гідромеханічний  $\eta_{hm1}$  та загальний  $\eta_1$  ККД насоса збільшуються. Аналіз виконаних за розробленою методикою [3] експериментальних досліджень дає змогу укласти, що при зміні параметра регулювання насоса  $e_1$  в межах від 0,5 до 1,0, об'ємний  $\eta_{об1}$ , гідромеханічний  $\eta_{зм1}$  і загальний  $\eta_1$  ККД насоса змінюються в невеликих межах від 0,5 % до 1,5 %. При проведених дослідженнях імітація зміни навантаження під час руху пересіченою місцевістю в гідроприводі мехатронної системи ходової частини самохідної техніки здійснювалася шляхом зміни перепаду тиску робочої рідини в досить великому діапазоні (7...21 МПа). Необхідно також відзначити, що в усьому діапазоні зміни параметра регулювання насоса  $e_1$ , збільшення частоти обертання вала насоса  $n_1$  призводить до незначного (до 3 %) підвищення об'ємного  $\eta_{об1}$  ККД (рис. 1, а). При збільшенні частоти обертання  $n_1$  вала насоса з 1500  $\text{хв}^{-1}$  до 2500  $\text{хв}^{-1}$ , гідромеханічний  $\eta_{зм1}$  (рис. 1, б) та загальний  $\eta_1$  (рис. 1, в) ККД насоса знижуються, змінюючись в діапазоні 2–11 %.

Збільшення навантаження на ходову систему самохідної техніки викликає підвищення перепаду тисків  $\Delta p$  у досліджуваній мехатронній системі, що призводить до зменшення об'ємного  $\eta_{об1}$  ККД на 5...20 % (рис. 2, а). Зменшення параметра регулювання насоса  $e_1$  від 1,0 до 0,18, викликане зміною навантаження, так само значно впливає на зменшення об'ємного ККД  $\eta_{об1} = 0,99 \dots 0,8$  та підвищення гідромеханічного  $\eta_{зм1}$  (рис. 2, б) ККД насоса. При цьому зі збільшенням перепаду тисків  $\Delta p$  у мехатронній системі від 7 МПа до 21 МПа та при зміні параметра регулювання насоса  $e_1$  від 0,5 до 1,0, загальний ККД насоса  $\eta_1$  залишається майже незмінним (рис. 2, в). Необхідно відзначити, що збільшення частоти обертання вала насоса  $n_1$  призводить до зменшення гідромеханічного  $\eta_{зм1}$  (рис. 2, б) та загального  $\eta_1$  ККД насоса (рис. 2, в). При цьому об'ємний ККД  $\eta_{об1}$  насоса незначно підвищується (рис. 2, а). Зниження параметра регулювання насоса ( $e_1 < 0,5$ ) призводить до зменшення загального  $\eta_1$  ККД.

При зміні параметра регулювання насоса в діапазоні  $e_1 = 0,5 \dots 1,0$  при частоті обертання двигуна 2500  $\text{хв}^{-1}$  загальний ККД насоса  $\eta_1$  майже не змінюється і становить  $\eta_1 = 0,86 \dots 0,88$

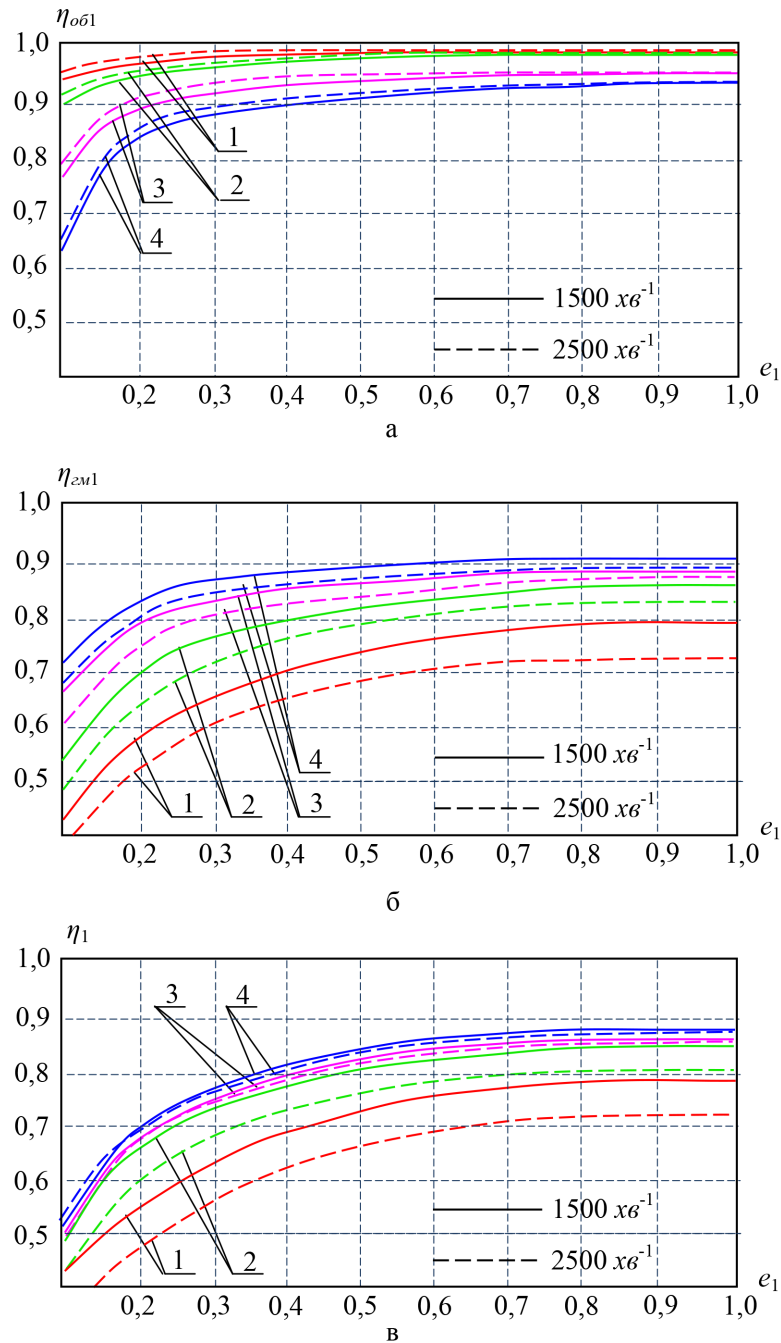


Рис. 1. Залежність зміни ККД насоса від параметра регулювання насоса  $e_1$ :

$a$  – об’ємного  $\eta_{об1}$ ;  $б$  – гідромеханічного  $\eta_{гм1}$ ;  $в$  – загального  $\eta_1$ ; 1 –  $\Delta p = 3,5$  МПа; 2 –  $\Delta p = 7$  МПа; 3 –  $\Delta p = 14$  МПа; 4 –  $\Delta p = 21$  МПа

(рис. 3, крива 1). Зі зменшенням частоти обертання вала двигуна до  $1500 \text{ хв}^{-1}$  загальний ККД насоса  $\eta_1$  зростає і становить  $\eta_1 = 0,8 \dots 0,9$  (рис. 3, крива 2) у діапазоні зміни параметра регулювання  $e_1 = 0,5 \dots 1,0$ . Це пояснюється тим, що зі зменшенням частоти обертання двигуна зростає гідромеханічний ККД насоса  $\eta_{гм1}$ . Зі збільшенням діапазону навантаження трансмісії в усьому діапазоні зміни параметра регулювання насоса ( $e_1 = 0,33 \dots 1,0$ ) при частоті обертання вала двигуна –  $2500 \text{ хв}^{-1}$ , загальний ККД насоса знижується і становить  $\eta_1 = 0,8 \dots 0,83$ .

Причому найбільше значення загального ККД насоса ( $\eta_1 = 0,83$ ) досягається при значенні параметра регулювання насоса –  $e_1 = 0,65$  (рис. 3, крива 3). Зменшення частоти обертання до

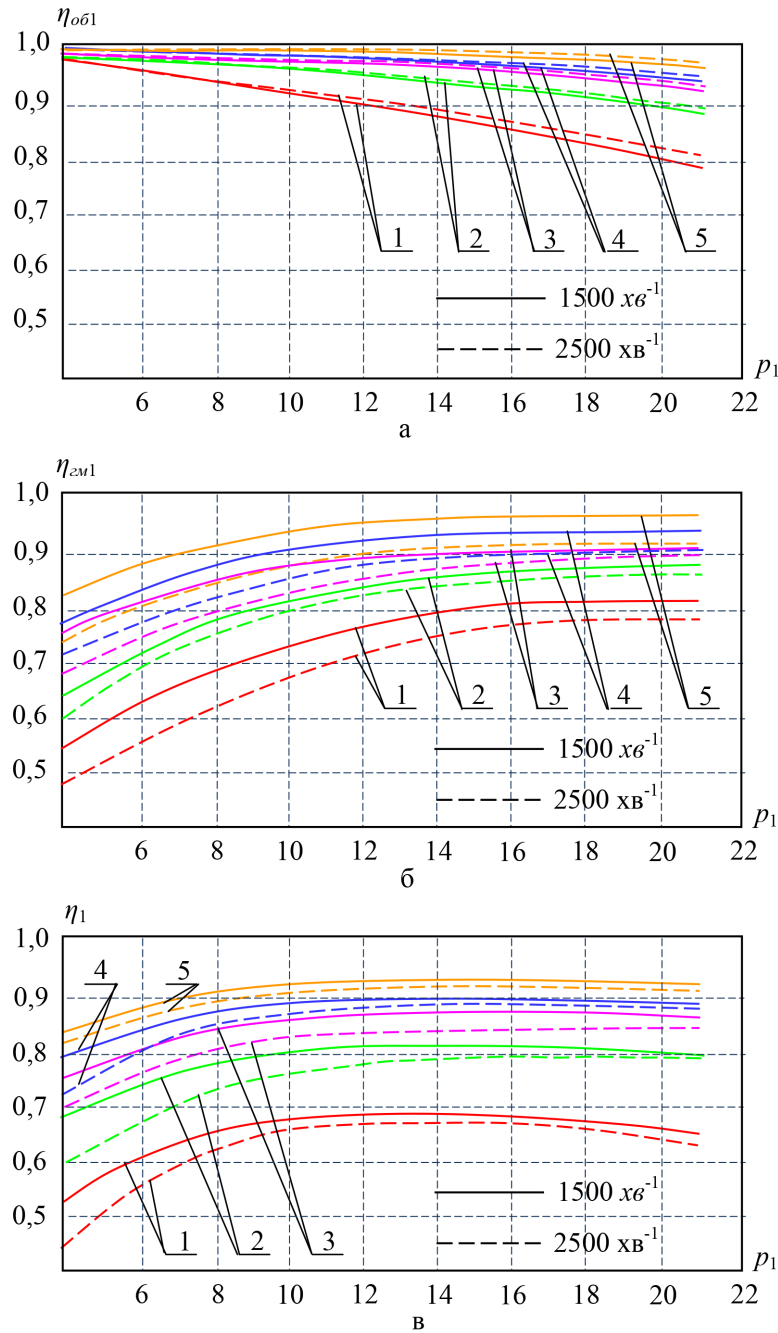


Рис. 2. Залежність зміни ККД насоса від перепаду тиску  $\Delta p$  робочої рідини:

*a* – об'ємного  $\eta_{об1}$ ; *б* – гідромеханічного  $\eta_{гм1}$ ; *в* – загального  $\eta_1$ ;  
 1 –  $e_1 = 0,18$ ; 2 –  $e_1 = 0,34$ ; 3 –  $e_1 = 0,5$ ; 4 –  $e_1 = 0,69$ ; 5 –  $e_1 = 1,0$

1500 хв<sup>-1</sup> у всьому діапазоні зміни параметра регулювання насоса ( $e_1 = 0,33 \dots 1,0$ ) призводить до зростання загального ККД насоса  $\eta_1$  (рис. 3, крива 4). При зміні параметра регулювання насоса в діапазоні  $e_1 = 0,6 \dots 1,0$  значення загального ККД  $\eta_1$  збільшується до  $\eta_1 = 0,87$ .

Так, для мехатронної системи з гідравлічним приводом мехатронних модулів ходової частини з планетарними гідромоторами найбільш доцільними режимами експлуатації, з енергетичного боку, є зміни параметра регулювання насоса в діапазоні  $e_1 = 0,5 \dots 1,0$ , а перепаду тиску робочої рідини –  $\Delta p = 7$ . Необхідно відзначити, що за цих режимів експлуатації мехатронної системи моторесурс насоса також збільшується.

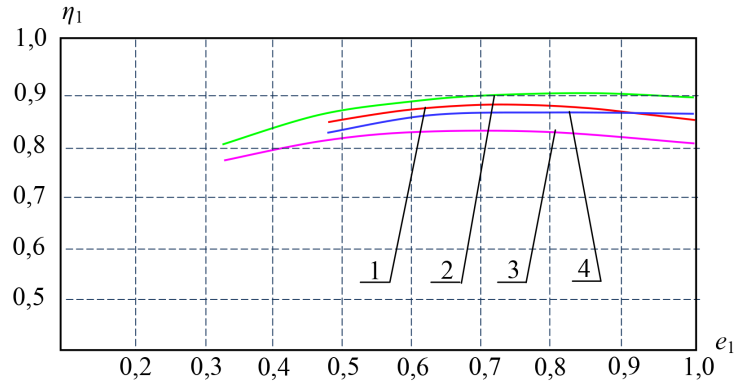


Рис. 3. Залежність зміни загального ККД  $\eta_1$  від параметра регулювання насоса  $e_1$ :

1, 3 – при частоті обертання вала двигуна  $2500 \text{ хв}^{-1}$ ;

2, 4 – при частоті обертання вала двигуна  $1500 \text{ хв}^{-1}$

Об'ємний ККД  $\eta_{об2}$  досліджуваних планетарних гідромоторів (рис. 4, а) з робочим об'ємом  $320 \text{ см}^3$  перебуває в лінійній залежності від перепаду тиску робочої рідини  $\Delta p$ . У діапазоні зміни перепаду тиску робочої рідини  $\Delta p$  від 4 МПа до 16 МПа об'ємний ККД  $\eta_{об2}$  знижується незначно з 0,98 до 0,97 (рис. 4, а – крива 1). Зі збільшенням перепаду тиску  $\Delta p$  гідромеханічний ККД  $\eta_{зм2}$  гідромотора збільшується, і при  $\Delta p = 14 \text{ МПа}$  досягає свого максимального значення  $\eta_{зм2} = 0,92$  (рис. 4, а – крива 2). Залежність зміни загального ККД  $\eta_2$  (рис. 4, а – крива 3) аналогічна до зміни гідромеханічного ККД  $\eta_{зм2}$  гідромотора.

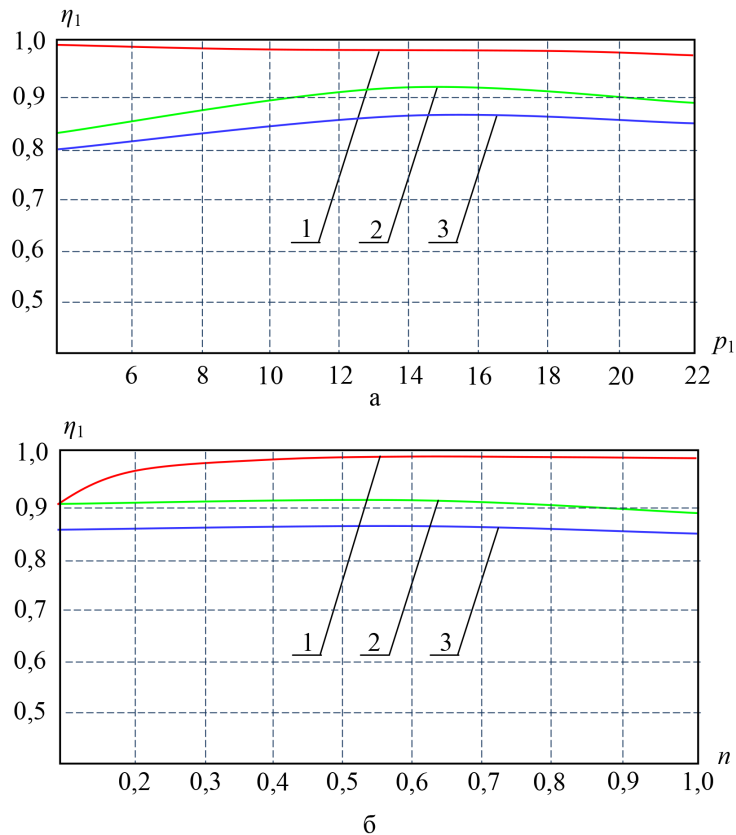


Рис. 4. Залежність зміни ККД гідромотора від:

а – перепаду тиску  $\Delta p$ ; б – відносної частоти обертання  $n$  вихідного вала: 1 – об'ємний ККД  $\eta_{об2}$ ; 2 – гідромеханічний  $\eta_{зм2}$ ; 3 – загальний  $\eta_2$



Збільшення відносної частоти обертання вихідного вала досліджуваного гідромотора, а отже, і швидкості руху самохідної машини з гід्रोоб'ємною трансмісією, призводить до зростання об'ємного ККД  $\eta_{об2}$  гідромотора (рис. 4,  $\delta$  – крива 1) та зниження його гідромеханічного ККД  $\eta_{зм2}$  (рис. 4,  $\delta$  – крива 2). Необхідно відзначити, що загальний ККД  $\eta_2$  майже не залежить від частоти обертання  $n_2$  вихідного вала гідромотора (Рис. 4,  $\delta$  – крива 3). Під відносною частотою обертання вихідного вала досліджуваного гідромотора розуміється відношення поточного  $n_{2i}$  та номінального  $n_{2n}$  значення частот обертання вала гідромотора ( $n = n_{2i}/n_{2n}$ ).

Так, можна обґрунтувати діапазон зміни експлуатаційних параметрів мехатронної системи з гідравлічним приводом мехатронних модулів ходової частини з планетарними гідромоторами, що забезпечують високий ККД. Високий ККД мехатронної системи досягається при зміні відносної частоти обертання вала гідромотора в діапазоні  $n = 0,25 \dots 1,0$  та зміни перепаду тисків робочої рідини в діапазоні  $\Delta p = 7 \dots 21$  МПа. У зазначеному діапазоні зміни параметрів мехатронної системи загальний ККД  $\eta_2$  гідромотора можна прийняти рівним  $\eta_2 = 0,87$ . При експлуатації мехатронної системи в указаному діапазоні зміни експлуатаційних параметрів, її загальний ККД можна прийняти рівним  $\eta_2 = 0,77$ .

Одним з етапів експериментальних досліджень були випробування мехатронної системи з гідравлічним приводом мехатронних модулів ходової частини з планетарними гідромоторами зі збільшенням навантажувального діапазону до значень  $D = 4$  і  $8$ . Дослідження проводили на мехатронній системі з двома мехатронними модулями (мотор-колесами), виконаними на базі двох та трьох планетарних гідромоторів з робочими об'ємами  $320 \text{ см}^3$  і  $160 \text{ см}^3$  та  $630 \text{ см}^3$ ,  $320 \text{ см}^3$  і  $160 \text{ см}^3$ , відповідно. У результаті проведених досліджень отримані аналогічні результати, які показують, що гідромеханічний ККД  $\eta_{зм2}$  у цих гідромоторів інтенсивніше зменшується зі збільшенням частоти обертання вала гідромотора  $n_2$ . У ділянці низьких перепадів тиску  $\Delta p$  гідромеханічний ККД  $\eta_{зм2}$  також значно знижується. При експлуатації планетарних гідромоторів при зміні відносних частот обертання вала в діапазоні  $n = 0,2 \dots 1,0$  та перепаду тиску –  $\Delta p = 8 \dots 22$  МПа, загальний ККД  $\eta_2$  гідромотора можна прийняти рівним  $\eta_2 = 0,85$ .

**Висновки.** Експериментальні дослідження проводили з використанням мехатронної системи самохідної машини з гідравлічним приводом ходової частини, що складається з регульованого насоса та двох мехатронних модулів (мотор-коліс) на базі планетарних гідромоторів. Мехатронна система має регулятор, що забезпечує роботу двигуна самохідної машини в режимі постійної потужності. При зміні навантаження в гідроприводі мехатронної системи, яке визначається перепадом тиску робочої рідини, потужність насоса підтримувалася постійною зміною параметра регулювання насоса.

Проведеними дослідженнями встановлено, що за зміни параметра регулювання насоса в межах  $0,5 \dots 1,0$ , об'ємний, гідромеханічний та загальний ККД насоса змінюються у невеликих межах від  $0,5 \dots 1,5$  %. Необхідно також відзначити, що збільшення частоти обертання вала насоса в діапазоні  $1500 \dots 2500 \text{ хв}^{-1}$  призводить до незначного (до 3 %) підвищення об'ємного ККД і зниження гідромеханічного і загального ККД в діапазоні  $2 \dots 11$  %.

У результаті проведених експериментальних досліджень обґрунтовано раціональні режими експлуатації насоса та гідромоторів, що покращують функціональні характеристики мехатронної системи самохідної машини з гідравлічним приводом мехатронних модулів (мотор-коліс) на базі планетарних гідромоторів. Установлено, що найбільш раціональними режимами експлуатації насоса є зміна параметра регулювання насоса в діапазоні  $0,5 \dots 1,0$ , а перепад тиску робочої рідини –  $7 \dots 21$  МПа. Умовою забезпечення високого ККД планетарних гідромоторів є їх експлуатація в діапазоні зміни відносних частот обертання  $0,25 \dots 1,0$  при зміні перепаду тиску робочої рідини в діапазоні  $7 \dots 21$  МПа.

*Список використаних джерел*

1. Самородов В. Б., Гармаш Д. О. Теоретичне визначення основних показників гідрооб'ємно-механічної трансмісії вантажного автомобіля при варіації робочого об'єма гідромашин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Автомобіле- та тракторобудування*. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 1 (2020). 3–9. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2020.1.01>
2. Самородов В. Б., Аврунін Г. А., Гармаш Д. О. Аналіз універсальних характеристик гідрооб'ємних передач, які працюють у складі безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісій для різних робочих об'ємів гідравлічних машин аксіальнопоршневого типу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Автомобіле- та тракторобудування*. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (2020). 11–18. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2020.2.02>
3. Arinaga S., Yoshida K., Takada S., Noda M., Inoue K. The latest trends in oil pump rotors for automobiles. *SEI Tech. Rev.* 2016, 82, 59–65.
4. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Привод рушіїв автомобілів підвищеної прохідності. Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції СЕУТТОО-2018 (Херсон, 13–14 вересня 2018 року). Херсон, 2018. С. 52–55.
5. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А. Модель гідравлічного приводу мехатронної системи. *Праці ТДАТУ. Мелітополь* : ТДАТУ, 2018. Вип. 18. Т. 2. С. 59–83. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-18-2-58-82>
6. Liang Z., Jin W., Zhengwu Z. Research on Travel Control System of Hydrostatic Transmission Chassis. *MATEC Web of Conferences*, 2017. 139:00212. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713900212>
7. Liang Z., Jin W., Zhengwu Z.. Research on Parameter Design of Multi – axis Hydrostatic Transmission Vehicle. *MATEC Web of Conferences*, 2017. 139: 00215. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713900215>
8. Stojek J., Pluta J., Jędrzykiewicz Z. Research on the properties of a hydrostatic transmission for different efficiency models of its elements. *Acta Montanistica Slovaca*, 2007. 2 (4). 373–380.
9. Schweiger W.; Schoefmann W.; Vacca A. Gerotor Pumps for Automotive Drivetrain Applications: A Multi Domain Simulation Approach. *SAE International Journal of Passenger Cars*, 2011. 4. 1358–1376. <https://doi.org/10.4271/2011-01-2272>
10. Panchenko A., Voloshina A., Kiurchev S., and others. Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. 4/7 (94). 51–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139577>
11. Panchenko A., Voloshina A., Milaeva I., Panchenko I., Titova O. The Influence of the form Error after Rotor Manufacturing on the Output Characteristics of an Orbital Hydraulic Motor. *International Journal of Engineering and Technology*, 7 (4.3), 1–5 (2018). <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19542>
12. Voloshina A., Panchenko A., Boltyansky O., Panchenko I., Titova O. Justification of the Kinematic Diagrams for the Distribution System of a Planetary Hydraulic Motor. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018. 7 (4.3), 6–11. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19544>
13. Panchenko A., Voloshina A., Boltyansky O., and others: Designing the flow-through parts of distribution systems for the PRG series planetary hydraulic motors, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. 3/1 (93). 67–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132504>
14. Панченко А. І., Волошина А. А., Засядько А. І. Вплив конструктивних особливостей торцевої розподільної системи на функціональні параметри планетарного гідромотора. *Праці ТДАТУ. Мелітополь* : ТДАТУ, 2017. Вип. 17. Т. 3. С. 33–50.
15. Panchenko A., Voloshina A., Milaeva I., Luzan P. Operating conditions' influence on the change of functional characteristics for mechatronic systems with orbital hydraulic motors. *Modern Development Paths of Agricultural Production*, 2019. 169–176. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_18)

Стаття надійшла до редакції 23.10.2025

Стаття прийнята 11.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





A. Panchenko<sup>1</sup>, A. Voloshina<sup>1</sup>, O. Koviazin<sup>1</sup>, I. Panchenko<sup>1</sup>, A. Voloshin<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University  
<sup>2</sup>Melitopol Vocational College of TSATU

## CHANGING THE FUNCTIONAL PARAMETERS OF MECHATRONIC SYSTEMS WITH PLANETARY HYDRAULIC MOTORS UNDER VARIOUS OPERATING CONDITIONS

### *Summary*

Today, the development of self-propelled special-purpose vehicles (road, construction, agricultural, etc.) with increased mobility is a pressing issue. To improve the functional parameters of mechatronic systems in self-propelled vehicles with hydraulic undercarriage drives, experimental studies were conducted on the mechatronic system of a self-propelled vehicle with a hydraulic undercarriage drive, featuring an adjustable pump and mechatronic modules based on planetary hydraulic motors. The study also substantiated rational operating modes for the adjustable mechatronic system of a self-propelled vehicle with a hydraulic drive and mechatronic modules (motor-wheels) based on planetary hydraulic motors.

Experimental studies were conducted using a mechatronic system for a self-propelled vehicle with a hydraulic undercarriage drive, consisting of an adjustable pump and two mechatronic modules (motor-wheels) based on planetary hydraulic motors. The mechatronic system has a regulator that ensures the self-propelled vehicle's engine operates in constant power mode. As the load in the mechatronic system's hydraulic drive changed, determined by the pressure drop of the working fluid, the pump power was maintained by continuously adjusting the pump control parameter.

Experimental studies have substantiated rational operating modes for pumps and hydraulic motors, improving the performance of the mechatronic system of a self-propelled vehicle with a hydraulic drive for mechatronic modules (wheel hub motors) based on planetary hydraulic motors. It has been established that the most efficient pump operating modes involve varying the pump control parameter within the range of 0.5 to 1.0 MPa, and a working fluid pressure differential of 7 to 21 MPa. High planetary hydraulic motor efficiency is ensured by operating them within a relative speed range of 0.25 to 1.0 MPa, with a working fluid pressure differential of 7 to 21 MPa.

**Keywords:** mechatronic system, hydraulic drive, mechatronic module, planetary hydraulic motor, adjustable axial piston pump, functional parameters.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-16>

УДК 621.225.001.4

А. І. Панченко<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина<sup>1</sup>, д-р. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

І. А. Панченко<sup>1</sup>, асистент

ORCID: 0000-0003-2150-4278

І. М. Холод<sup>1</sup>, асистент

ORCID: 0000-0002-3652-0687

А. А. Волошин<sup>2</sup>, викладач спецдисцип.

ORCID: 0009-0004-3850-7613

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> ВСП «Мелітопольський фаховий коледж Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного»

e-mail: voloshinaa2012@gmail.com

## ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЦИКЛОЇДАЛЬНОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ НА ГЕОМЕТРИЧНІ НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ПЛАНЕТАРНОГО ГІДРОМОТОРА

*Анотація.* Робота присвячена стабілізації вихідних характеристик планетарного гідромотора шляхом дослідження впливу радіуса кривизни зубів роторів на зміну геометричних та функціональних параметрів циклоїдального зачеплення. У результаті проведених досліджень розроблено розрахункову схему та математичний апарат, що дають змогу визначити зміну геометричних та функціональних параметрів планетарного гідромотора залежно від ступеня зносу (збільшення діаметрального зазору) та провести математичне моделювання зміни геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення в умовах експлуатації. Отримані закономірності впливу радіуса кривизни зубів роторів планетарного гідромотора на зміну його геометричних та функціональних параметрів дадуть змогу забезпечити стабілізацію вихідних характеристик планетарного гідромотора при його проектуванні.

*Ключові слова:* циклоїдальне зачеплення, діаметральний зазор, контактний зазор, радіус заокруглення зуба, радіус ділильного кола.

*Постановка проблеми.* На сьогоднішній день планетарні гідромотори знаходять своє застосування в різних галузях машинобудування [1; 2], у механізмах з наявністю приводу обертальної дії з низькою частотою обертання й високим крутним моментом [3; 4]. Принцип дії планетарного (орбітального) гідромотора заснований на взаємодії внутрішнього та зовнішнього роторів циклоїдального зачеплення із зубами утвореними дугами кола [5; 6]. Різні похибки апроксимації циклоїдального контуру профілів зубів внутрішнього та зовнішнього роторів, викликані проектуванням (конструктивними особливостями), виготовленням (технологічні труднощі), призводять до наявності діаметрального зазору [7]. У процесі експлуатації планетарної гідромашини в результаті зношування роторів, діаметральний зазор постійно збільшується, досягаючи свого граничного значення [8]. Збільшення діаметрального зазору внаслідок зміни радіусів закруглення зубів роторів, викликане зносом їх робочих поверхонь, призводить до додаткових переміщень внутрішнього ротора, що негативно позначається на вихідних характеристиках планетарного гідромотора [9].

З огляду на це, з метою стабілізації вихідних характеристик планетарного гідромотора необхідно провести глибокі дослідження взаємозв'язку геометричних та функціональних параметрів циклоїдального зачеплення, утвореного зубами внутрішнього й зовнішнього роторів. Тому питання дослідження впливу радіуса кривизни зубів на зміну геометричних та функціональних параметрів роторів планетарної гідромашини є актуальним завданням.



*Аналіз останніх досліджень.* Запропоновано методологію опису ефективної витрати аксіально-поршневих насосів та двигунів [10]. Наведено математичні вирази для оцінки витрати робочої рідини в героторних гідромашинах [11]. Досліджено радіальний розподіл коливань тиску для насоса з осьовим потоком при різних швидкостях обертання [12]. Описано геометрію гідростатичного шестерного насоса [13] та визначено силовий контакт між зубами гідростатичного шестеренного насоса [14], проведено моделювання зачеплення профілів ротора в параметричній формі [15], розроблено програму для проектування ротора [16]. Запропоновано вимірювальну систему для діагностики та фактори, що впливають на надійність та ефективність гідравлічних пристроїв [17]. Питання, пов'язані з проектуванням планетарних (орбітальних) гідромоторів, не розглядалися.

Відомо [18], що орбітальні та планетарні гідромотори ефективно використовують у мехатронній системі самохідної техніки. До недоліків цих гідромашин належать [19] нерівномірність вихідних характеристик, зумовлену похибкою форми елементів його системи роторів [7] та конструктивними особливостями розподільної системи [20]. Розроблено чисельні моделі циклоїдальної зубчастої передачі з використанням методу кінцевих елементів [21]. Запропоновано математичну [22] та динамічну [23] моделі процесів, що відбуваються в системі розподілу, досліджено вплив сегментної [24], круглої [25] та овальної [26] форми розподільних вікон на пропускну здатність [27] та вихідні характеристики планетарного гідромотора [28]. Вплив конструктивних особливостей системи роторів на вихідні показники планетарного гідромотора не досліджувався.

Розроблено математичну [29] та динамічну [30] моделі процесів, що відбуваються в системі роторів при експлуатації орбітального гідромотора [31], проведено аналіз зносу з використанням чисельного моделювання [32], досліджено похибку виготовлення зубчастих коліс [33], встановлено взаємозв'язок між похибкою, контактною силою та тертям [34], розроблено прилади [35] й засоби [36] контролю похибки форми їх виготовлення, проведено експериментальні дослідження [37]. Взаємозв'язок геометричних і функціональних параметрів циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора не розглядався.

Аналізу публікацій, присвячених розрахунку, моделюванню та проектуванню планетарних (орбітальних) гідромоторів, показав [38], що на сьогоднішній день майже відсутні публікації, що розкривають питання глибоких досліджень взаємозв'язку геометричних і функціональних параметрів циклоїдального зачеплення, утвореного зубами внутрішнього й зовнішнього роторів. Слід зазначити, що більшість публікацій спрямовано на дослідження, пов'язані з проектуванням героторних гідромашин (переважно насосів). Проте робота роторів героторного насоса принципово відрізняється від роботи роторів планетарного (орбітального) гідромотора [8; 9]. Тому, представлена стаття присвячена дослідженням впливу радіуса кривизни зубів на зміну геометричних та функціональних параметрів роторів планетарної гідромашини з метою стабілізації вихідних характеристик планетарного гідромотора.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Стабілізація вихідних характеристик планетарного гідромотора шляхом дослідження впливу радіуса кривизни зубів роторів на зміну геометричних і функціональних параметрів циклоїдального зачеплення.

Для визначення зміни геометричних та функціональних параметрів елементів циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора залежно від зміни діаметрального зазору між його роторами дослідженнями передбачено:

- розробити розрахункову схему й математичний апарат для визначення зміни геометричних параметрів, що характеризують циклоїдальне зачеплення планетарного гідромотора при їх зносі;
- розробити структурно-функціональну схему моделювання зміни геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення при зношуванні;

– дослідити взаємозв’язок зношування елементів циклоїдального зачеплення зі зміною їх геометричних параметрів.

*Основна частина.* Уточнимо, що діаметральний зазор – це зазор  $G$  (рис. 1) між відповідними парами зубів внутрішнього та зовнішнього роторів, за умови, що діаметрально протилежний зуб внутрішнього ротора перебуває в контакті з двома зубами (роликами) зовнішнього ротора [8; 9]. Технічний стан циклоїдального зачеплення (і гідромотора загалом) у процесі експлуатації визначається зміною значення його діаметрального зазору (внаслідок зношування). Тому для визначення технічного стану планетарного гідромотора вагоме значення має встановлення взаємозв’язку функціональних і геометричних параметрів циклоїдального зачеплення.

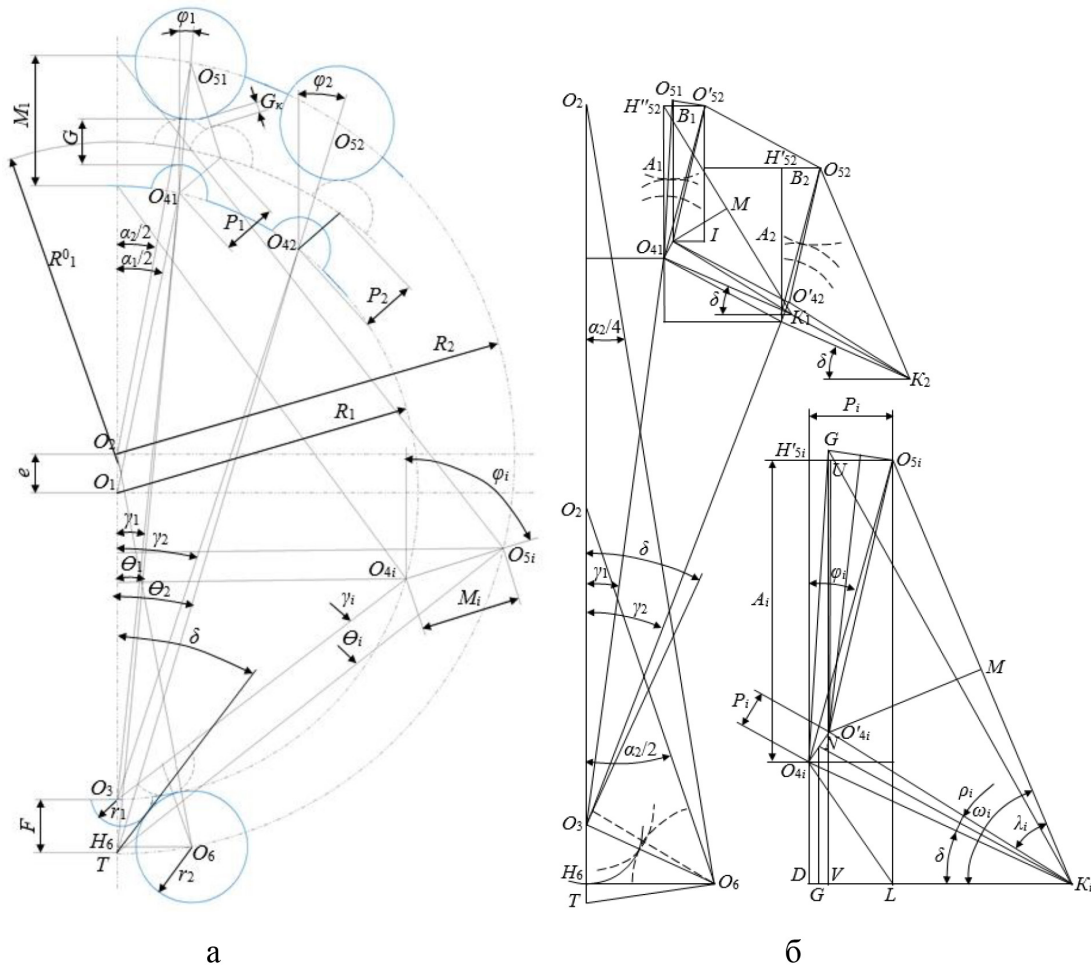


Рис. 1. Розрахункові схеми визначення геометричних параметрів циклоїдального зачеплення

Для подальших досліджень приймемо такі припущення:

- відхилення профілів зубчастих контурів внутрішнього та зовнішнього роторів дорівнюють нулю;
- зміна діаметрального зазору (знос деталей циклоїдального зачеплення) здійснюється зміною радіуса ділильного кола  $R_1$  внутрішнього ротора;
- радіус ділильного кола  $R_2$  зовнішнього ротора та радіуси закруглень зубів внутрішнього  $r_1$  та зовнішнього  $r_2$  роторів незмінні.

Оскільки циклоїдальне зачеплення симетрично щодо лінії центрів  $O_1O_2$ , то доцільно розглядати тільки одну, наприклад, його праву половину (рис. 1, а). При цьому номери пар зубів внутрішнього і зовнішнього роторів, що розглядаються, нумеруються зверху,



зліва направо. Тоді діаметральний зазор  $G$  буде розташований між зубами першої пари ( $i = 1$ ), а порядковий номер діаметрально протилежного зуба визначатиметься виразом  $i = (Z_1 + 1)/2$ , кут  $\delta$  між лінією центрів  $O_1O_2$  і нормаллю в точці торкання пари зубів  $i = (Z_1 + 1)/2$  постійний ( $\delta = \text{const}$ ).

З урахуванням прийнятих припущень визначимо основні геометричні параметри, що характеризують циклоїдальне зачеплення планетарного гідромотора.

Міжцентрова відстань  $M_i$  і зазор  $G_i$  характеризують взаємне розташування зубів внутрішнього і зовнішнього роторів, що сполучаються (рис. 1, а):

$$G_i = M_i - (r_1 + r_2), \quad (1)$$

$$M_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}, \quad (2)$$

$$A_i = 2R_2 \cdot \cos^2 \frac{\pi \cdot (2i-1)}{2z_2} - 2R_1 \cdot \cos^2 \frac{\pi \cdot (2i-1)}{2z_1} - F, \quad (3)$$

$$B_i = R_2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot (2i-1)}{z_2} - R_1 \cdot \sin \frac{\pi \cdot (2i-1)}{z_1}, \quad (4)$$

$$F = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 - R_2^2 \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2z_2} + 2R_2 \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2z_2}}, \quad (5)$$

де  $R_1$  – радіус ділового кола внутрішнього ротора;  $R_2$  – радіус ділового кола зовнішнього ротора;  $r_1$  – радіус закруглень зубів внутрішнього ротора;  $r_2$  – радіус закруглень зубів зовнішнього ротора;  $z_1$  – кількість зубів внутрішнього ротора;  $z_2$  – кількість зубів зовнішнього ротора.

Відсутність зазору в парі  $i = 1$  відповідає такому значенню  $R_1^0$ , у якому  $M_i = r_1 + r_2$ . Звідси, з урахуванням (3) та (4):

$$R_1^0 = \frac{1}{C} (D - \sqrt{D - C \cdot E}), \quad (6)$$

$$C = 4 \cos^2 \frac{\pi}{2z},$$

$$D = 4R_2 \cdot \cos \frac{\pi}{2z} \cdot \cos^2 \frac{\pi}{2z_2} \cdot \cos \frac{\pi}{2z_1 \cdot z_2} - 2F \cdot \cos^2 \frac{\pi}{2z_1},$$

$$E = 4R_2 \cdot (R_2 - F) \cdot \cos^2 \frac{\pi}{2z_2} + 2F^2 - (r_1 + r_2)^2.$$

У теоретичному з'єднанні параметр  $R_1^0$  є загальним для характеристики ступеня «повноти» як внутрішнього, так і зовнішнього роторів. Тому в реальному з'єднанні розмір  $R_1^0$  можна прийняти як номінальний.

Параметр  $P_i$  (рис. 1, б) характеризує величину паралельного переміщення внутрішнього ротора до торкання  $i$ -го зуба зовнішнього ротора:

$$P_i = 2 \cdot (r_1 + r_2) \cdot \sin \frac{\omega_i \cdot \lambda_i \cdot \delta}{2}, \quad (7)$$

$$\omega_i = \arctg \frac{(r_1 + r_2) \cdot \sin \delta + A_i}{(r_1 + r_2) \cdot \cos \delta - B_i}, \quad \delta = \arccos \frac{R_2 \cdot \sin \frac{\pi}{2z_2}}{r_1 + r_2},$$

$$\lambda_i = \arccos \frac{\sqrt{[(r_1 + r_2) \cdot \sin \delta + A_i]^2 + [(r_1 + r_2) \cdot \cos \delta - B_i]^2}}{2 \cdot (r_1 + r_2)}.$$



Контактний зазор  $G_{cont}(i, j)$  між зубами розглянутої  $i$ -ї пари при контакті  $j$ -х зубів внутрішнього та зовнішнього роторів визначається з виразу:

$$G_{cont}(i, j) = \sqrt{M_i^2 + P_j^2 - 2M_i - P_j \cdot \cos \frac{\omega_j - \lambda_j + \delta - 2\varphi_i}{2}} - (r_1 + r_2).$$

При  $R_1 < R_{кр}$  внутрішній ротор, перемістившись на величину  $P_i$ , торкається зовнішнього ротора зубом № 2 ( $j = 2$ ) у той момент, коли в парі зубів № 1 ( $i = 1$ ) спостерігається зазор  $G$ . Тоді з урахуванням діаметрального зазору (1) маємо:

$$G_{cont} = \sqrt{P_2^2 \cdot [G_1 - (r_1 + r_2)] \cdot \left[ G_1 - (r_1 + r_2) - 2P_2 \cdot \cos \frac{\omega_2 - \lambda_2 + \delta - 2\varphi_1}{2} \right]} - (r_1 + r_2). \quad (8)$$

Оскільки в реальному циклоїдальному зачепленні діаметральний зазор існує як сукупність конструктивних параметрів  $R_1, R_2, r_1, r_2, z_1$  і  $z_2$ , то всі розглянуті геометричні параметри ( $G_i, M_i, P_i$  і  $G_{cont}$ ) були досліджені як функція від конструктивних параметрів і визначені виразами (1), (2), (7) і (8), відповідно.

Залежність між геометричними параметрами розглядалася як функція від міжцентрової відстані  $e$  між центрами внутрішнього й зовнішнього роторів, що допустимо тільки для беззазорого, теоретичного з'єднання. Причому міжцентрова відстань визначалася взаємозв'язком радіусів закруглення зубів, умовно позначимо її  $e_1$ :

$$e_1 = \frac{(r_1 + r_2)}{4}. \quad (9)$$

Оскільки зміна діаметрального зазору впливає на зміну параметра  $F$ , то, з урахуванням рівняння (5), міжцентрова відстань, умовно позначимо її  $e_2$ , визначається залежністю:

$$e_2 = R_2 - R_1 - \sqrt{(r_1 + r_2)^2 - R_2^2 \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2z_2} - 2R_2 \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2z_2}}. \quad (10)$$

Отримані залежності дають змогу моделювати зміну параметрів геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора при зносі.

Розроблені розрахункові схеми та математичний апарат дають змогу визначити зміну геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора залежно від зношування (збільшення діаметрального зазору) та провести математичне моделювання зміни геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення в умовах експлуатації.

При зношуванні циклоїдального зачеплення планетарних гідромашин циклоїдальний зубчастий контур його елементів відновлюється шляхом перешліфування (розточування) цього контуру на еквідистантний профіль. Тому для контролю якості ремонту, а також призначення ремонтних розмірів необхідно знати, як розподіляються зазори (натяги) між відповідними парами зубів циклоїдального зачеплення при його відновленні.

Структурно-функціональна схема моделювання зміни (зносу) геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення при відновленні представлена на рис. 2.

Блок А (рис. 2) дає змогу визначити міжцентрову відстань та зміну зазорів між відповідними парами зубів циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора, описане виразами (1–5).

Блок Б (рис. 2) дає змогу визначити значення компенсувального параметра  $R_1^0$ , що забезпечує «беззазорність» з'єднання зовнішнього та внутрішнього роторів у місцях відділення зони нагнітання від зони зливу, описане виразом (6). Прирівнявши початкове значення радіуса ділильного кола внутрішнього ротора  $R_1$  до значення компенсувального параметра  $R_1^0$ , визначаємо проміжні значення геометричного параметра  $R_1$  залежно від поточного значення радіуса

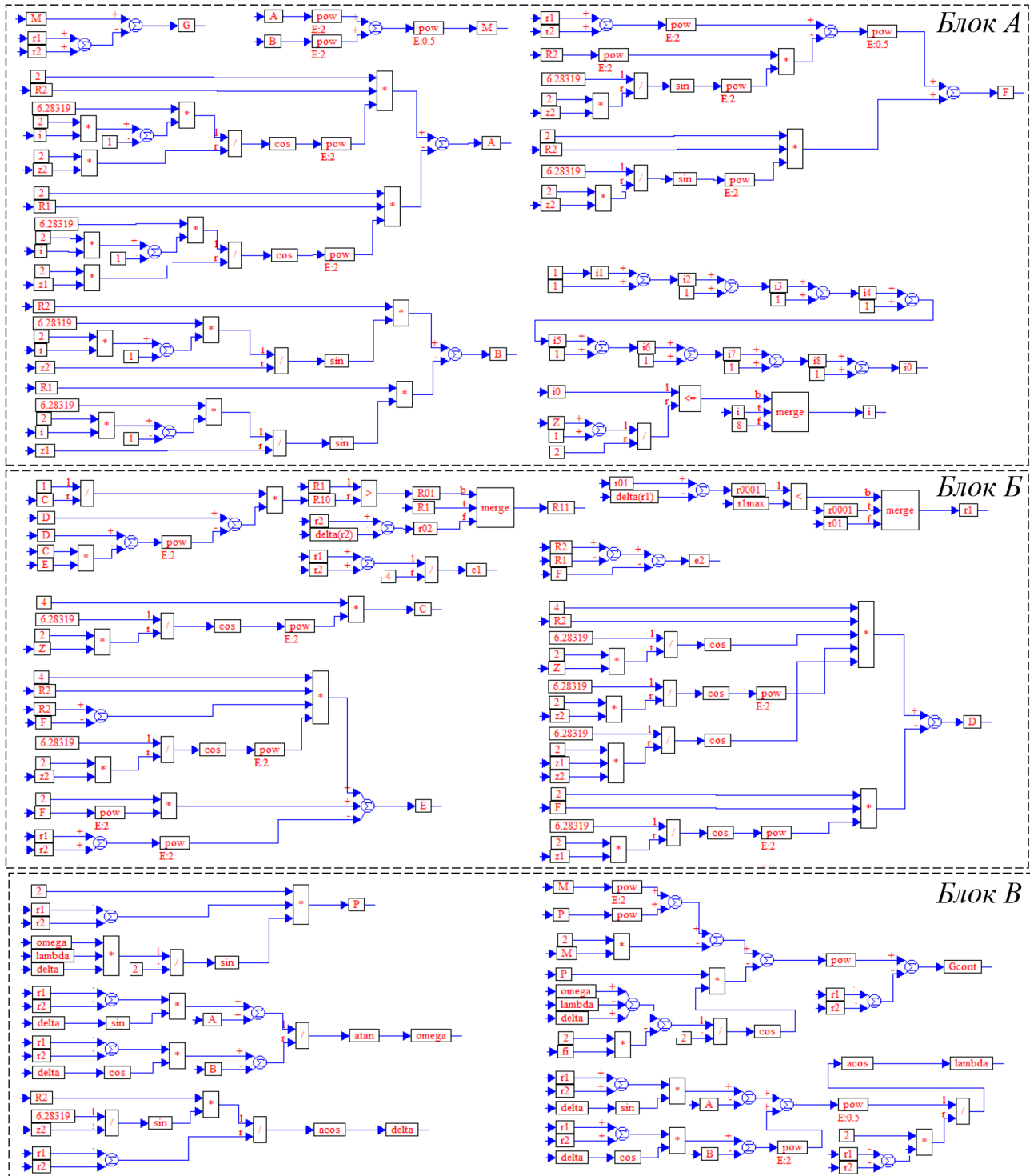


Рис. 2. Структурно-функціональна схема моделювання зміни геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення при зносі

заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$ , поточне (ремонтне) значення якого задається з кроком  $\Delta r_1$ , з огляду на конструктивні чи технологічні міркування.

Блок B (рис. 2) дає змогу визначити переміщення  $P_i$   $i$ -го зуба внутрішнього ротора до контакту з відповідним зубом зовнішнього ротора, описане виразом (7) та поточне значення контактної зазору  $G_{cont}$  між точками контакту зуба внутрішнього ротора з відповідним зубом зовнішнього ротора, описане виразом (8).

Для моделювання використовувалася права частина циклоїдального зачеплення (рис. 3). Причому пара зубів № 1 розташована праворуч угорі, а пара зубів № 8 розміщена діаметрально протилежно до осі симетрії. Аналіз залежності зміни зазорів між зубами циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора за різних значень радіуса заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$  показує (рис. 3, а), що зі зменшенням радіуса заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$  збільшується. При значенні радіуса заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1 = 4,65$  мм у парі зубів № 7 натяг становить 3 мкм, а при номінальному значенні  $r_1 = 4,5$  мм зазори дорівнюють  $G_1 = 0,2$  мм, тоді як  $G_2 = 0,04$  мм.

Аналіз можливих переміщень зубів внутрішнього ротора до контакту з відповідними зубами зовнішнього ротора показує (рис. 3), що за наявності «ідеальної» геометрії зубчастого контуру зовнішнього та внутрішнього роторів контакт у сьомій парі зубів (при зносі обох деталей) майже неможливий (рис. 3, б – крива 2).

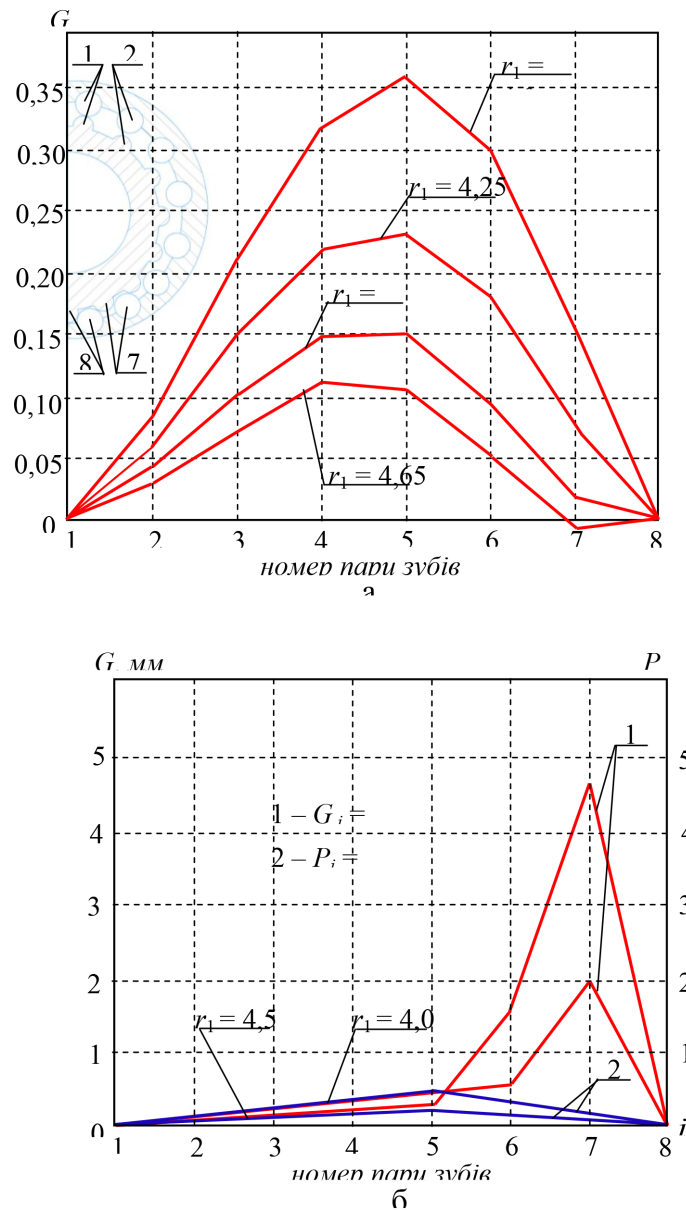


Рис. 3. Зміна зазорів та величини переміщень відповідних пар зубів циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора

Аналізуючи зміну геометричних параметрів в «безззорному» з'єднанні зовнішнього і внутрішнього роторів, необхідно відзначити, що для кожного «постійного» зовнішнього ротора може існувати безліч внутрішніх роторів з різними, але пов'язаними між собою значеннями радіусів заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$  і ділильного кола  $R_1$  (рис. 4, крива 1).

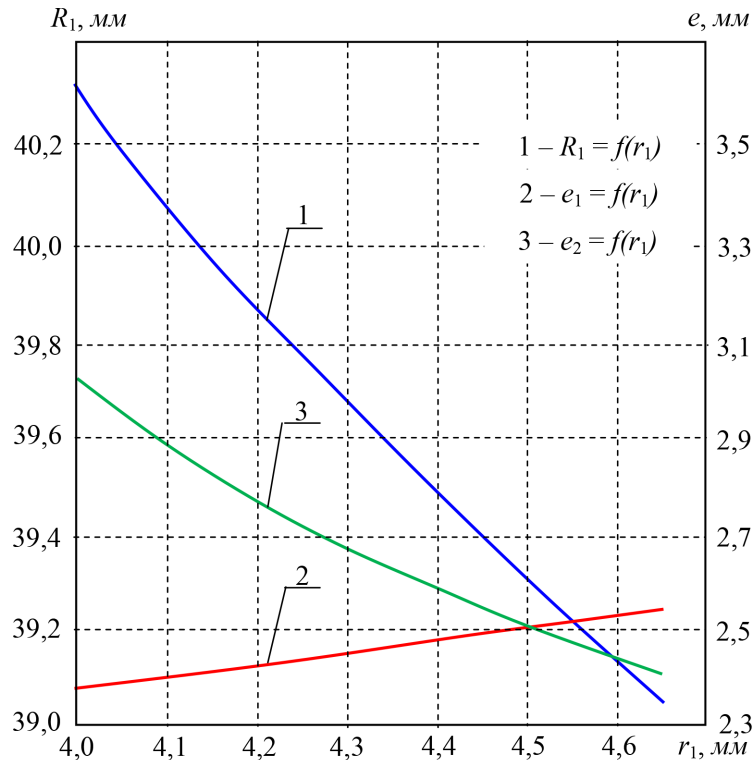


Рис. 4. Зміна геометричних параметрів циклоїдального зачеплення від радіуса заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$

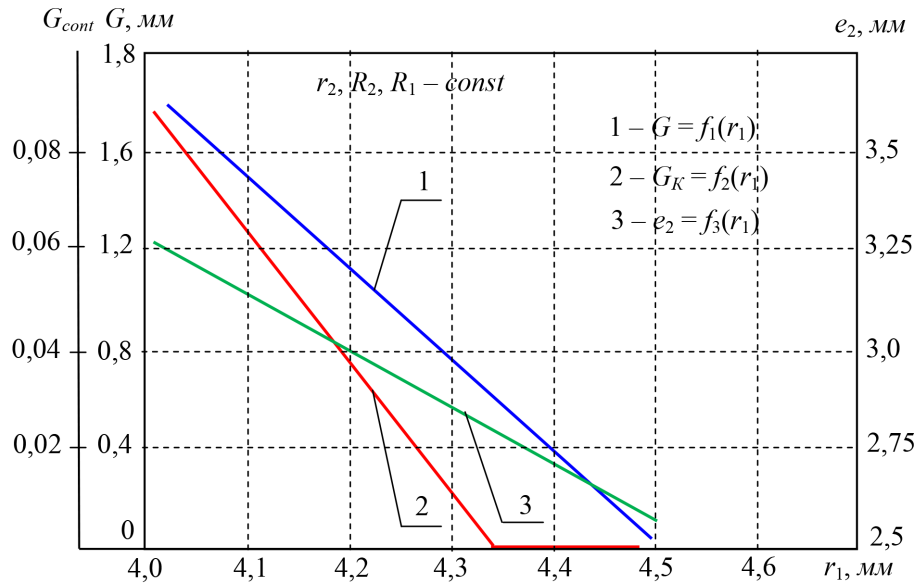
Дослідженнями зміни технічного стану планетарного гідромотора в умовах експлуатації встановлено взаємозв'язок зносу деталей циклоїдального зачеплення зі зміною геометричних параметрів цього зачеплення та функціональних параметрів планетарного гідромотора.

Аналізуючи залежність зміни геометричних параметрів циклоїдального зачеплення при зносі (рис. 5), можна відзначити, що діаметральний зазор  $G$  зростає лінійно (рис. 5, криві 1), тоді як контактний зазор  $G_{cont}$  залишається незмінним при зменшенні  $r_1$  ( $R_1$ ) до значення  $r_1 = 4,34$  мм ( $R_1 = 39,085$  мм), а потім різко зростає (рис. 5, криві 2).

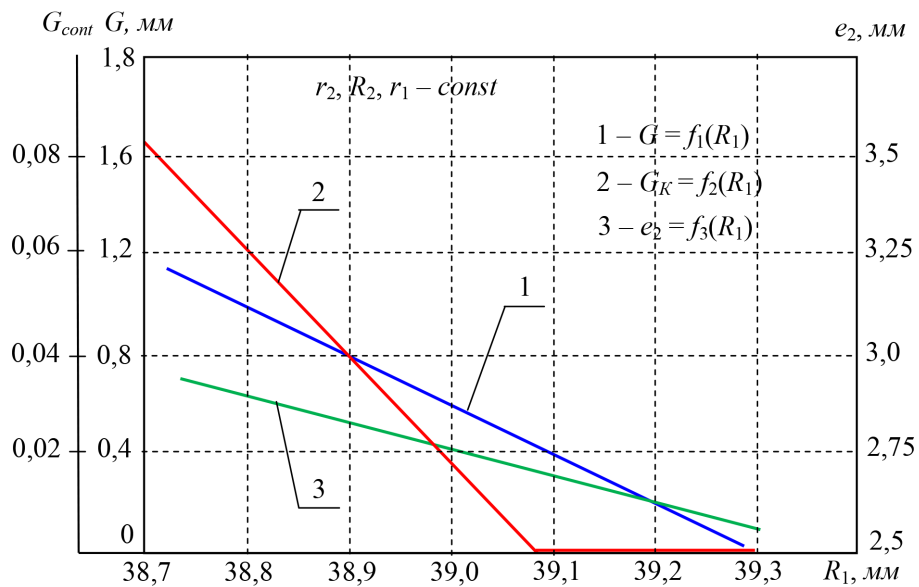
Установлено, що відстань між центрами внутрішнього та зовнішнього роторів  $e_2$  у процесі експлуатації також зростає, що призведе до зменшення крутного моменту та механічного ККД. Характер зміни контактного зазору  $G_{cont}$  залежно від ступеня зношування (рис. 5, криві 2) підтверджує дослідження кінематики циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора [8; 9].

У реальних умовах діаметральний зазор утворюється завдяки зменшенню радіуса заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$ . Моделювати такий процес експериментально дуже складно. Установлено, що зміни геометричних параметрів при зносі, що моделюється як радіусом заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$  (рис. 5, а), так і радіусом ділильного кола  $R_1$  (рис. 5, б), ідентичні. Тому при експериментальних дослідженнях знос циклоїдального зачеплення доцільно моделювати зміною радіуса ділового кола внутрішнього ротора  $r_1$ .

Аналіз зміни зазорів у відповідних парах зубців циклоїдального зачеплення при зносі, що модельований параметром  $R_1$ , показує (рис. 6), що діапазон зміни зазорів у парі зубів № 7 (0,022-0,169 мм) значно менше, ніж у парі № 2 (0,040-0,736 мм). Отже, при експериментальних



а



б

Рис. 5. Зміна геометричних параметрів циклоїдального зачеплення при зносі:

а – при модельованому  $r_1$ ; б – при модельованому  $R_1$

дослідженнях не виключена можливість торкання внутрішнього ротора зубцем № 7 відповідного зубця зовнішнього ротора (похибка форми контуру зовнішнього та внутрішнього роторів може перевищувати зазор між зубцями).

Так, можна зробити висновок, що розроблена структурно-функціональна схеми моделювання зміни геометричних параметрів орбітального гідромотора в умовах експлуатації (при зносі) дає змогу обґрунтувати значення ремонтних розмірів деталей циклоїдального зачеплення.

Проведеними дослідженнями встановлено, що основним функціонально обґрунтованим показником, що визначає технічний стан циклоїдального зачеплення та планетарного гідромотора загалом, є діаметральний зазор.

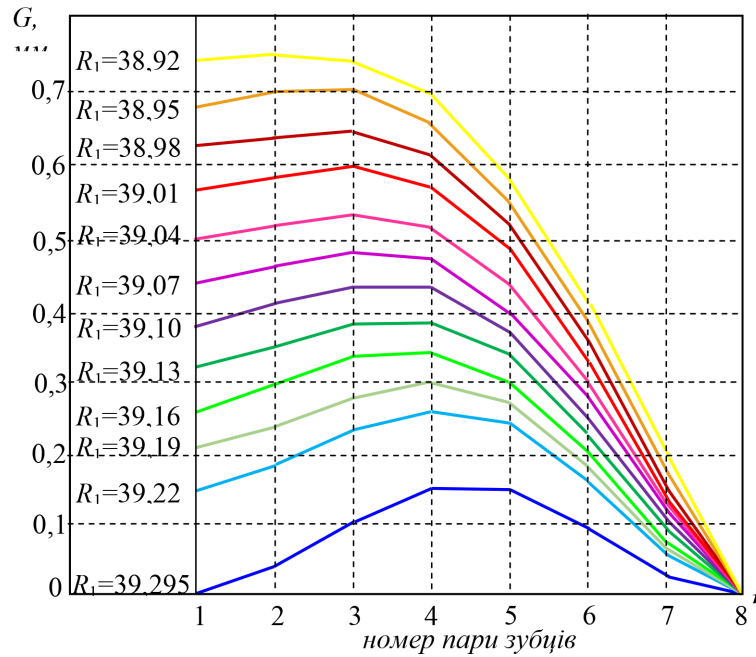


Рис. 6. Зміна зазорів між відповідними парами зубців циклоїдального зачеплення при зносі

Для забезпечення нормальної роботи циклоїдального зачеплення (тобто виключення контакту в парі зубців № 7) необхідно забезпечити контроль похибки форми контуру зовнішнього та внутрішнього роторів [35; 36].

Отримані закономірності впливу радіуса кривизни зубів роторів планетарного гідромотора на зміну його геометричних та функціональних параметрів дадуть змогу забезпечити стабілізацію вихідних характеристик планетарного гідромотора при його проектуванні.

*Висновки.* У результаті проведених досліджень розроблено розрахункову схему та математичний апарат, що дають змогу визначити зміну геометричних та функціональних параметрів планетарного гідромотора в залежності від зносу (збільшення діаметрального зазору) й провести математичне моделювання зміни геометричних параметрів деталей циклоїдального зачеплення в умовах експлуатації.

Розроблена структурно-функціональна схема моделювання зміни геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення в умовах експлуатації (при зносі) дає змогу визначити зміну зазорів та величини переміщень між відповідними парами зубів роторів циклоїдального зачеплення планетарного гідромотора, а також зміну контактного зазору залежно від ступеня зносу при радіусі  $r_1$  заокруглення зубів внутрішнього ротора та радіуса ділительного кола  $R_1$ . Це дало змогу обґрунтувати значення геометричних параметрів елементів циклоїдального зачеплення. Установлено, що зміна геометричних параметрів при зносі, що моделюється як радіусом заокруглення зуба внутрішнього ротора  $r_1$ , так і радіусом ділительного кола  $R_1$ , ідентичні. Тому при експериментальних дослідженнях знос циклоїдального зачеплення доцільно моделювати зміною радіуса ділительного кола внутрішнього ротора.

Дослідження впливу радіуса кривизни зубів на зміну геометричних та функціональних параметрів роторів планетарної гідромашини проводили шляхом моделювання умов експлуатації. Установлено, що для номінального значення радіуса зуба  $r_1 = 4,5$  мм зазор у критичній парі становить  $0,02$  мм, що межує з похибкою форми зубчастого профілю та може призвести до заклинювання роторів у процесі роботи.

Аналіз переміщення зубів внутрішнього ротора до контакту з відповідними зубами зовнішнього ротора показує, що за відсутності похибки форми зубчастих профілів роторів контакт

у критичній парі зубів майже неможливий. Це пояснюється тим, що при зменшенні радіуса заокруглення зуба  $r_1$  контур зубчастої поверхні внутрішнього ротора наближається до гіпоциклоїдального (зменшується похибка апроксимації).

Аналіз зміни зазорів між відповідними парами зубів циклоїдального зачеплення при зносі показує, що діапазон зміни зазорів у критичній парі зубів (0,022...0,169 мм) значно менше, ніж у парі, розташованій діаметрально протилежно (0,040...0,736 мм). Отже, в експлуатаційних умовах не виключена можливість заклинювання відповідних зубів у критичній парі через похибку виготовлення форми зубчастого контуру зовнішнього та внутрішнього роторів.

Проведеними дослідженнями встановлено, що основним функціонально обґрунтованим показником, що визначає технічний стан циклоїдального зачеплення та планетарного гідромотора, загалом є діаметральний зазор, а отримані закономірності впливу радіуса кривизни зубів роторів планетарного гідромотора на зміну його геометричних та функціональних параметрів дають змогу забезпечити стабілізацію вихідних характеристик планетарного гідромотора при його проектуванні.

#### Список використаних джерел

1. Panchenko A., Voloshina A., Milaeva I., Luzan P. Operating conditions' influence on the change of functional characteristics for mechatronic systems with orbital hydraulic motors. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham, 2019. 169–176, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_18)
2. Artiymov N., Antoshchenkov R., Antoshchenkov V., Ayubov A. Innovative approach to agricultural machinery testing. *Engineering for Rural Development*, 2021. 20. 692–698
3. Antoshchenkov R., Halych I., Nikiforov A. et al. Determining the influence of geometric parameters of the traction-transportation vehicle's frame on its tractive capacity and energy indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. 2 (7(116)). 60–61, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254688>
4. Antoshchenkov R., Bogdanovich S., Halych I., Cherevatenko H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. 1 (7 (121)). 7–14, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>
5. Vecchiato D., Demenego A., Argyris J., Litvin F.L Geometry of a cycloidal pump. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001. 190. 2309–2330, [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00236-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00236-X)
6. Bonandrini G., Mimmi G., Rottenbacher C. Theoretical analysis of internal epitrochoidal and hypotrochoidal machines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2009. 223. 1469–1480, <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1163>
7. Panchenko A., Voloshina A., Milaeva I., Panchenko I., Titova O.: The Influence of the form Error after Rotor Manufacturing on the Output Characteristics of an Orbital Hydraulic Motor. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018. 7 (4.3). 1–5. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19542>
8. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А. Вплив величини діаметрального зазору на кінематику руху внутрішнього ротора орбітального гідромотора. *Науковий вісник ТДАТУ*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 13. Т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-3>
9. Panchenko A., Voloshina A., Sadullozoda S.S., Panchenko I., Mitin V. The Changes in the Output Parameters of Planetary Hydraulic Machines with the Increase in the Gap Between Their Rotors. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV. LNME*. Springer, Cham, 2023. 540–551, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_51)
10. Vacca A., Klop R., Ivantysynova M. A numerical approach for the evaluation of the effects of air release and vapour cavitation on effective flow rate of axial piston machines. *International Journal of Fluid Power*, 2010. 1(11). 33–45. <https://doi.org/10.1080/14399776.2010.10780996>
11. Yang D., Yan J., Tong S. Flowrate Formulation of Deviation Function Based Gerotor Pumps. *Journal of Mechanical Design*, 2010. 6(132). 064503-5. <https://doi.org/10.1115/1.4001595>
12. Yao J., Shi W., Wu S., Zhang D., Wang H., Hu Q. Numerical calculation and experiment on pressure fluctuation in axial flow pump. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013. 1(44). 119–124. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.022>
13. Paffoni B. Pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2003. 217. 179–187, <https://doi.org/10.1243/095441003769700744>



14. Paffoni B., Progri R., Gras R. Teeth clearance effects upon pressure and film thickness in a trochoidal hydrostatic gear pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2004. 218. 247–256, <https://doi.org/10.1243/0954410041872799>
15. Bonandrini G., Mimmi G., Rottenbacher C.: Design and simulation of meshing of a particular internal rotary pump. *Mechanism and Machine Theory*, 2012. 49. 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.001>
16. Choi T. H., Kim M. S., Lee G. S., et al. Design of rotor for internal gear pump using cycloid and circular-arc curves. *Journal of Mechanical Design*, 2012. 134. 011005. <https://doi.org/10.1115/1.4004423>
17. Andrenko P., Rogovyi A., Hrechka I., Khovanskyi S., Svnarenko M. Characteristics improvement of labyrinth screw pump using design modification in screw. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 1741 (1). 012024, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>
18. Panchenko A., Voloshina A., Panchenko I., Titova O., Caldare A. Design of Hydraulic Mechatronic Systems with Specified Output Characteristics. *DSMIE 2020: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. LNME. Springer, Cham, 2020. 42–51, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_5)
19. Voloshina A., Panchenko A., Titova O., Milaeva I., Pastushenko A. Prediction of Changes in the Output Characteristics of the Planetary Hydraulic Motor. *InterPartner 2020: Advanced Manufacturing Processes II*. LNME. Springer, Cham, 2021. 744–754. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_72)
20. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Обґрунтування кінематичних схем розподільних систем гідромашин планетарного типу. *Праці ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ*, 2018. Вип. 18. Т. 2. С. 30–49. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-18-2-29-48>
21. Biernacki K. Analysis of the Material and Design Modifications Influence on Strength of the Cycloidal Gear System. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 2015. 3(16). 537–546.
22. Kiurchev S., Luzan P., Zasiadko A., Radionov H., Boltianska N. Influence of the flow area of distribution systems on changing the operating parameters of planetary hydraulic motors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021. 1021. 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012037>
23. Voloshina A., Panchenko A., Titova O., Panchenko I. Changes in the dynamics of the output characteristics of mechatronic systems with planetary hydraulic motors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 1741. 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012045>
24. Panchenko A., Voloshina A., Panchenko I., Pashchenko, V., Zasiadko A. Influence of the Shape of Windows on the Throughput of the Planetary Hydraulic Motor's Distribution System. In: Ivanov V. et al. (eds) *DSMIE 2021: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. LNME. Springer, Cham, 2021. 2. 146–155. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_15)
25. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Засядько А. І. Поліпшення вихідних характеристик планетарних гідромашин. *Праці ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ*, 2019. Вип. 19. Т. 2. С. 68–85. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-2-68-85>
26. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Zasiadko A. Geometrical parameters for distribution systems of hydraulic machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham, 2019. 323–336, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_34)
27. Voloshina A., Panchenko A., Titova O., Pashchenko V., Zasiadko A. Experimental studies of a throughput of the distribution systems of planetary hydraulic motors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021. 1021. 012054, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012054>
28. Voloshina A., Panchenko A., Boltiansky O., Zasiadko A., Verkholtantseva V. Improvement of the Angular Arrangement of Distribution System Windows When Designing Planetary Hydraulic Machines. *InterPartner 2021: Advanced Manufacturing Processes III*. LNME. Springer, Cham, 2022. 53–63. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_6)
29. Ding H., Lu J., Jiang B. A CFD model for orbital gerotor motor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2012. 15 (6). 062006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/6/062006>
30. Panchenko A., Voloshina A., Titova O., Panchenko I., Zasiadko A. The Study of Dynamic Processes of Mechatronic Systems with Planetary Hydraulic Motors. *InterPartner 2020: Advanced Manufacturing Processes II*. LNME. Springer, Cham, 2021. 704–713. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5\\_68](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_68)
31. Панченко А. І., Волошина А. А., Мітков В. Б., Волошин А. А. Вплив конструктивних особливостей планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки. *Праці ТДАТУ. Мелітополь: ТДАТУ*, 2023. Вип. 23. Т. 1. С. 6–26. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-6-26>

32. Furustig J., Almqvist A., Pelcastre L., Bates C. A., Ennemark, P., Larsson, R. A strategy for wear analysis using numerical and experimental tools, applied to orbital type hydraulic motors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2016. 230. 2086–2097. <https://doi.org/10.1177/0954406215590168>
33. Bates C. A., Broe-Richter H. W., Bendlin C. R., Ennemark P. The effect of an amorphous hydrogenated carbon-coated gear-wheel on a hydraulic orbital motor's efficiency over time. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2018. 1–14. <https://doi.org/10.1177/1350650117752610>
34. Strmčnik E., Majdič F. The improvement of the total efficiency of the gerotor orbital hydraulic motor. In *Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference, Aachen, Germany (19–21 March 2018)*. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2018-224639>
35. Kiurchev S., Abdullo M.A., Vlasenko T., Prasol S., Verkholtantseva, V. Automated Control of the Gear Profile for the Gerotor Hydraulic Machine. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV. LNME*. Springer, Cham, 2023. 32–43. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_4)
36. Panchenko A., Voloshina A., Boltianska N., Pashchenko V., Volkov S. Manufacturing Error of the Toothed Profile of Rotors for an Orbital Hydraulic Motor. *InterPartner 2021: Advanced Manufacturing Processes III. LNME*. Springer, Cham, 2022. 22–32. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_3)
37. Panchenko A., Voloshina A., Titova O., Panchenko I. The influence of the design parameters of the rotors of the planetary hydraulic motor on the change in the output characteristics of the mechatronic system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. 1741. 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012027>
38. Gamez-Montero P. A Review of Gerotor Technology in Hydraulic Machines. *Energies*, 2019. 12(12). 2423. <https://doi.org/10.3390/en121224232019>

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2025*

*Стаття прийнята 12.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**A. Panchenko<sup>1</sup>, A. Voloshina<sup>1</sup>, I. Panchenko<sup>1</sup>, I. Kholod<sup>1</sup>, A. Voloshin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

<sup>2</sup>**Melitopol Vocational College of TSATU**

## **INFLUENCE OF DESIGN FEATURES OF CYCLOIDAL ENGAGEMENT ON THE GEOMETRIC AND FUNCTIONAL PARAMETERS OF A PLANETARY HYDRAULIC MOTOR**

### *Summary*

Today, planetary (orbital) hydraulic motors are used in various areas of mechanical engineering, in mechanisms with low-speed, high-torque rotary drives. During operation of a planetary hydraulic machine, rotors wear causes the diametrical clearance to continually increase due to changes in the rotors tooth curvature radii caused by wear on their working surfaces. Therefore, studying the influence of tooth curvature radii on changes in the geometric and functional parameters of planetary hydraulic machine rotors is a pressing issue in order to stabilize the output characteristics of planetary hydraulic motors.

As a result of the conducted research, a calculation scheme and mathematical apparatus were developed that make it possible to determine the change in the geometric and functional parameters of an planetary hydraulic motor depending on wear (increase in diametrical clearance) and to carry out mathematical modeling of the change in the geometric parameters of cycloidal engagement elements under operating conditions (during wear).

The conducted research has established that the primary functionally justified indicator determining the technical condition of the cycloidal gearing and the planetary hydraulic machine as a whole is the diametrical clearance. The resulting patterns of influence of the rotor tooth curvature radius of a planetary hydraulic motor on changes in its geometric and functional parameters will ensure the stabilization of the planetary hydraulic motor's output characteristics during its design.

**Keywords:** cycloidal engagement, diametral clearance, contact clearance, tooth curvature radius, pitch circle radius.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-17>

УДК 001.891.3:165.21

С. П. Сокол, к.т.н., доцент

І. А. Волик, к.т.н., доцент

Є. І. Лепеть, асистент

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет*

e-mail: sokol.s.p@dsau.dp.ua

ORCID : 0000-0003-4541-5720

ORCID : 0000-0002-9861-3723

ORCID : 0000-0002-0482-538X

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗЕМЛЕРОБСЬКОЇ МЕХАНІКИ ТА ЇХ АНАЛІЗ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ НА ПРОЄКТНОМУ ЕТАПІ РОЗРОБКИ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

*Анотація.* У роботі проаналізовано основні фундаментальні моделі землеробської механіки щодо використання в процесі розробки й проєктування ґрунтообробних робочих органів. Запропоновано узагальнювальну інтегральну модель обґрунтування конструктивних параметрів знаряддя. З урахуванням імовірного характеру протікання процесів кришення й розпушення ґрунтового середовища. Наведено приклади прикладних моделей, побудованих за представленими в роботі принципами. У статті запропоновано систематизацію відомих моделей. Загалом, процес розробки знаряддя представлений як сукупність моделей, розглянутих послідовно. Окремо досліджено стохастичні й аналітичні моделі. Наведено рекомендації з їх використання відповідно до етапів проєктування, починаючи з ескізного й завершуючи технічним проєктами.

*Ключові слова:* землеробська механіка, ґрунтообробка, інтегральна математична модель, якісні показники кришення й розпушення.

*Постановка проблеми.* Процес розробки ґрунтообробного наряддя можна розглядати як послідовність виконання низки модельних досліджень. Математична модель у цій послідовності є основним інструментом обґрунтуванням на проєктному етапі конструктивних параметрів робочого органу. Але проблема полягає в тому, що кожний різновид робочого органу повинен мати власну прикладну модель, яка б установлювала залежність показників виконання технологічного процесу від конструктивних параметрів знаряддя й механіко-технологічних властивостей оброблюваного середовища. Така прикладна модель розробляється на основі дійсних фундаментальних моделей з використанням методів теоретичної і землеробської механіки, нарисної та аналітичної геометрії.

Останнім часом науковці запропонували низку нових фундаментальних моделей. Ми проаналізували можливість їх використання в практичній роботі з розробки й проєктування.

*Мета дослідження* – аналіз й адаптація математичних моделей і методик обґрунтуванням конструктивних параметрів ґрунтообробних робочих органів щодо можливості використання в процесі проєктних робіт.

*Огляд досліджень.* Серед усіх видів моделювання математичне є найбільш поширеним. Воно поділяється на детермінантне, або таке, що базується на рівняннях, які описують фізичні закони протікання процесів в об'єкті, і стохастичне, засноване на математичній обробці отриманого за допомогою спостережень чисельного масиву даних, що характеризують роботу об'єкта дослідження.

Під землеробською механікою розуміють розділ загальної механіки, який вивчає будову й кінематику механізмів, що взаємодіють з матеріалами сільськогосподарського призначення. Фактично, землеробська механіка є систематизованою сукупністю математичних моделей, які поділяють на

фундаментальні, або такі, що вивчають загальнотеоретичні питання, і прикладні – такі, що стосуються раціоналізації окремого конструктивного параметру знаряддя. Фундаментальні моделі не можна використати безпосередньо для розробки робочих органів. Вони становлять основу розробки прикладних моделей. Прикладна модель є підсумковим етапом аналітичного дослідження технологічного процесу, виконуваного конкретним робочим органом. Розрахунковий курс сільськогосподарських машин і є такою сукупністю прикладних детермінантних моделей.

Огляд аналітичних досліджень [2; 4; 8; 14; 16] показує, що математичні моделі землеробської механіки можна систематизувати за такою схемою, рис. 1.

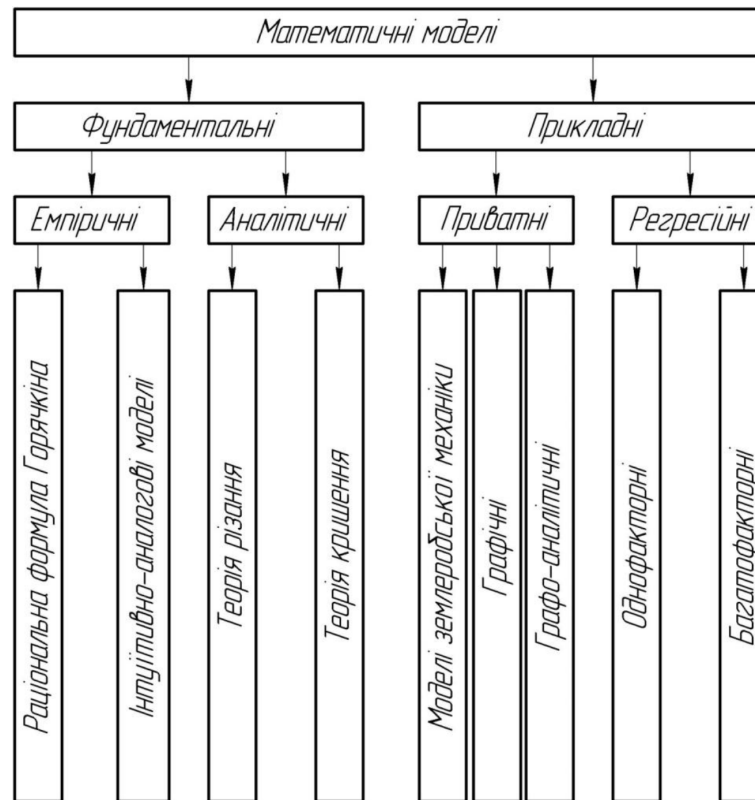


Рис. 1. Систематизація видів математичного моделювання ґрунтообробних машин [4]

Проаналізуємо сутність окреслених моделей і можливі варіанти їх використання як основи загальної графоаналітичної моделі.

#### 1. Фундаментальні моделі.

1.1. Раціональна формула В. П. Горячкіна – фундаментальна емпірична модель взаємодії плуга з ґрунтом [4].

Рівняння сформоване методом інтуїтивно-аналітичного аналізу, а саме: В. П. Горячкін окреслив групу всіх можливих конструктивно-кінематичних параметрів плуга, які можуть впливати на тяговий опір, і запропонував їх об'єднати в раціональну формулу Використовуючи метод аналізу розмірностей, обґрунтовано низку коефіцієнтів, які й формують рівняння. Методикою аргументовані тільки розмірності коефіцієнтів. Чисельне їх значення може бути визначене тільки в процесі натурного експерименту. Саме рівняння не наводимо, бо воно є загальновідомим і розглядається у звичайних підручниках з курсу сільськогосподарських машин.

Модель містить виключно механізм перевірки ефективності конструкції з погляду виконання технологічного процесу й не містить механізмів обґрунтування конструктивних параметрів. Тому на проєктному етапі в канонічному виді має обмежене застосування. Але опосередковано рівняння може бути використане.

Раціональна формула В. П. Горячкіна на пряму не може бути використана в загальній моделі, бо конструктивні параметри знаряддя входять до так званого чорного ящика, і їх вплив оцінити неможливо. Необхідно ввести в рівняння вихідні параметри, які б допомогли оцінити тяговий опір залежно від конструктивних параметрів знаряддя, при цьому не порушували загальної концепції моделі. Єдиний варіант – це встановлення залежності ширини захвату й глибини оранки від досліджуваних параметрів знаряддя. Так, наприклад, для полицевих робочих органів це може бути кут постановки леміша до дна борозни ( $\varepsilon$ ) і кут постановки леза леміша до стінки борозни ( $\gamma_0$ ), для глибокорозпушувача – кут атаки і ширина долота. Практика показує, що введення більше трьох змінних параметрів недоцільне, бо значно ускладнює проведення розрахунків і зменшує їх адекватність.

1.2. Аналітична модель взаємодії з ґрунтом робочого органу довільної геометричної форми А. М. Панченка [4; 14].

На відміну від вищерозглянутих у цій моделі, робочий орган функціонально поділяється на ріжучий периметр і робочі поверхні. Леза ріжучого периметра зминають ґрунт і відділяють від загального масиву призму сколювання, яка надходить на робочі поверхні. Робочі поверхні кришать і розпушують ґрунт. Поверхні сприймають тиск ґрунту, сили тертя і швидкісний напір. Принциповим у моделі є те, що складники тягового опору максимально деталізовані. Як результат, тяговий опір має такі складники [4]:

$$P = P_{ск} + (P_N + P_{TP} + P_{зат} + P_V) \cdot \cos \left[ \arctg \frac{i \cdot \sin \varphi}{\cos \varphi} - \varphi \right], \quad (1)$$

де:  $P_{ск}$ ,  $P_N$ ,  $P_{TP}$ ,  $P_{зат}$ ,  $P_V$  – відповідно проєкції на напрямок руху відповідно сил сколювання призми, нормального тиску ґрунту на поверхню, сили тертя при переміщенні ґрунту вздовж робочої поверхні, додаткова сила від затуплення леза, швидкісного складника опору [4].

Так, А. М. Панченко за аналогією з В. П. Горячкіним фактично запропонував власну раціональну формулу (1).

Знайшовши аналітичні вирази для складників рівняння (1), автор прийшов до трьох інтегральних формул: [14, ф-ла 202] – для блокованого режиму взаємодії з ґрунтом робочого органу довільної геометричної форми, [14, ф-ла 221] – деблокованого, [14, ф-ла 220] – напівблокованого. Методика має низку особливостей, які роблять її ексклюзивною в цьому напрямі досліджень. Особливість полягає в тому, що методика працює з приведеними значеннями ширини захвату й глибини робочого ходу. Робоча поверхня розглядається як міделевий перетин конструктивної ширини захвату. Це спрощує модель, але вимагає окремих модельних уявлень типових робочих поверхонь. Панченко запропонував методики визначення приведеної ширини захвату для типових поверхонь [2, табл. 4]. Тяговий опір однотипних, але різних за конструктивним виконанням робочих органів за однакової приведеної ширини захвату буде однаковим. Це робить проблематичним використання методики для порівняння показників роботи різнотипних знарядь. До того ж збіжність з результатами експериментальних досліджень аналітично розрахованих результатів залежить від ступеня адекватності методик визначення приведених параметрів.

Дослідження, виконані на основі наведеної методики, дають змогу на проєктному етапі оцінити прогнозований тяговий опір робочого органу й шляхом зміни конструктивних параметрів виконати їх раціоналізацію, аналітично визначити прогнозований тяговий опір конструкції, але не дає змоги оцінити якість кришення середовища.

У роботі [14] запропоновано вирішити проблему шляхом введення спеціального показника, який отримав назву внутрішньої напруги. Сутність полягає в тому, що в оброблюваному середовищі елементарні сили зчеплення, внутрішнього тертя й пружності утворюють напружений стан. Для деструкції такого середовища цю силу необхідно подолати напруженим станом, що

утворює робочий орган. Теорія є результатом розробки й аналізу ряду аналітичних моделей. Так, наприклад, розрахункове значення внутрішньої напруги ( $G$ ) для усереднених ґрунтових умов Дніпропетровської області становить  $G = 638 \text{ кН/м}^2$ ;

Процес кришення характеризується штучно введеним коефіцієнтом кришення ( $i_1$ ), який є основою для подальших розрахунків основних показників кришення [6,13], як-от коефіцієнт структурності, коефіцієнт різноподрібнення структурних агрегатів, структурність ґрунту [4].

$$i_1 = \frac{2K_p \cdot E_v}{G^2} + 1, \quad (2)$$

де:  $K_p$  – питомий коефіцієнт опору;  $E_v = 24,0 \cdot 10^3 \text{ кН/м}^2$ , середнє заміряне значення модуля пружності ґрунту для Дніпропетровської області.

Так, графоаналітична модель А. М. Панченко систематизована за такою схемою, рис. 2.

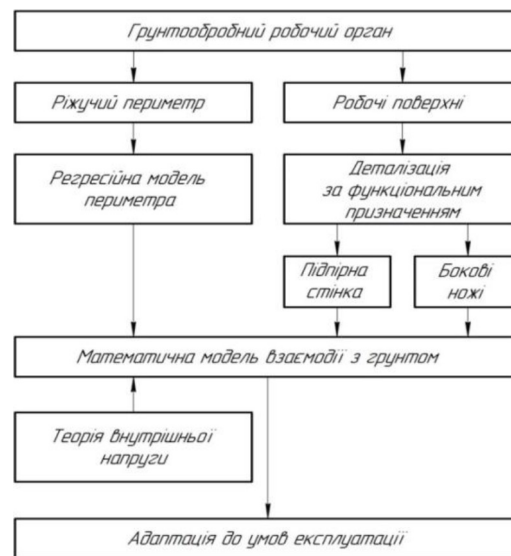


Рис. 2. Структурна схема аналітичної моделі відповідно до раціональної формули А. М. Панченко

## 2. Графоаналітичні моделі.

2.1. Графоаналітичні моделі проєктування поверхонь поличних робочих органів М. В. Сладкова і М. В. Щучкіна [9].

В основі графоаналітичних моделей закладена робоча гіпотеза, відповідно до якої робоча поверхня формується переміщенням у просторі прямолінійної твірної. Перевага такого підходу полягає в тому, що отримувані поверхні є розгортними, тобто полиця є технологічною з погляду виготовлення. Відмінність моделей полягає в тому, що, за методикою М. В. Сладкова, переміщення твірної виконується по двох напрямних кривих. Відповідно до методики М. В. Щучкіна, по одній напрямній при зміні кута твірної до стінки борозни. Напрямна крива і кут постановки твірної визначають геометрію та орієнтацію в просторі робочого органу. У моделі задано базовий варіант рівняння напрямної, але профіль може бути адаптований під конкретні вимоги взаємодії з ґрунтом. До того ж функція може бути розривною, що надає додаткові можливості в моделюванні.

Відомий варіант [11], у якому поверхня робочого органу утворена переміщенням у просторі горизонтальної і вертикальної криволінійних утворюючих. При нескінченно малому переміщенні в перетині утворюється нескінченно мала ділянка, яка може розглядатися як плоска підпірна стінка, що має кути постановки до вертикалі й напрямку руху. Сума всіх ділянок утворює поверхню робочого органу. Аналогічний підхід до вирішення проблеми розглянуто в [17].

Слід відмітити, що наведені методики дають змогу будувати конструкцію робочого органу з погляду можливості виконання технологічного процесу без урахування тягового опору і якісних показників кришення та розпушення ґрунту.

## 2.2. Графоаналітична модель С. С. Тищенка [15; 16].

Графоаналітичні моделі М. В. Сладкова і М. В. Щучкіна використовують лінійчасті поверхні. У такому разі на площинах декартових координат, проєкції утворювальних описуються двома рівняннями прямої лінії, тому кількість параметрів, що визначають положення твірної у просторі, дорівнює чотирьом. С. С. Тищенко запропонував ці показники вважати функціями деякого узагальнювального параметра, а саме коефіцієнта адаптивності [6], що робить функцію однопараметричною. Це надає можливість зміною тільки одного єдиного коефіцієнта отримувати як розгортні, так і нерозгортні поверхні. Принципова відмінність полягає в тому, що розгортна поверхня доводить до шару ґрунту тільки деформацію простого згину [15; 16]. А по мірі поступового переходу до нерозгортної поверхні в шарі ґрунту виникають пластичні деформації. Так, геометрична модель поверхні зі змінюваною Гауссовою кривизною дає змогу їх проєктувати із заданою інтенсивністю дії на ґрунт. Але для оцінки ефективності конкретного конструктивного рішення необхідно оцінити прогнозовані якісні показники взаємодії робочої поверхні з ґрунтовим середовищем, а для цього потрібна аналітична модель взаємодії з ґрунтом робочої поверхні довільної геометричної форми.

### Основний матеріал досліджень.

Як показує виконаний аналіз, графоаналітична модель надає геометрію робочого органу, а аналітична – методику оцінки якісних показників виконання технологічного процесу. Тому як інтегральну модель доцільно приймати синтез графоаналітичної та аналітичної моделей, рис. 3.

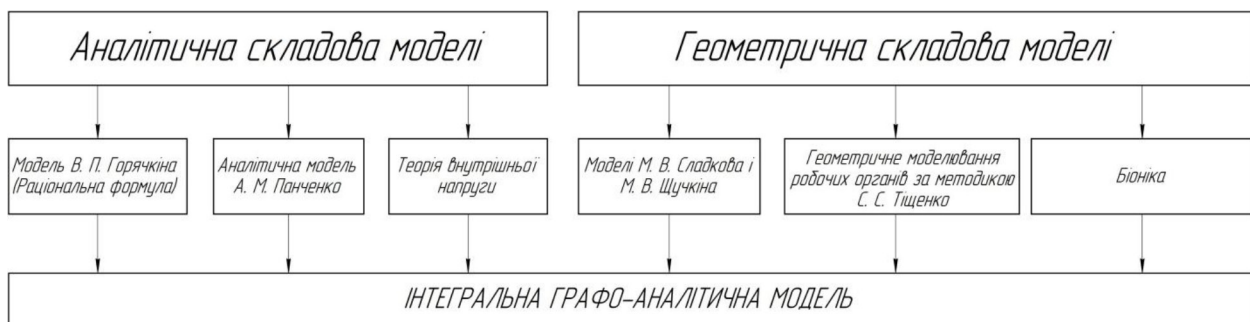


Рис. 3. Схема синтезу інтегральної графоаналітичної моделі

Інтегральна модель повинна виконувати завдання проєктування відповідно до етапів розробки конструкторської документації, особливо це стосується етапів ескізного й технічного проєктів. Розглянемо модель поетапно.

Авансовий проєкт має переважно регламентаційний характер, а саме: обґрунтовує технологічний процес, окреслює технічні характеристики машини, умови, у яких передбачена її експлуатація і якісні показники виконання технологічного процесу. Етап можна розглядати як текстову модель. Ескізний проєкт – проєктна конструкторська документація, яка містить принципові конструктивні рішення та дає загальне уявлення про будову й принцип дії знаряддя. Визначальним на цьому етапі є прийняття геометричної моделі як основи подальших досліджень. Обґрунтування геометричної моделі має декілька варіантів виконання: синтез відомих конструкцій, інтуїтивно-аналітичний метод, методи біоніки [1; 3; 7].

На етапі ескізного проєктування розробляється конструктивна й технологічна схеми. Конструктивні параметри ще не деталізуються. На підставі розроблених схем можна оцінити



прогнозовану ширину захвату і глибину робочого ходу, що робить правомірним застосування раціональної формули В. П. Горячкіна для порівняння в першому наближенні різних варіантів виконання конструктивної схеми за величиною прогнозованого тягового опору. Для порівняння варіантів достатньо мати не абсолютні значення величин тягового опору, а співвідношення складників раціональної формули у варіантах, які визначають реакцію різання, кришення і розпушення. Тобто за наявності інших рівних умов варіанти достатньо порівнювати за величиною площі міделевого перетину.

Технічний проєкт – проєктна конструкторська документація, яка містить остаточне технічне рішення і дає повне уявлення про будову машини та її складових одиниць. Найперше виконують креслення основного робочого органу й наступним етапом допоміжних. Розробка робочого органу полягає в адаптації геометричної моделі до роботи в реальних ґрунтових умовах. Адаптація може бути виконана за критеріями коефіцієнта ковзання або якості кришення [9]. В обох випадках остаточне рішення може бути прийняте за прогнозованою величиною тягового опору, яку пропонується визначити за раціональною формулою А. М. Панченка [14].

Ми пропонуємо в раціональній формулі відмовитися від використання приведених значень ширини захвату. Прийнята робоча гіпотеза полягає в тому, що, на відміну від моделі А. М. Панченка, робочий орган розглядається не як єдине ціле – у ньому виокремлюють різальний периметр і робочі поверхні. Така диференціація пов'язана з відмінністю механізмів різання і кришення. Різальний периметр підрізає шар ґрунту і відділяє від загального масиву призму сколу. Робочі поверхні виконують розпушення, зсув та обертання підрізаної призми. Важливим елементом технологічної схеми роботи знаряддя є аналіз режимів роботи його складників. Якщо різальний периметр працює в блокованому режимі, то робочі поверхні працюють у межах сколотої призми, тому режим може бути як напівблокованим, так і деблокованим. Визначається графічно шляхом побудови схеми розповсюдження тріщин сколу від елементів складників різального периметра [12].

Наступним етапом необхідно отримати аналітичні вирази, які однозначно описують у системі координат геометричні моделі різального периметра і робочих поверхонь, що є обов'язковою умовою для створення аналітичної моделі. У роботі [14] представлено узагальнені схеми моделювання різального периметра й робочої поверхні. Далі, за рекомендацією [14], питомий коефіцієнт опору розглядається як відношення проєкцій на напрямок руху сил різання і реакції робочих поверхонь до площі міделевого перетину робочого органу. Такий підхід надає можливості оцінити на проєктному етапі ступінь кришення і, як наслідок, усі основні показники кришення відповідно до переліку [13]. Робочий проєкт безпосередньо не впливає на конструктивне рішення, тому ми їх не розглядаємо. Досліджені підходи до розробки знаряддя пройшли апробацію [18] і знайшли практичне підтвердження ефективності.

#### *Висновки:*

1. Математичне моделювання за своєю суттю є єдиним інструментом, що дає змогу на проєктному етапі адаптувати робочі органи до роботи в умовах ґрунтового середовища.
2. Серед фундаментальних основ досліджень ґрунтообробних робочих органів можна виділити дві моделі: стохастичну – раціональна формула В. П. Горячкіна, й аналітичну – раціональна формула А. М. Панченка.
3. Теорія внутрішньої напруги може бути прийнята як методична основа аналітичних досліджень.
4. Наведений у роботі алгоритм сумісного використання стохастичних, аналітичних і графоаналітичних моделей дає змогу виконати комплексний підхід до розробки та проєктування.
5. Головна умова функціонування алгоритму досліджень полягає в розмежуванні геометричних моделей різального периметра й робочих поверхонь

*Список використаних джерел*

1. Бабицький Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин. Київ : Урожай, 1998. 164 с.
2. Ветохін В. І. Системні та фізико-механічні основи проектування розпушувачів ґрунту : автореф. дис. ... д-ра техн. наук; ННЦ ІМЕСГ. Глеваха, 2010. 40 с.
3. Волик Б. А., Лісунов П. М., Коновий А. В. Формування геометричних моделей ґрунтообробних робочих органів на основі методів біоніки та їх адаптація до роботи в умовах ґрунтового середовища: Achievements of 21st Century Scientific Community: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, September 16–17, 2024. FOP Marenichenko V. V., Dnipro, Ukraine, p 68–69.
4. Волик Б. А., Теслюк Г. В., Коновий А. В., Лепеть Є. І. Аналітичний огляд методів моделювання засобів механізації обробітку ґрунту. Науковий вісник ТДАТУ. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 13, том 1. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/issue/view/28> DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-2
5. Волик Б. А., Степанець О. І., Шпильковський В. В., Аналіз відомих математичних моделей взаємодії з ґрунтом ріжучого периметра довільної геометричної форми / Сучасний стан та перспективи розвитку аграрного сектору України: Зб. наукових праць (30 листопада 2018, м. Ніжин) / За наук. Ред. В. С. Лукача [та ін.]. Ніжин, 2018. С. 23–33.
6. Волик Б. А., Теслюк Г. В., Коновий А. В., Лепеть Є. І. Методика прогнозування на проєктному етапі якісних показників роботи ґрунтообробного знаряддя. *Науковий вісник ТДАТУ*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2.
7. Волик Б. А., Сокол С. П. Узагальнена схема цифрового механіко-біонічного моделювання ґрунтообробних машин. Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2023 року), присвяченій 123 річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. С. 68–71.
8. Кобець А. С., Сокол С. П., Пугач А. М., Дирда В. І., Волик Б. А., Тищенко С. С., Гаврильченко О. С. Землеробська механіка. Дніпро, Пороги, 2022. 408 с.
9. Кобець А. С., Кобець О. М., Пугач А. М. Теорія і розрахунок сільськогосподарських машин: практикум. Дніпропетровськ : Вид-во «Свідлер А. Л.». 2011. 164 с.
10. Konoiviy A., Volik B. Adaptation of the geometric model of the body of marine animal as a tillage tool./ International independent scientific journal №30/2021, Kraków, Rzeczpospolita Polska. p. 66–68.
11. Семенюта А. М. Методика розрахунку загальної реакції різання ґрунту поверхнею довільної геометричної форми.
12. Кобець А. С., Іщенко Т. Д., Волик Б. А., Демидов О. А. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів : навч. посібник. Дніпропетровськ : РВВ ДДАУ, 2009. 84 с.
13. Єщенко В. О., Копитко П. Г., Опришко В. П., Костогриз П. В. Основи наукових досліджень в агрономії : підручник / за ред. В. О. Єщенко. Київ : Дія. 2005. 288 с.
14. Панченко А. Н. Теорія подрібнення ґрунтів ґрунтообробними знаряддями. Дніпропетровськ : ДГАУ, 1999. 140 с.
15. Тищенко С. С., Карась В. В. Геометричні основи проектування полічних робочих органів: монографія. Дніпро : ТОВ «Домінанта-Прінт»,
16. Тищенко С. С. Геометрическое моделирование адаптивных почвообрабатывающих органов. / «Проблеми та перспективи розвитку Аграрної Механіки» Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Дніпропетровськ, 2004. С. 29.
17. Gheres M. I. Mathematical model for studing the influence of tillage tool geometry on onenergy consumption. Vol. 42, No. 1 / 2014 INMATEH – Agricultural Engineering
18. Maria Matvienko, Boris Volyk, Yevhen Lepet. Substantiation of the design and field studies of the roller shredder of plant The materials of the 5th International Scientific and Technical Internet Conference “Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources”. Book of Abstracts. Petroșani, Romania: universitas Publishing, 2022. P. 223–224

Стаття надійшла до редакції 19.10.2025

Стаття прийнята 05.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**S. Sokol, B. Volyk, Ye. Lepet**  
**Dnipro State Agrarian and Economic University**

**ANALYTICAL REVIEW OF FUNDAMENTAL MATHEMATICAL MODELS  
OF EARTH MECHANICS AND THEIR ANALYSIS FOR CONDITIONS  
OF USE AT THE DESIGN STAGE OF SOIL PROCESSING MACHINES**

*Summary*

The paper analyzes the main fundamental models of agricultural mechanics for use in the development and design of tillage working tools. A generalizing integral model of substantiation of the design parameters of the tool is proposed, taking into account the probabilistic nature of the processes of crumbling and loosening of the soil environment. Examples of applied models built according to the principles presented in the work are given. The work proposes a systematization of known models. In general, the tool development process is presented as a set of sequentially considered models. Stochastic and analytical models are considered separately. Recommendations are given for their use in accordance with the design stages, starting from the sketch and ending with technical projects. Graphoanalytical models are considered as those that combine analytical mathematical and design parts. The main disadvantage of such models is that they are designed mainly for shelf working bodies and they do not contain recommendations for substantiation of the initial parameters.

The fundamental condition for successful design according to this scheme is the need to clearly determine the type of tool at the initial stage: will it be a shelf working body, a deep cultivator, or a variant of a pointed paw.

The main condition for the functioning of the research algorithm is the separation of geometric models of the cutting perimeter and working surfaces.

The considered approaches to tool development have been tested and have found practical confirmation of their effectiveness.

**Keywords:** Agricultural mechanics, tillage, integral mathematical model, qualitative indicators of crumbling and loosening.



---

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-18>

УДК 621.313.3.025.3-78

О. Ю. Вовк, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0154-6972

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: Oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua

**РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗНИЖЕННЯМ НАВАНТАЖЕННЯ**

*Анотація.* У роботі розглянуто методи керування асинхронними двигунами за мінімумом витрати ресурсу. Встановлено, що більшість із них спрямовані на контроль втрат потужності й не враховують швидкості зношення елементів конструкції електродвигуна. Для можливості здійснення ресурсозберігаючого керування запропоновано як критерій оцінювання застосовувати швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора асинхронного двигуна. Розроблено математичну модель процесу теплового зношення ізоляції обмотки, за допомогою якої отримано рівняння кратності живлячої напруги у функції коефіцієнта завантаження за умови мінімуму швидкості теплового зношення ізоляції. Це дає можливість будувати алгоритми та пристрої регулювання напруги живлення електродвигуна для збереження його ресурсу зі зниженням навантаження.

*Ключові слова:* електричні машини, електропривод, збереження ресурсу, швидкість теплового зношення ізоляції, перевищення температури, втрати потужності, кратність напруги, коефіцієнт завантаження.

*Постановка проблеми.* На сьогодні найпоширенішими електродвигунами є асинхронні – у світі їх налічується близько 300 млн, а споживають вони приблизно 40 % виробленої у світі електроенергії [1; 2]. Причиною цього є висока конструкційна надійність та порівняно низька вартість виготовлення зазначених електродвигунів [3; 4]. При цьому надійність асинхронних двигунів в експлуатаційних умовах знижується через зовнішні впливи, які повністю не були передбачені під час проєктування [5]. Це підтверджується таким: щорічні витрати на ремонти та технічне обслуговування зазначених електродвигунів становлять близько 8 % від річного обігу грошових коштів промислових галузей економіки Європи [6], щорічно виходять із ладу до 4 % встановлених асинхронних двигунів [7]. Найчастіше до такої ситуації призводить теплове старіння ізоляції асинхронних двигунів, яке обумовлене різними факторами [8], головним з яких є вплив робочих машин (змінне навантаження, перевантаження, поштовхи, вібрації тощо) [9–11]. Тому дослідження дії робочих машин на ресурс асинхронних двигунів і розробка ресурсозберігаючого впливу на електродвигуни за зміни навантаження є актуальною задачею.

*Аналіз останніх досліджень.* Існуючі дослідження переважно спрямовані на енергозберігаюче керування асинхронними двигунами. На цю тему є багато оглядових робіт [12–14], де запропоновано методи керування асинхронними двигунами з погляду енергозбереження розподілити на такі групи: 1) методи керування за станом електродвигуна; 2) методи керування із застосуванням моделі втрат потужності в електродвигуні; 3) методи керування електродвигуном за допомогою прямої оптимізації. До недоліків методів першої групи належить те, що в керуванні не враховуються зміна напруги живильної мережі, навантаження електродвигуна, вид механічної характеристики робочої машини, нагрівання всіх його активних частин і швид-



кість теплового зношення ізоляції електродвигуна. Недоліками методів другої групи є значна лінеаризація параметрів електродвигуна, відсутність реакції на зміну напруги живильної мережі, також не враховуються вид механічної характеристики робочої машини та швидкість теплового зношення ізоляції електродвигуна. Крім того, виникнення несправностей у вузлах електродвигуна (навіть незначних) призводитиме до збільшення втрат потужності в елементах його конструкції, а це також не враховують зазначені методи керування. До недоліків методів третьої групи належать порівняно значний час оптимізації, відсутність реакції на зміну напруги живильної мережі, також не враховуються вид механічної характеристики робочої машини та швидкість теплового зношення ізоляції електродвигуна.

Зустрічаються окремі роботи, які присвячені саме ресурсозбереженню під час керування асинхронними двигунами. Наприклад, у [15, 16] пропонується правило регулювання напруги електродвигуна за його енергозберігаючого керування. Воно спрямоване на збереження номінального значення швидкості теплового зношення ізоляції за регулювання напруги, проте не дає змоги здійснювати регулювання напруги у функції завантаження електродвигуна для забезпечення мінімального значення вказаної швидкості.

Таким чином, із викладеного випливає, що на сьогодні відсутні способи керування асинхронними двигунами за мінімумом витрати його ресурсу.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* У статті поставлено за мету обґрунтування способу ресурсозберігаючого керування асинхронних двигунів в умовах зміни навантаження шляхом регулювання напруги на його затискачах.

*Основна частина.* Розглянемо, з яких причин відбувається зменшення ресурсу асинхронного двигуна протягом експлуатації. Згідно з [17–19] ресурс асинхронного двигуна зменшується внаслідок різноманітних впливів із боку електричної мережі (провали напруги, асиметрія напруги, відхилення частоти тощо), робочої машини (поштовхи, вібрації, перевантаження тощо), навколишнього середовища (температура, вологість, пил, агресивні хімічні сполуки тощо), унаслідок чого в елементах конструкції електродвигуна відбуваються різні процеси старіння. Відповідно до [17–19] у процесі експлуатації електродвигуна швидше за інші елементи відбувається зменшення ресурсу ізоляції обмотки статора. Здебільшого ресурс ізоляції обмотки статора витрачається внаслідок її теплового зношення. Тому як критерій збереження ресурсу електродвигуна під час керування візьмемо швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора, вираз якої згідно з [20] запишемо так:

$$\varepsilon = \varepsilon_n \cdot \exp \left[ B \cdot \left( \frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\tau_{обм} + \vartheta_{сер} + 273} \right) \right], \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – поточна швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора, баз. год/год;

$\varepsilon_n$  – номінальна швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора, баз. год/год;

$B$  – параметр, що характеризує клас ізоляції обмотки статора, К;

$\Theta_n$  – номінальне значення абсолютної температури обмотки статора, К;

$\tau_{обм}$  – поточне перевищення температури обмотки статора, °С;

$\vartheta_{сер}$  – поточна температура навколишнього середовища, °С.

Значення  $\varepsilon_n$ ,  $B$ ,  $\tau_{обм}$ ,  $\vartheta_{сер,n}$  визначаються конструкцією асинхронного двигуна, значення  $\vartheta_{сер}$  враховує вплив температури навколишнього середовища, а значення  $\tau_{обм}$  враховує вплив навантаження і живильної напруги на швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора електродвигуна.

Якщо асинхронний двигун встановлено в приміщенні, температура навколишнього середовища під час його роботи практично не змінюється і може вважатися постійною. Тому головним чинником, який впливає на швидкість теплового зношення його ізоляції, є поточне пере-

вищення температури обмотки. Дослідимо залежність поточного перевищення температури обмотки від навантаження та живильної напруги. Вважатимемо, що асинхронний двигун працює у тривалому режимі роботи, і запишемо вираз  $\tau_{обм}$  для цього режиму в такому вигляді:

$$\tau_{обм} = \tau_{обм.н} \cdot \frac{\Delta P_{var} + \Delta P_{const}}{\Delta P_i}, \quad (2)$$

де  $\tau_{обм.н}$  – номінальне перевищення температури обмотки, °С;

$\Delta P_{var}$  – поточні змінні втрати активної потужності в асинхронному двигуні, Вт;

$\Delta P_{const}$  – поточні постійні втрати активної потужності в асинхронному двигуні, Вт;

$\Delta P_n$  – номінальні втрати активної потужності в асинхронному двигуні, Вт.

Для знаходження виразів змінних і постійних втрат активної потужності розглянемо Г-подібну схему заміщення асинхронного двигуна [20], наведену на рис. 1.

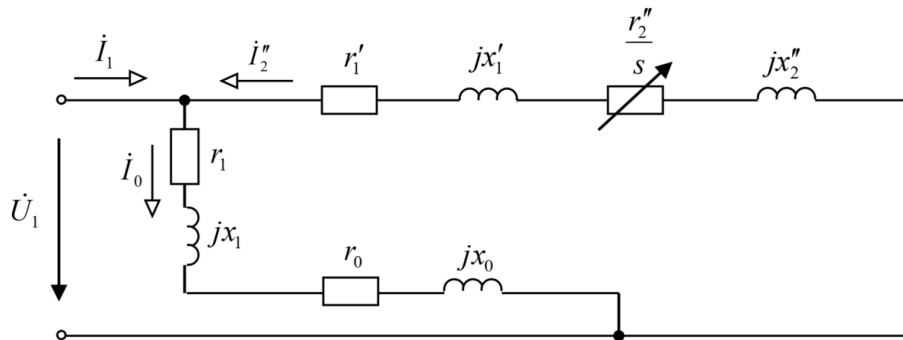


Рис. 1. Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

На Г-подібній схемі заміщення (рис. 1) позначено:  $\dot{U}_1$  – комплекс діючого значення фазної напруги електродвигуна, В;  $\dot{I}_1$  – комплекс діючого значення фазного струму електродвигуна, А;  $\dot{I}_2''$  – комплекс діючого значення струму навантажувальної вітки схеми, А;  $\dot{I}_0$  – комплекс діючого значення струму намагнічувальної вітки схеми, А;  $s$  – ковзання електродвигуна;  $r_1'$ ,  $x_1'$ ,  $r_2''$ ,  $x_2''$ ,  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $r_0$ ,  $x_0$  – опори схеми, Ом.

Згідно з рис. 1 змінні втрати активної потужності в асинхронному двигуні виділяються в активних опорах навантажувальної вітки схеми, тому запишемо їх так:

$$\Delta P_{var} = 3 \cdot (r_1' + r_2'') \cdot (I_2'')^2, \quad (3)$$

де діюче значення струму навантажувальної вітки схеми дорівнює:

$$I_2'' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1' + \frac{r_2''}{s}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}. \quad (4)$$

Після підстановки (4) у (3) отримаємо:

$$\Delta P_{var} = 3 \cdot \frac{(r_1' + r_2'')}{\left(r_1' + \frac{r_2''}{s}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \cdot U_1^2. \quad (5)$$

У номінальному режимі роботи вираз (5) матиме вигляд:

$$\Delta P_{var.н} = 3 \cdot \frac{(r_1' + r_2'')}{\left(r_1' + \frac{r_2''}{s_n}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \cdot U_{1н}^2, \quad (6)$$



де  $\Delta P_{var.n}$  – номінальні змінні втрати активної потужності в асинхронному двигуні, Вт;  
 $s_n$  – номінальне ковзання електродвигуна;  
 $U_{1n}$  – діюче значення номінальної фазної напруги електродвигуна, В.

Розділивши (5) на (6) та перетворивши, отримаємо:

$$\Delta P_{var} = \Delta P_{var.n} \cdot \frac{\left( r_1' + \frac{r_2''}{s_n} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}{\left( r_1' + \frac{r_2''}{s} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} \cdot k_u^2, \quad (7)$$

де  $k_u$  – кратність напруги на затискачах електродвигуна, тобто

$$k_u = \frac{U_1}{U_{1n}}. \quad (8)$$

Згідно з рис. 1 постійні втрати активної потужності в асинхронному двигуні виділяються в активних опорах намагнічуючої вітки схеми, тому запишемо їх так:

$$\Delta P_{const} = 3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot I_0^2, \quad (9)$$

де діюче значення струму намагнічувальної вітки схеми дорівнює:

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_0)^2 + (x_1 + x_0)^2}}. \quad (10)$$

Після підстановки (10) у (9) отримаємо:

$$\Delta P_{const} = 3 \cdot \frac{(r_1 + r_0)}{(r_1 + r_0)^2 + (x_1 + x_0)^2} \cdot U_1^2. \quad (11)$$

У номінальному режимі роботи вираз (11) матиме вигляд:

$$\Delta P_{const.n} = \frac{(r_1 + r_0)}{(r_1 + r_0)^2 + (x_1 + x_0)^2} \cdot U_{1n}^2, \quad (12)$$

де  $\Delta P_{const.n}$  – номінальні постійні втрати активної потужності в асинхронному двигуні, Вт.

Розділивши (11) на (12) та перетворивши, отримаємо:

$$\Delta P_{const} = \Delta P_{const.n} \cdot k_u^2. \quad (13)$$

Підставивши (7) і (13) у (2) та перетворивши, отримаємо:

$$\tau_{обм} = \frac{\tau_{обм.n}}{\Delta P_i} \cdot \left( \Delta P_{var} \cdot \frac{\left( r_1' + \frac{r_2''}{s_n} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}{\left( r_1' + \frac{r_2''}{s} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} + \Delta P_{const.n} \right) \cdot k_u^2. \quad (14)$$

Якщо вважати, що асинхронний двигун надає руху робочій машині з незалежною від швидкості механічною характеристикою, то згідно з [19]

$$s = \frac{k_3}{k_u^2} \cdot s_n, \quad (15)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт завантаження електродвигуна.

Підставивши (15) у (14), отримаємо:

$$\tau_{обм} = \frac{\tau_{обм.н}}{\Delta P_i} \cdot \left( \Delta P_{var.} \cdot \frac{\left( r_1' + \frac{r_2''}{s_n} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}{\left( r_1' + \frac{r_2'' \cdot k_u^2}{s_n \cdot k_3} \right)^2 + (x_1' + x_2'')^2} + \Delta P_{const.н} \right) \cdot k_u^2. \quad (16)$$

Встановимо залежність кратності напруги на затискачах асинхронного двигуна від його коефіцієнта завантаження, за якої швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора буде мінімальною, використовуючи рівняння (1) і (16). Таку залежність можна встановити внаслідок чисельного розв'язання вказаних рівнянь. Для прикладу візьмемо асинхронний двигун типорозміру АИР90L4 потужністю 2,2 кВт, у якого:

$$\varepsilon_n = 1 \text{ баз. год/год,}$$

$$B = 10\,200 \text{ К,}$$

$$\theta_{1н} = 403 \text{ К,}$$

$$r_1' = 4,295 \text{ Ом, } r_2'' = 3,331 \text{ Ом,}$$

$$x_1' = 2,629 \text{ Ом, } x_2'' = 5,697 \text{ Ом,}$$

$$s_n = 0,051,$$

$$U_{1н} = 220 \text{ В,}$$

$$\Delta P_{var.н} = 225,3 \text{ Вт, } \Delta P_{const.н} = 324,7 \text{ Вт, } \Delta P_n = 550 \text{ Вт,}$$

$$\tau_{обм.н} = 90 \text{ }^\circ\text{С.}$$

Вважатимемо, що  $\vartheta_{сер} = 40 \text{ }^\circ\text{С}$ , коефіцієнт завантаження змінюється від 0,1 до 1. Умова мінімізації така: поточне ковзання не перевищує номінальне (тобто  $s \leq s_n$ ).

З використанням вказаних чисельних значень фізичних величин здійснено розрахунки в програмі MS Excel через надбудову «Пошук рішення». Результати розрахунків перевищення температури обмотки статора у функції коефіцієнта завантаження наведено на рис. 2.

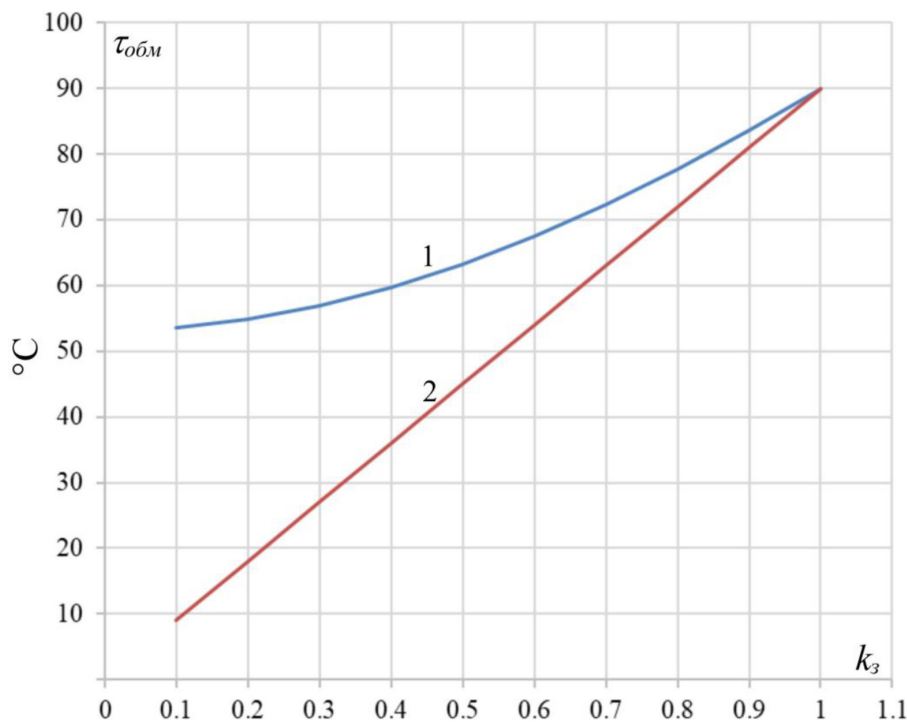


Рис. 2. Залежності  $\tau_{обм} = f(k_3)$  асинхронного двигуна АИР90L4

На рис. 2 позначено: 1 – залежність  $\tau_{обм} = f(k_3)$  за номінальної напруги на затискачах електродвигуна, 2 – залежність  $\tau_{обм} = f(k_3)$  у разі регулювання напруги на затискачах електродвигуна.

З отриманих залежностей (рис. 2) випливає, що зниження напруги на затискачах електродвигуна, який працює з навантаженням, меншим за номінальне, призводить до зменшення його нагрівання. Це обумовлює зниження швидкості зношення ізоляції його обмотки, що підтверджується результатами, наведеними на рис. 3. На ньому показані залежності  $\varepsilon = f(k_3)$ : 1 – за номінальної напруги на затискачах електродвигуна, 2 – у разі регулювання напруги на затискачах електродвигуна.

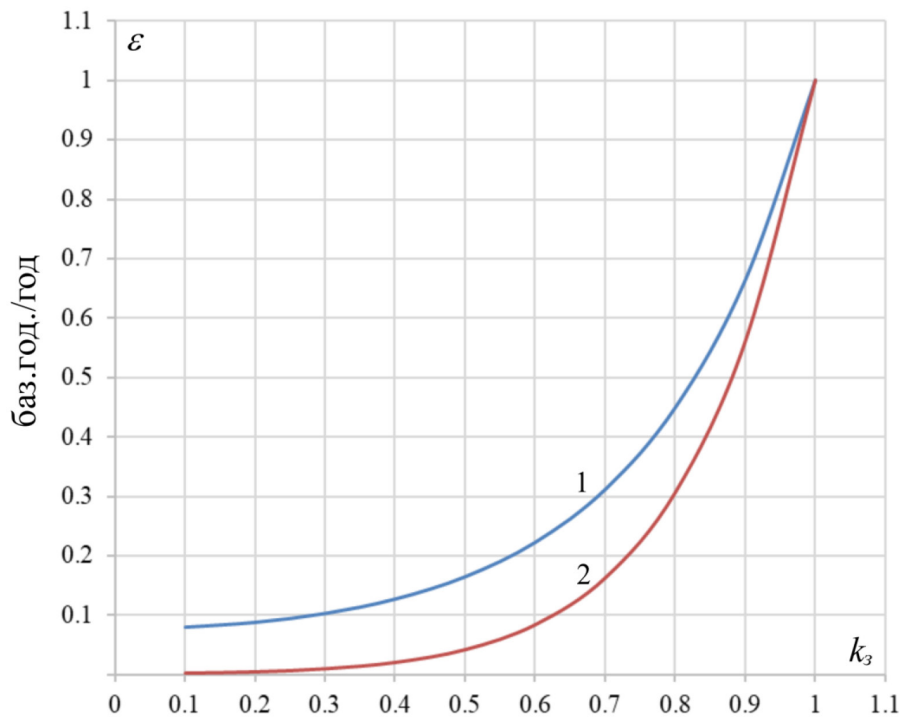


Рис. 3. Залежності  $\varepsilon = f(k_3)$  асинхронного двигуна АІР90L4

З результатів, показаних на рис. 3, випливає, що зниження напруги на затискачах електродвигуна, який працює з навантаженням, меншим за номінальне, призводить до зменшення витрати його ресурсу. Наприклад, якщо вказаний асинхронний двигун працюватиме з навантаженням 70 % від номінального протягом робочих днів поточного року по 8 годин на добу й оптимально зниженою напругою, то кількість його зекономленого ресурсу становитиме:  $(0,31-0,16) \cdot 261 \cdot 8 = 313,2$  баз. год. Крім того, у процесі роботи зменшиться теплове навантаження на всі елементи його конструкції, що позитивно вплине на їх зношення.

Для здійснення оптимального регулювання напруги на затискачах електродвигуна отримано залежність кратності напруги від коефіцієнта завантаження асинхронного двигуна, за якої швидкість теплового зношення ізоляції обмотки статора буде мінімальною (рис. 4).

Апроксимація залежності  $k_u = f(k_3)$  на рис. 4 дала можливість отримати таке її рівняння:

$$k_u = \sqrt{k_3}. \quad (17)$$

Як випливає з (15) і умови мінімізації ( $s \leq s_n$ ) отримане рівняння (17) є справедливим для будь-якого асинхронного двигуна, який приводить у рух робочу машину з незалежною від швидкості механічною характеристикою.

**Висновки.** Таким чином, у роботі отримана залежність кратності напруги від коефіцієнта завантаження асинхронного двигуна, за якої швидкість теплового зношення ізоляції обмотки

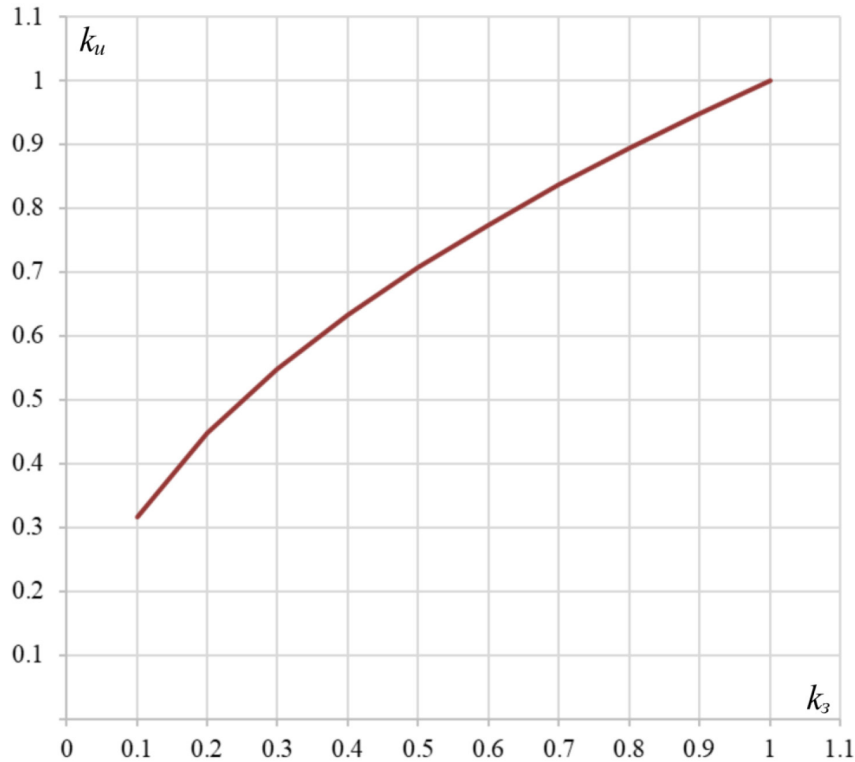


Рис. 4. Залежність  $k_u = f(k_s)$  асинхронного двигуна АИР90L4, за якої  $\varepsilon \rightarrow \min$

статора буде мінімальною. Це дає можливість будувати алгоритми та пристрої регулювання напруги живлення електродвигуна для збереження його ресурсу за зниження навантаження. Недоліком отриманої залежності є те, що її перевірено тільки для випадків приведення електродвигуном у рух робочих машин з незалежною від швидкості механічною характеристикою. Подальші дослідження мають бути спрямовані на встановлення таких залежностей для випадків приведення у рух робочих машин з іншими видами механічних характеристик та на врахування збільшення навантаження щодо номінального значення.

#### Список використаних джерел

1. Lu S.-M. A review of high-efficiency motors: Specification, policy and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.360>
2. Ferreira F. J. T. E., de Almeida A. T. Overview on energy saving opportunities in electric motor driven systems—Part 1: System efficiency improvement. In *Proceedings of the 2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I CPS), Detroit, MI, USA, 1–5 May, 2016*. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2016.7490219>
3. Terron-Santiago C., Martinez-Roman J., Puche-Panadero R., Sapena-Bano A. A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling. *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 4855. <https://doi.org/10.3390/s21144855>
4. Boyko A., Volianskaya Ya. Synthesis of the System for Minimizing Losses in Asynchronous Motor with a Function for Current Symmetrization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4/5 (88). P. 50–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108545>
5. Bazurto A. J., Quispe E. Q., Mendoza R. M. Causes and Failures Classification of Industrial Electric Motor. *ANDESCON, 2016 IEEE*, 2016. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2016.7836190>
6. Sudhakar I., Adi Narayana S., Anil Prakash M. Condition Monitoring of a 3- $\emptyset$  Induction Motor by Vibration Spectrum analysis using Fft Analyser—A Case Study. *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4 (2/A). P. 1099–1105. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.125>
7. Ferreira F. J. T. E., Baoming G., de Almeida A. T. Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016. Vol. 52 (6). P. 4628–4637. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2600677>



8. Zhao K., Cheng L., Zhang C., Nie D., Cai W. Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations. *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2017.8286230>
9. Höpner V. N., Wilhelm V. E. Insulation Life Span of Low-Voltage Electric Motors – A Survey. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 1738. <https://doi.org/10.3390/en14061738>
10. Ghassemi M. Accelerated insulation aging due to fast, repetitive voltages: A review identifying challenges and future research needs. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2019. Vol. 26 (5). P. 1558–1568. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008176>
11. Liu T., Jiang M., Zhang D., Zhao H., Shuang F. Effect of Symmetrical Voltage Sag on Induction Motor Considering Phase-angle Factors Based on A New 2-D Multi-Slice Time-Stepping Finite Element Method. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 75946–75956. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988581>
12. Ferreira F. J. T. E., de Almeida A. T. Overview on energy saving opportunities in electric motor driven systems – Part 2: Regeneration and output power reduction. *2016 IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Detroit, MI, USA, 2016. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2016.7490220>
13. Zhou X., Yang B., Ma Y., Gao Z. Research Review on the Energy-saving Technologies for Asynchronous Motors. *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Changchun, China, 2018. P. 195–199. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2018.8484643>
14. Trianni A., Cagno E., Accordini D. Energy efficiency measures in electric motors systems: A novel classification highlighting specific implications in their adoption. *Applied Energy*. 2019. Vol. 252. P. 113481. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113481>
15. Tareq M. A. Al-Quraan, Oleksandr Vovk, Serhii Halko, Serhii Kvitka, Olena Suprun, Oleksandr Miroshnyk, Vitalii Nitsenko, Nurul Mohammad Zayed and K.M. Anwarul Islam. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. Vol. 7 (4). P. 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>
16. Вовк О. Ю., Квітка С. О. Ресурсозберігаюче керування навантаженням асинхронних електродвигунів насосних установок в умовах зниження живлячої напруги. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2022. № 12 (1). С. 18. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-18>
17. Ferreira F. J. T. E., Baoming G., de Almeida A. T. Reliability and operation of high-efficiency induction motors. *2015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Calgary, AB, Canada, 2015. P. 1–13. <https://doi.org/10.1109/ICPS.2015.7266412>
18. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Волошина А. А., Стребков О. А. Розробка системи забезпечення ресурсоенергозберігаючого експлуатаційного режиму роботи асинхронного електродвигуна. *Енергетика і автоматика*. 2016. № 4 (30). С. 89–97.
19. Movahed S. R., Oraee Mirzamani S. H., Rajabi A., Daneshvar H. Estimation of insulation life of inverter-fed induction motors. *2010 1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Tehran, Iran, 2010. P. 335–339. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2010.5471797>
20. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Дідур В. А. Вплив відхилення живлячої напруги на ресурс ізоляції асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній. *Науковий вісник ТДАТУ*, 2019. № 9 (1). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-25>

Стаття надійшла до редакції 23.10.2025

Стаття прийнята 04.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**O. Vovk**  
**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **RESOURCE-SAVING VOLTAGE REGULATION OF ASYNCHRONOUS MOTORS WHEN REDUCING LOAD**

### *Summary*

The article is devoted to improving the reliability of asynchronous motors used to drive working machines and mechanisms. These electric motors are most widely used in practice due to their high structural reliability and relatively low cost. However, operational experience has shown that their reliability decreases in production conditions. This is due to external influences that were not fully anticipated during the design phase. One such influence is variable loading from the working machines. Therefore, researching its effect on the service life of asynchronous motors and developing a resource-saving effect on electric motors when the load changes is a pressing task. This task can be solved by implementing a specific control method. An analysis of existing methods has shown that most of them are aimed at controlling power losses and do not take into account the rate of wear of electric motor components. Therefore, the article aims to justify a method of resource-saving control of asynchronous motors under changing load conditions by regulating the voltage

The rate of thermal wear of the stator winding insulation is accepted as the criterion for preserving the resource of an electric motor during its operation. The main factor affecting it is the current excess of the winding temperature. The paper considers the expression of temperature excess as a function of constant and variable active power losses in an electric motor. Based on the equivalent circuit of an asynchronous motor, these power losses are presented as a function of the equivalent circuit parameters, load factor and voltage multiplicity. Based on these equations, a mathematical model of the thermal wear process of the winding insulation was developed. Using this model, a study of the change in the service life of the AIR90L4 asynchronous motor was conducted. The results of the study showed that a decrease in the voltage at the terminals of an underloaded electric motor leads to a decrease in its service life.

To regulate the voltage at the electric motor terminals, the dependence of the voltage multiple on the load factor of the asynchronous motor was obtained, at which the rate of thermal wear of the stator winding insulation will be minimal. This allows algorithms and devices to be developed for regulating the supply voltage of the electric motor to ensure that its service life is preserved when the load is reduced. The disadvantage of the obtained dependence is that it has only been verified for cases where the electric motor drives working machines with mechanical characteristics that are independent of speed. Further research should be aimed at establishing such dependencies for cases of driving working machines with other types of mechanical characteristics and taking into account the increase in load relative to the nominal value.

**Keywords:** electric machines, electric drive, resource conservation, insulation thermal wear rate, temperature excess, power loss, voltage multiplier, load factor.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-19>

УДК 621.313.3.025.3-78

О. Ю. Вовк, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0154-6972

І. О. Попова, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5429-8269

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: Oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua

## АНАЛІЗ НЕСИМЕТРИЧНИХ ТРИФАЗНИХ КІЛ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ КОНТУРНИХ СТРУМІВ

*Анотація.* У роботі розглянуто несиметричні режими роботи трифазних кіл. Проаналізовано методи розрахунку струмів в разі несиметрії навантаження і в разі несиметрії джерела. Виявлено, що для визначення струмів кола за несиметрії навантаження застосовується метод двох вузлів, а за несиметрії джерела – метод симетричних складових. Недоліком вказаних методів є значна кількість розрахункових дій. Для спрощення розрахунку сил струмів у фазах кола запропоновано застосовувати метод контурних струмів. На базі цього методу складено рівняння для визначення сил струмів трипровідних і чотирипровідних трифазних кіл у несиметричних режимах роботи.

*Ключові слова:* теоретичні основи електротехніки, несиметричне трифазне коло, напруга зсуву нейтралі, симетричні складові, контурні струми.

*Постановка проблеми.* На сучасному етапі розвитку науки і техніки пристрої та установки, що розробляються й упроваджуються, для своєї роботи застосовують електричну енергію. В електротехніці їх називають споживачами чи навантаженнями і класифікують так: навантаження постійного і змінного струму [1; 2]. Навантаження змінного струму переважно є трифазними. На них припадає близько 40 % виробленої у світі електричної енергії [3; 4]. Робота цих навантажень у трифазних системах обумовлює певні процеси, які призводять до виникнення несиметричних режимів [5; 6]. Вони виникають унаслідок нерівномірного розподілу однофазних навантажень між фазами трифазної системи, підключення потужних однофазних споживачів, впливу фотоелектричних модулів і зарядних станцій, пошкодження електрообладнання тощо [7; 8]. Виникнення несиметрії спричиняє порушення нормального функціонування трифазних навантажень, зокрема зниження ефективності роботи, збільшення споживання електроенергії та додаткове нагрівання [9; 10]. Тому дослідження несиметричних режимів роботи трифазних систем є актуальною задачею.

*Аналіз останніх досліджень.* На сьогодні існують багато публікацій результатів досліджень трифазних кіл за різних видів несиметрії [11–20]. Огляд цих публікацій показує, що аналіз несиметричних режимів таких кіл базується на двох методах розрахунків: перший із них – це метод двох вузлів, другий – метод симетричних складових.

Перший метод здебільшого застосовують для аналізу трифазних кіл у разі несиметрії навантаження чи лінії електропередачі. Його суть полягає у визначенні напруги зсуву нейтралі, а потім – сил струмів у фазах кола.

Для трипровідного трифазного кола розрахунок здійснюється так:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A/Z_A + \dot{E}_B/Z_B + \dot{E}_C/Z_C}{1/Z_A + 1/Z_B + 1/Z_C}; \quad (1)$$

$$i_A = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_N}{Z_A}; \quad i_B = \frac{\dot{E}_B - \dot{U}_N}{Z_B}; \quad i_C = \frac{\dot{E}_C - \dot{U}_N}{Z_C}, \quad (2)$$

де  $\dot{U}_N$  – комплекс діючого значення напруги зсуву нейтралі;

$\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$  – комплекси діючих значень електрорушійних сил джерела;

$Z_A, Z_B, Z_C$  – комплекси повних опорів фаз кола;

$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  – комплекси діючих значень струмів у фазах кола.

Аналіз рівнянь (1), (2) показує, що для знаходження комплексу діючого значення будь-якого струму у фазі кола потрібно виконати 34 розрахункові дії, включно з переведенням комплексних чисел із показової форми в алгебраїчну і навпаки.

Для чотирипровідного трифазного кола розрахунок здійснюється так:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A/Z_A + \dot{E}_B/Z_B + \dot{E}_C/Z_C}{1/Z_A + 1/Z_B + 1/Z_C + 1/Z_N}; \quad (3)$$

$$i_A = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_N}{Z_A}; \quad i_B = \frac{\dot{E}_B - \dot{U}_N}{Z_B}; \quad i_C = \frac{\dot{E}_C - \dot{U}_N}{Z_C}; \quad i_N = \frac{\dot{U}_N}{Z_N}, \quad (4)$$

де  $\dot{I}_N$  – комплекс діючого значення струму нейтралі;

$Z_N$  – комплекс повного опору нейтралі.

Аналіз рівнянь (3), (4) показує, що для знаходження комплексу діючого значення будь-якого струму у фазі кола потрібно виконати 39 розрахункових дій, включно з переведенням комплексних чисел із показової форми в алгебраїчну і навпаки.

Другий метод переважно застосовують для аналізу трифазних кіл у разі несиметрії джерела. Його суть полягає у визначенні симетричних складових напруг і струмів, а потім – сил струмів у фазах кола.

Для трипровідного трифазного кола розрахунок здійснюється так:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{E}_A + e^{j120^\circ} \cdot \dot{E}_B + e^{j240^\circ} \cdot \dot{E}_C}{3}; \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_A}; \quad (5)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_A + e^{j240^\circ} \cdot \dot{E}_B + e^{j120^\circ} \cdot \dot{E}_C}{3}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_A}; \quad (6)$$

$$i_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad i_B = e^{j240^\circ} \cdot \dot{I}_1 + e^{j120^\circ} \cdot \dot{I}_2; \quad i_C = e^{j120^\circ} \cdot \dot{I}_1 + e^{j240^\circ} \cdot \dot{I}_2, \quad (7)$$

де  $\dot{U}_1, \dot{U}_2$  – комплекси діючих значень напруг відповідно прямої і зворотної послідовностей;

$\dot{I}_1, \dot{I}_2$  – комплекси діючих значень струмів відповідно прямої і зворотної послідовностей.

Аналіз рівнянь (5)–(7) показує, що для знаходження комплексу діючого значення струму у фазі А кола потрібно виконати 47 розрахункових дій, включно з переведенням комплексних чисел із показової форми в алгебраїчну і навпаки.

Для чотирипровідного трифазного кола розрахунок здійснюється так:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{E}_A + e^{j120^\circ} \cdot \dot{E}_B + e^{j240^\circ} \cdot \dot{E}_C}{3}; \quad \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_A}; \quad (8)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_A + e^{j240^\circ} \cdot \dot{E}_B + e^{j120^\circ} \cdot \dot{E}_C}{3}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_A}; \quad (9)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C}{3}; \quad \dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_0}{Z_A + 3 \cdot Z_N}; \quad (10)$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad \dot{I}_B = e^{j240^\circ} \cdot \dot{I}_1 + e^{j120^\circ} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad \dot{I}_C = e^{j120^\circ} \cdot \dot{I}_1 + e^{j240^\circ} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0, \quad (11)$$

де  $\dot{U}_0$  – комплекс діючого значення напруги нульової послідовності;

$\dot{I}_0$  – комплекс діючого значення струму нульової послідовності.

Аналіз рівнянь (8)–(11) показує, що для знаходження комплексу діючого значення струму у фазі А кола потрібно виконати 79 розрахункових дій, включно з переведенням комплексних чисел із показової форми в алгебраїчну і навпаки.

Таким чином, із викладеного випливає, що методи розрахунків, які на сьогодні застосовують до несиметричних трифазних кіл, мають значну кількість розрахункових операцій.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* У статті поставлено за мету обґрунтування можливості застосування методу контурних струмів для визначення сил струмів у фазах трифазного кола за несиметричних режимів роботи. Для цього потрібно розглянути застосування вказаного методу для трипровідного та чотирипровідного трифазного кола в разі несиметрії навантаження або джерела та зробити його порівняльний аналіз із методом двох вузлів і методом симетричних складових, за результатами якого дійти висновку про доцільність застосування методу контурних струмів.

*Основна частина.* Розглянемо розрахункову схему трипровідного трифазного кола, що складається з джерела й навантаження, з'єднаних зіркою, на якому позначимо контурні струми (рис. 1).

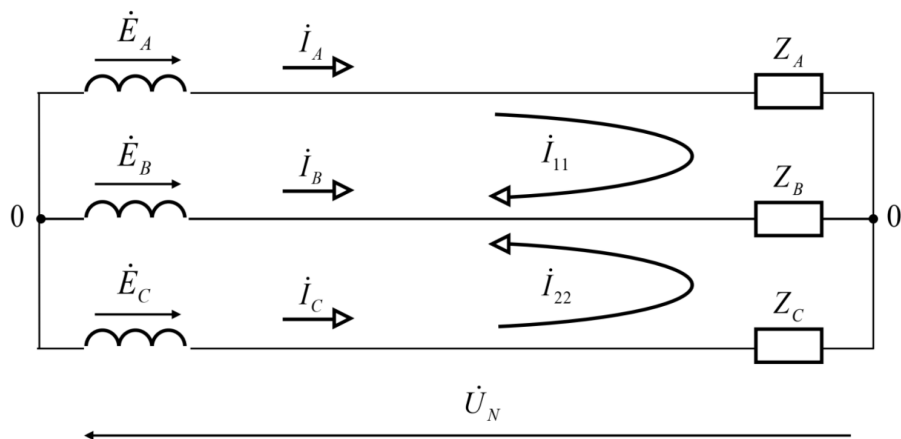


Рис. 1. Розрахункова схема трифазного кола «зірка – зірка» в несиметричному режимі

На розрахунковій схемі (рис. 1) позначено:  $\dot{I}_{11}$ ,  $\dot{I}_{22}$  – комплекси діючих значень контурних струмів кола; інші літери розшифровано вище.

Складемо рівняння за методом контурних струмів для розрахункової схеми кола на рис. 1:

$$(Z_A + Z_B) \cdot \dot{I}_{11} + Z_B \cdot \dot{I}_{22} = \dot{E}_A - \dot{E}_B; \quad (12)$$

$$Z_B \cdot \dot{I}_{11} + (Z_B + Z_C) \cdot \dot{I}_{22} = \dot{E}_C - \dot{E}_B. \quad (13)$$

Для системи рівнянь (12), (13) запишемо загальний визначник:

$$\Delta = \begin{vmatrix} Z_A + Z_B & Z_B \\ Z_B & Z_B + Z_C \end{vmatrix} = (Z_A + Z_B) \cdot (Z_B + Z_C) - Z_B^2. \quad (14)$$

Після перетворень (14) отримаємо:



$$\Delta = Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A. \quad (15)$$

Для системи рівнянь (12), (13) запишемо частковий визначник контурного струму  $\dot{I}_{11}$ :

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} \dot{E}_A - \dot{E}_B & Z_B \\ \dot{E}_C - \dot{E}_B & Z_B + Z_C \end{vmatrix} = (\dot{E}_A - \dot{E}_B) \cdot (Z_B + Z_C) - (\dot{E}_C - \dot{E}_B) \cdot Z_B. \quad (16)$$

Після перетворень (16) отримаємо:

$$\Delta_{11} = \dot{E}_A Z_B + \dot{E}_A Z_C - \dot{E}_B Z_C - \dot{E}_C Z_B. \quad (17)$$

Для системи рівнянь (12), (13) запишемо частковий визначник контурного струму  $\dot{I}_{22}$ :

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} Z_A + Z_B & \dot{E}_A - \dot{E}_B \\ Z_B & \dot{E}_C - \dot{E}_B \end{vmatrix} = (\dot{E}_C - \dot{E}_B) \cdot (Z_A + Z_B) - (\dot{E}_A - \dot{E}_B) \cdot Z_B. \quad (18)$$

Після перетворень (18) отримаємо:

$$\Delta_{22} = \dot{E}_C Z_A + \dot{E}_C Z_B - \dot{E}_B Z_A - \dot{E}_A Z_B. \quad (19)$$

Поділивши (17) на (15), отримаємо:

$$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_A Z_B + \dot{E}_A Z_C - \dot{E}_B Z_C - \dot{E}_C Z_B}{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}. \quad (20)$$

Поділивши (19) на (15), отримаємо:

$$\dot{I}_{22} = \frac{\dot{E}_C Z_A + \dot{E}_C Z_B - \dot{E}_B Z_A - \dot{E}_A Z_B}{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}. \quad (21)$$

На підставі рис. 1 запишемо вирази струмів у фазах кола через контурні струми:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{11}; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_{11} - \dot{I}_{22}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{22}. \quad (22)$$

З урахуванням (20), (21) перепишемо (22) так:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A Z_B + \dot{E}_A Z_C - \dot{E}_B Z_C - \dot{E}_C Z_B}{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}; \quad (23)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C Z_A + \dot{E}_C Z_B - \dot{E}_B Z_A - \dot{E}_A Z_B}{Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A}; \quad (24)$$

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_A - \dot{I}_C. \quad (25)$$

Проведемо чисельне порівняння розрахунку струму у фазі А кола (рис. 1) за допомогою методу двох вузлів із розрахунком цього ж струму за допомогою методу контурних струмів. Для цього вважатимемо, що для розрахункової схеми на рис. 1 відомо:  $\dot{E}_A = 220 \cdot e^{j0^\circ}$  В;  $\dot{E}_B = 220 \cdot e^{-j120^\circ}$  В;  $\dot{E}_C = 220 \cdot e^{-j240^\circ}$  В;  $Z_A = 2 \cdot e^{j30^\circ}$  Ом;  $Z_B = 5 \cdot e^{j50^\circ}$  Ом;  $Z_C = 10 \cdot e^{j70^\circ}$  Ом.

Підставляємо ці значення у (3), (4) і здійснюємо розрахунок струму у фазі А кола за допомогою методу двох вузлів:

$$\dot{U}_N = \frac{\frac{220 \cdot e^{j0^\circ}}{2 \cdot e^{j30^\circ}} + \frac{220 \cdot e^{-j120^\circ}}{5 \cdot e^{j50^\circ}} + \frac{220 \cdot e^{-j240^\circ}}{10 \cdot e^{j70^\circ}}}{\frac{1}{2 \cdot e^{j30^\circ}} + \frac{1}{5 \cdot e^{j50^\circ}} + \frac{1}{10 \cdot e^{j70^\circ}}};$$

$$\dot{U}_N = \frac{110 \cdot e^{-j30^\circ} + 44 \cdot e^{-j170^\circ} + 22 \cdot e^{-j310^\circ}}{0,5 \cdot e^{-j30^\circ} + 0,2 \cdot e^{-j50^\circ} + 0,1 \cdot e^{-j70^\circ}};$$



$$\begin{aligned}\dot{U}_N &= \frac{95,263 - j55 - 43,332 - j7,641 + 14,141 + j16,853}{0,433 - j0,25 + 0,129 - j0,1532 + 0,0342 - j0,09397}; \\ \dot{U}_N &= \frac{66,072 - j45,788}{0,5962 - j0,49717} = \frac{80,3869 \cdot e^{-j34,7^\circ}}{0,7763 \cdot e^{-j39,8^\circ}} = 103,55 \cdot e^{j5,1^\circ} \text{ В}; \\ \dot{I}_A &= \frac{220 \cdot e^{j0^\circ} - 103,55 \cdot e^{-j5,1^\circ}}{2 \cdot e^{j30^\circ}} = \frac{220 - 103,14 - j9,21}{2 \cdot e^{j30^\circ}}; \\ \dot{I}_A &= \frac{116,86 - j9,21}{2 \cdot e^{j30^\circ}} = \frac{117,22 \cdot e^{-j4,5^\circ}}{2 \cdot e^{j30^\circ}} = 58,6 \cdot e^{-j34,5^\circ} \text{ А}.\end{aligned}$$

Підставляємо ці ж значення у (23) і здійснюємо розрахунок струму у фазі А кола за допомогою методу контурних струмів:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \frac{220e^{j0^\circ} \cdot 5e^{j50^\circ} + 220e^{j0^\circ} \cdot 10e^{j70^\circ} - 220e^{-j120^\circ} \cdot 10e^{j70^\circ} - 220e^{-j240^\circ} \cdot 5e^{j50^\circ}}{2 \cdot e^{j30^\circ} \cdot 5 \cdot e^{j50^\circ} + 5 \cdot e^{j50^\circ} \cdot 10 \cdot e^{j70^\circ} + 10 \cdot e^{j70^\circ} \cdot 2 \cdot e^{j30^\circ}}; \\ \dot{I}_A &= \frac{1100 \cdot e^{j50^\circ} + 2200 \cdot e^{j70^\circ} - 2200 \cdot e^{-j50^\circ} - 1100 \cdot e^{-j190^\circ}}{10 \cdot e^{j80^\circ} + 50 \cdot e^{j120^\circ} + 20 \cdot e^{j100^\circ}}; \\ \dot{I}_A &= \frac{707 + j843 + 752 + j2067 - 1414 + j1685 + 1083 - j191}{1,74 + j9,85 - 25 + j43,3 - 3,47 + j19,7}; \\ \dot{I}_A &= \frac{1128 + j4404}{-26,73 + j72,85} = \frac{4546,2 \cdot e^{j75,6^\circ}}{77,6 \cdot e^{j110,1^\circ}} = 58,6 \cdot e^{-j34,5^\circ} \text{ А}.\end{aligned}$$

Порівняння результатів розрахунків струму у фазі А, які здійснені за методом двох вузлів і за методом контурних струмів, вказує на їх ідентичність. При цьому результат за методом контурних струмів отриманий із меншою кількістю розрахункових операцій порівняно з результатом за методом двох вузлів.

Проведемо чисельне порівняння розрахунку струму у фазі А кола (рис. 1) за допомогою методу симетричних складових із розрахунком цього ж струму за допомогою методу контурних струмів. Для цього вважатимемо, що для розрахункової схеми на рис. 1 відомо:  $\dot{E}_A = 200 \cdot e^{j0^\circ} \text{ В}$ ;  $\dot{E}_B = 250 \cdot e^{-j120^\circ} \text{ В}$ ;  $\dot{E}_C = 150 \cdot e^{-j240^\circ} \text{ В}$ ;  $Z_A = Z_B = Z_C = 10 \cdot e^{j60^\circ} \text{ Ом}$ .

Підставляємо ці значення у (5)–(7) і здійснюємо розрахунок струму у фазі А кола за допомогою методу симетричних складових:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \frac{200e^{j0^\circ} + e^{j120^\circ} \cdot 250e^{-j120^\circ} + e^{j240^\circ} \cdot 150e^{-j240^\circ}}{3} = \frac{200 + 250 + 150}{3} = 200 \cdot e^{j0^\circ} \text{ В}; \\ \dot{U}_2 &= \frac{200e^{j0^\circ} + e^{j240^\circ} \cdot 250e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ} \cdot 150e^{-j240^\circ}}{3} = \frac{200e^{j0^\circ} + 250e^{j120^\circ} + 150e^{-j120^\circ}}{3}; \\ \dot{U}_2 &= \frac{200 - 125 + j216,51 - 75 - j129,9}{3} = \frac{j86,62}{3} = 28,87 \cdot e^{j90^\circ} \text{ В}; \\ \dot{I}_1 &= \frac{200 \cdot e^{j0^\circ}}{10 \cdot e^{j60^\circ}} = 20 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ А}; \quad \dot{I}_2 = \frac{28,87 \cdot e^{j90^\circ}}{10 \cdot e^{j60^\circ}} = 2,9 \cdot e^{j30^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_A &= 20e^{-j60^\circ} + 2,9e^{j30^\circ} = 10 - j17,32 + 2,51 + j1,45 = 12,51 - j15,87 = 20,21e^{-j51,8^\circ} \text{ А}.\end{aligned}$$

Підставляємо ці ж значення у (23) і здійснюємо розрахунок струму у фазі А кола за допомогою методу контурних струмів:

$$\dot{i}_A = \frac{200e^{j0^\circ} \cdot 10e^{j60^\circ} + 200e^{j0^\circ} \cdot 10e^{j60^\circ} - 250e^{-j120^\circ} \cdot 10e^{j60^\circ} - 150e^{-j240^\circ} \cdot 10e^{j60^\circ}}{10 \cdot e^{j60^\circ} \cdot 10 \cdot e^{j60^\circ} + 10 \cdot e^{j60^\circ} \cdot 10 \cdot e^{j60^\circ} + 10 \cdot e^{j60^\circ} \cdot 10 \cdot e^{j60^\circ}};$$

$$\dot{i}_A = \frac{4000e^{j60^\circ} - 2500e^{-j60^\circ} - 1500e^{-j180^\circ}}{300 \cdot e^{j120^\circ}} = \frac{2000 + j3464 - 1250 + j2165 + 1500}{300 \cdot e^{j120^\circ}};$$

$$\dot{i}_A = \frac{2250 + j5629}{300 \cdot e^{j120^\circ}} = \frac{6062 \cdot e^{j68,2^\circ}}{300 \cdot e^{j120^\circ}} = 20,21 \cdot e^{-j51,8^\circ} \text{ А.}$$

Порівняння результатів розрахунків струму у фазі А, які здійснені за методом симетричних складових і за методом контурних струмів, вказує на їх ідентичність. При цьому результат за методом контурних струмів отриманий із меншою кількістю розрахункових операцій порівняно з результатом за методом симетричних складових.

Розглянемо розрахункову схему чотирипровідного трифазного кола, що складається з джерела й навантаження, з'єднаних зіркою, на якому позначимо контурні струми (рис. 2).

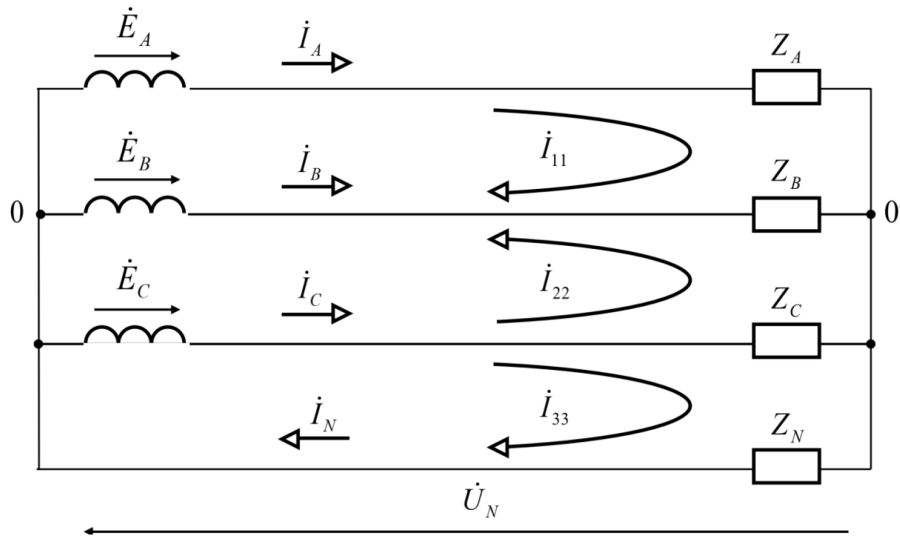


Рис. 2. Розрахункова схема трифазного кола «зірка – зірка з нулем» у несиметричному режимі

На розрахунковій схемі (рис. 2) позначено:  $\dot{I}_{11}$ ,  $\dot{I}_{22}$ ,  $\dot{I}_{33}$  – комплекси діючих значень контурних струмів кола; інші літери розшифровано вище.

Складемо рівняння за методом контурних струмів для розрахункової схеми кола на рис. 2:

$$(Z_A + Z_B) \cdot \dot{I}_{11} + Z_B \cdot \dot{I}_{22} = \dot{E}_A - \dot{E}_B; \quad (26)$$

$$Z_B \cdot \dot{I}_{11} + (Z_B + Z_C) \cdot \dot{I}_{22} + Z_C \cdot \dot{I}_{33} = \dot{E}_C - \dot{E}_B; \quad (27)$$

$$Z_C \cdot \dot{I}_{22} + (Z_C + Z_N) \cdot \dot{I}_{33} = \dot{E}_C. \quad (28)$$

Для системи рівнянь (26)–(28) запишемо загальний визначник:

$$\Delta = \begin{vmatrix} Z_A + Z_B & Z_B & 0 \\ Z_B & Z_B + Z_C & Z_C \\ 0 & Z_C & Z_C + Z_N \end{vmatrix}. \quad (29)$$

Після перетворень (29) отримаємо:

$$\Delta = Z_A Z_B Z_N + Z_B Z_C Z_N + Z_C Z_A Z_N + Z_A Z_B Z_C. \quad (30)$$

Для системи рівнянь (26)–(28) запишемо частковий визначник контурного струму  $\dot{I}_{11}$ :



$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} \dot{E}_A - \dot{E}_B & Z_B & 0 \\ \dot{E}_C - \dot{E}_B & Z_B + Z_C & Z_C \\ \dot{E}_C & Z_C & Z_C + Z_N \end{vmatrix}. \quad (31)$$

Після перетворень (31) отримаємо:

$$\Delta_{11} = \dot{E}_A Z_B Z_C + \dot{E}_A Z_B Z_N + \dot{E}_A Z_C Z_N - \dot{E}_B Z_C Z_N - \dot{E}_C Z_B Z_N. \quad (32)$$

Для системи рівнянь (26)–(28) запишемо частковий визначник контурного струму  $\dot{I}_{22}$ :

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} Z_A + Z_B & \dot{E}_A - \dot{E}_B & 0 \\ Z_B & \dot{E}_C - \dot{E}_B & Z_C \\ 0 & \dot{E}_C & Z_C + Z_N \end{vmatrix}. \quad (33)$$

Після перетворень (33) отримаємо:

$$\Delta_{22} = \dot{E}_C Z_A Z_N + \dot{E}_C Z_B Z_N - \dot{E}_B Z_A Z_C - \dot{E}_B Z_A Z_N - \dot{E}_A Z_B Z_C - \dot{E}_A Z_B Z_N. \quad (34)$$

Для системи рівнянь (26)–(28) запишемо частковий визначник контурного струму  $\dot{I}_{33}$ :

$$\Delta_{33} = \begin{vmatrix} Z_A + Z_B & Z_B & \dot{E}_A - \dot{E}_B \\ Z_B & Z_B + Z_C & \dot{E}_C - \dot{E}_B \\ 0 & Z_C & \dot{E}_C \end{vmatrix}. \quad (35)$$

Після перетворень (35) отримаємо:

$$\Delta_{33} = \dot{E}_A Z_B Z_C + \dot{E}_B Z_A Z_C + \dot{E}_C Z_A Z_B. \quad (36)$$

Поділивши (32) на (30), отримаємо:

$$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_A Z_B Z_C + \dot{E}_A Z_B Z_N + \dot{E}_A Z_C Z_N - \dot{E}_B Z_C Z_N - \dot{E}_C Z_B Z_N}{Z_A Z_B Z_N + Z_B Z_C Z_N + Z_C Z_A Z_N + Z_A Z_B Z_C}. \quad (37)$$

Поділивши (34) на (30), отримаємо:

$$\dot{I}_{22} = \frac{\dot{E}_C Z_A Z_N + \dot{E}_C Z_B Z_N - \dot{E}_B Z_A Z_C - \dot{E}_B Z_A Z_N - \dot{E}_A Z_B Z_C - \dot{E}_A Z_B Z_N}{Z_A Z_B Z_N + Z_B Z_C Z_N + Z_C Z_A Z_N + Z_A Z_B Z_C}. \quad (38)$$

Поділивши (36) на (30), отримаємо:

$$\dot{I}_{33} = \frac{\dot{E}_A Z_B Z_C + \dot{E}_B Z_A Z_C + \dot{E}_C Z_A Z_B}{Z_A Z_B Z_N + Z_B Z_C Z_N + Z_C Z_A Z_N + Z_A Z_B Z_C}. \quad (39)$$

На підставі рис. 2 запишемо вирази струмів у фазах кола через контурні струми:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{11}; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_{11} - \dot{I}_{22}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{22} + \dot{I}_{33}; \quad \dot{I}_N = \dot{I}_{33}. \quad (40)$$

З урахуванням (37) – (39) та перетворень перепишемо (40) так:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A Z_B Z_C + ((\dot{E}_A - \dot{E}_B)Z_C + (\dot{E}_A - \dot{E}_C)Z_B)Z_N}{Z_A Z_B Z_C + (Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A)Z_N}; \quad (41)$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B Z_A Z_C + ((\dot{E}_B - \dot{E}_A)Z_C + (\dot{E}_B - \dot{E}_C)Z_A)Z_N}{Z_A Z_B Z_C + (Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A)Z_N}; \quad (42)$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C Z_A Z_B + ((\dot{E}_C - \dot{E}_A)Z_B + (\dot{E}_C - \dot{E}_B)Z_A)Z_N}{Z_A Z_B Z_C + (Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A)Z_N}; \quad (43)$$

$$i_N = \frac{\dot{E}_A Z_B Z_C + \dot{E}_B Z_A Z_C + \dot{E}_C Z_A Z_B}{Z_A Z_B Z_C + (Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_C Z_A) Z_N}. \quad (44)$$

Порівняння розрахунку сили струму у фазі А чотирипровідного кола за методом контурних струмів з аналогічними розрахунками за методами двох вузлів і симетричних складових здійснено так само, як і у випадку трипровідного кола. Результат показав їх ідентичність. При цьому метод контурних струмів дав змогу отримати результат із меншою кількістю розрахункових операцій порівняно з іншими методами.

*Висновки.* Таким чином, у роботі на базі методу контурних струмів отримані рівняння комплексів струмів у фазах трифазного кола. Вони дають можливість визначати струми у трифазних трипровідних і чотирипровідних колах, які працюють у несиметричних режимах. Отримані рівняння мають меншу кількість розрахункових дій порівняно з методами двох вузлів і симетричних складових, але не дають можливості у процесі розрахунку отримувати значення комплексу напруги зсуву нейтралі. Подальші дослідження мають бути спрямовані на з'ясування доцільності застосування інших методів розрахунку розгалужених кіл до аналізу несиметричних трифазних кіл.

#### Список використаних джерел

1. John A. Adebisi, Leokadia N.P. Ndjuluwa. A survey of power-consumption monitoring systems. *E-Prime—Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2024. Vol. 7. P. 100386. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100386>
2. Попова І. О., Квітка С. О., Вовк О. Ю. Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження. *Праці ТДАТУ*. 2023. № 23 (1). С. 179–187. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187>
3. Abu Al-Haija, Q. A Stochastic Estimation Framework for Yearly Evolution of Worldwide Electricity Consumption. *Forecasting*. 2021. Vol. 3. P. 256–266. <https://doi.org/10.3390/forecast3020016>
4. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Попова І. О., Діордієв В. Т. Збереження роботоздатності трифазного статичного навантаження за неповнофазного живлення. *Праці ТДАТУ*. 2024. № 24 (1). С. 136–150. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-10>
5. Olczykowski Z. Electric Arc Furnaces as a Cause of Current and Voltage Asymmetry. *Energies*. 2021. Vol. 14 (16). P. 5058. <https://doi.org/10.3390/en14165058>
6. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Квітка О. С. Контроль витрати ресурсу ізоляції асинхронних електродвигунів при відхиленні напруги живлячої мережі. *Праці ТДАТУ*. 2015. № 15 (2). С. 154–159.
7. Perera S., Elphick S. Impact and management of power system voltage unbalance. *Applied Power Quality. Elsevier*. 2023. P. 49–69. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85467-2.00001-9>
8. Вовк О. Ю., Попова І. О. Покращення режиму роботи симетричного трифазного навантаження при несиметрії живильних напруг. *Праці ТДАТУ*. 2025. № 25 (1). С. 64–72. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-1-8>
9. Ma K., Fang L., Kong W. Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2020. Vol. 6 (3). P. 479–488. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2019.03280>
10. Torres I.C., Negreiros G.F., Tiba C. Theoretical and Experimental Study to Determine Voltage Violation, Reverse Electric Current and Losses in Prosumers Connected to Low-Voltage Power Grid. *Energies*. 2019. Vol. 12 (23). P. 4568. <https://doi.org/10.3390/en12234568>
11. Bellan D., Furga G.S., Pignari S.A. Circuit Representation of Load and Line Asymmetries in Three-Phase Power Systems. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 9. P. 75–80.
12. Weislik M., Kazala R., Strzabala P. Characteristics and Parameters of a Three-Phase, Three-Wire Balanced Circuit with Non-Linear Load. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 1867. <https://doi.org/10.3390/en17081867>
13. Makarov S. N., Ludwig R., Bitar S. J. Practical Electrical Engineering. *Springer Cham*. 2016. 987 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21173-2>



14. Bird J. *Bird's Electrical Circuit Theory and Technology*. Routledge. 2021. 912 p.
15. Теорія електричних кіл : навч. посіб. / В. Д. Косенков, А. В. Горошко, А. С. Каштальян, В. Д. Бідюк. Хмельницький : ХНУ, 2024. 346 с.
16. Clarence Victor Christie. *Electrical Engineering: the Theory and Characteristics of Electrical Circuits and Machinery*. Legare Street Press. 2022, 428 p.
17. Хілов В. С. *Теоретичні основи електротехніки : підручник*. Київ : Видавництво «Каравела», 2021. 468 с.
18. Chatterjee Sh. *Electrical Circuit Analysis and Network Theory*. AICTE. 2022. 338 p.
19. Steinmetz Ch. P. *Theory and Calculations of Electrical Circuits*. Legare Street Press. 2022. 396 p.
20. K. Máslo, J. Koudelka, B. Batora, V. Vyčítal. Asymmetrical, Three-phase Power System Model: Design and Application. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2023. Vol. 20 (11). P.9–27. <https://doi.org/10.12700/APH.20.11.2023.11.2>

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025

Стаття прийнята 12.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



**O. Vovk, I. Popova**  
**Dmytro Motornyi Tavsria State Agrotechnological University**

## **ANALYSIS OF ASYMMETRICAL THREE-PHASE CIRCUITS USING THE CONTOUR CURRENT METHOD**

### *Summary*

The article discusses three-phase electrical circuits operating in asymmetrical modes. It is noted that the causes of asymmetry in such circuits in practice may be the uneven distribution of single-phase loads between the phases of a three-phase system, the connection of powerful single-phase consumers, the influence of photovoltaic modules and charging stations, damage to electrical equipment, etc. The occurrence of asymmetry causes disruption to the normal functioning of three-phase loads, in particular a reduction in efficiency, increased electricity consumption and additional heating.

An analysis of publications on this topic has revealed that, at present, the calculation of currents in asymmetrical three-phase circuits is based on the two-node method or the symmetrical component method. The first method is mainly used in the analysis of three-phase circuits in cases of load or power line asymmetry. Its essence lies in determining the neutral displacement voltage and then the current forces in the circuit phases. The second method is mainly used in the analysis of three-phase circuits in the case of source asymmetry. Its essence lies in determining the symmetrical components of voltages and currents, and then the current forces in the circuit phases. One of the disadvantages of these methods is that their use involves a significant amount of calculations. Therefore, the aim of this article was to justify the possibility of using the contour current method to determine the current forces in the phases of a three-phase circuit under asymmetrical operating conditions.

To achieve this goal, the application of this method was considered for three-wire and four-wire three-phase circuits in the case of load or source asymmetry. Based on the results, a comparative analysis was made with the two-node method and the symmetrical component method. In the course of the study, the calculation diagrams of the circuits with marked contour currents and the compiled systems of equations using the contour current method were presented. The solutions to these systems of equations were expressions of the complexes of the effective values of the circuit currents. A numerical comparison of the obtained equations with the current equations using the two-node and symmetrical component methods was performed. As a result, it was established that the obtained equations have fewer calculation steps, but do not allow obtaining the value of the neutral displacement voltage complex during the calculation process. Further research should be aimed at clarifying the feasibility of using other methods of calculating branched circuits for the analysis of asymmetrical three-phase circuits.

**Keywords:** theoretical foundations of electrical engineering, asymmetrical three-phase circuit, neutral shift voltage, symmetrical components, contour currents.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-20>

УДК 621.32:004.89:620.92

В. Б. Гулевський, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1434-9724

Ю. О. Постол, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0749-3771

К. Г. Петренко, ст. викладач

ORCID: 0009-0007-2972-4001

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: yulia.postol@tsatu.edu.ua

## ПРОЄКТУВАННЯ РОЗУМНИХ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ОСВІТЛЕННЯ

*Анотація.* У статті представлено вдосконалену методику проєктування електричних схем освітлення, яка відповідає сучасним вимогам енергоефективності, автоматизації та цифрової інтеграції. Запропоновано комплексний підхід, що об'єднує світлотехнічні розрахунки, електротехнічне моделювання та принципи енергетичного менеджменту. Отримані результати підтверджують ефективність впровадження інтелектуальних систем освітлення як засобу оптимізації енергоспоживання та підвищення функціональності будівельних об'єктів.

*Вступ.* Освітлення є одним із базових елементів інженерної інфраструктури будівель, що безпосередньо впливає на функціональність простору, енергоспоживання, ергономіку та безпеку користувачів. Проєктування електричних схем освітлення є складним технічним процесом, що потребує міждисциплінарного підходу. Він охоплює:

- світлотехнічні розрахунки – визначення кількості, типу та розташування світильників для досягнення нормативного рівня освітленості;
- електротехнічне моделювання – побудова принципівих і монтажних схем, вибір кабелів, захисної апаратури, систем керування;
- архітектурну інтеграцію – врахування планувальних рішень, висоти стель, зонування, природного освітлення;
- нормативно-правове регулювання – дотримання вимог ДБН, ДСТУ, EN, ІЕС щодо освітлення, безпеки й енергоефективності.

Якісно спроектована система освітлення забезпечує:

- достатній рівень освітленості відповідно до функціонального призначення приміщення;
- комфортні умови для роботи, навчання, відпочинку;
- зниження ризиків травматизму та підвищення безпеки;
- оптимізацію витрат на електроенергію та обслуговування.

У сучасному будівництві особливу увагу приділяють упровадженню інтелектуальних систем освітлення, які дають можливість автоматизувати керування, адаптувати освітлення до змінних умов і суттєво знизити енергоспоживання. Це відповідає глобальним тенденціям сталого розвитку, цифровізації та енергетичної трансформації.

Таким чином, проєктування освітлювальних електричних схем є не лише технічним завданням, а й важливою складовою енергоефективної та комфортної архітектури.

*Ключові слова:* електричні схеми освітлення, автоматизація освітлення, проєктування інженерних систем, енергоефективне освітлення, енергетичний аудит, енергетичний менеджмент.

*Постановка проблеми.* У сучасному будівництві та реконструкції об'єктів різного призначення (житлових, громадських, промислових) освітлення відіграє ключову роль у забезпеченні функціональності, безпеки й енергоефективності середовища. Незважаючи на наявність нормативної бази, проєктування електричних схем освітлення часто стикається з низкою проблем:



- невідповідність проектних рішень реальним умовам експлуатації. Типові схеми не враховують змінну активність користувачів, природне освітлення, зонування простору;
- низький рівень інтеграції автоматизованих систем керування. У багатьох об'єктах відсутні датчики руху, освітленості, таймери, що призводить до надмірного енергоспоживання;
- фрагментарне застосування енергоощадних технологій;
- недостатня адаптація до сучасних стандартів. Частина проектів базується на застарілих нормативах, без урахування вимог EN 12464-1, EN 15193-1 або ISO 50001;
- відсутність комплексного підходу до проектування. Освітлення часто розглядається ізольовано від архітектурних, енергетичних та експлуатаційних аспектів.

Ці проблеми призводять до перевитрат електроенергії, зниження комфорту користувачів, складнощів у технічному обслуговуванні та невідповідності сучасним вимогам сталого розвитку. Тому актуальним є розроблення методики проектування електричних схем освітлення, яка поєднує нормативні вимоги, світлотехнічні розрахунки, автоматизацію та енергоефективність.

*Аналіз останніх досліджень.* У контексті глобального переходу до сталого будівництва та цифровізації інженерних систем питання енергоефективного освітлення з автоматизованим керуванням набуває особливої актуальності. Останні дослідження в Україні демонструють активний розвиток у таких напрямках:

- автоматизація освітлення на підприємствах. У роботі [1] розглянуто розробку автоматичної системи освітлення території підприємства з використанням сучасних протоколів керування (*LonWorks, DMX-512, DALI*). Автори показали, що впровадження автоматизованих рішень дає можливість знизити втрати електроенергії до 60 %, а також покращити обслуговування системи завдяки дистанційному моніторингу;

- інтелектуальні системи освітлення з *HCL*-підходом. У статті [2] розглянуто перспективи розвитку систем автоматичного керування освітленням із використанням концепції *Human-Centric Lighting (HCL)*. Автори акцентують увагу на поєднанні датчиків часу, присутності, освітленості та індивідуальних налаштувань користувача. Зроблено висновки щодо ефективності широтно-імпульсної модуляції, димування та бездротового керування через інтернет.

Ці дослідження підтверджують, що сучасне проектування освітлення має базуватися не лише на світлотехнічних розрахунках, а й на принципах автоматизації, енергоефективності та персоналізації освітлювального середовища [3; 4; 5; 6].

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою цієї статті є розробка комплексної методики проектування систем освітлення, яка охоплює всі ключові етапи створення ефективної та сучасної освітлювальної установки. Запропонована методика має забезпечити відповідність технічним нормам, енергоефективність, функціональність і можливість інтеграції інтелектуальних систем керування. Результатом роботи має стати універсальна методика, придатна для застосування в різних типах об'єктів – від житлових і офісних приміщень до промислових і громадських просторів.

*Основні матеріали дослідження.* Проектування систем освітлення – це багатоступеневий процес, що поєднує світлотехнічні розрахунки, електротехнічне моделювання, вибір обладнання та дотримання нормативних вимог. Методика охоплює як технічні, так і функційні аспекти, що забезпечують ефективну, безпечну й енергоощадну експлуатацію системи.

Проектування систем освітлення регламентується низкою нормативних документів, які визначають вимоги до рівня освітленості, безпеки електроустановок, енергоефективності й ергономіки.

Дотримання цих норм забезпечує відповідність проекту чинному законодавству, технічним стандартам і міжнародним практикам [7–11] (табл. 1, табл. 2).

Таблиця 1

## Національні нормативні документи України

Документ	Зміст та застосування
ДБН В.2.5-28:2018	Визначає вимоги до природного та штучного освітлення будівель і споруд
ДСТУ Б А.2.4-24:2008	Регламентує внутрішнє електричне освітлення: рівні освітленості, типи світильників
ДСТУ EN 12464-1:2016	Встановлює норми освітлення робочих місць у приміщеннях (адаптований європейський стандарт)
ДСТУ ГОСТ 2.702:2013	Визначає правила виконання електричних схем (принципових, монтажних, підключення)
ДСТУ ІЕС 60364	Містить вимоги до електроустановок низької напруги, включно із захистом, заземленням, вибором кабелів

Таблиця 2

## Міжнародні стандарти

Стандарт	Організація	Застосування
ІЕС 60364	ІЕС (Швейцарія)	Загальні вимоги до електроустановок, включно з освітленням, захистом, безпекою
ISO 8995-1:2002 (CIE S 008/E)	ISO / CIE	Визначає кількісні та якісні параметри освітлення для різних типів приміщень
EN 15193-1:2017	CEN (ЄС)	Енергетична ефективність освітлення в будівлях, методи оцінки та розрахунку

Порівняльний аналіз українських та європейських нормативів у сфері освітлення показує, що європейські стандарти характеризуються більш високим рівнем деталізації щодо параметрів адаптивності освітлення, контролю блискавості, забезпечення рівномірності світлового потоку й інтеграції автоматизованих систем керування (табл. 3).

Крім технічних характеристик, у процесі проектування систем освітлення обов'язково враховуються енергетичні й екологічні вимоги, спрямовані на оптимізацію споживання ресурсів, зменшення викидів парникових газів і забезпечення сталого функціонування будівлі.

Таблиця 3

## Порівняльна таблиця: українські та європейські норми освітлення

Критерій	Українські норми (ДБН, ДСТУ)	Європейські норми (EN, ІЕС, ISO)
Базовий документ	ДБН В.2.5-28:2018 – Природне і штучне освітлення	EN 12464-1:2021 – Lighting of indoor workplaces
Рівень освітленості (офіс)	$\geq 500$ лк на робочій поверхні	$\geq 500$ лк у зоні завдання, $\geq 300$ лк у зоні оточення
Рівномірність освітлення	Не нормується чітко	$U_0 \geq 0,6$ у зоні завдання
Індекс передачі кольору (CRI)	Не менше ніж 80	Не менше ніж 80
Блискавість (UGR)	Рекомендовано уникати, без чітких меж	$UGR \leq 19$ для офісів
Колірна температура	Рекомендовано: 3000–4000 К	Визначається функціональним призначенням (2700–6500 К)
Енергоефективність	Враховується під час сертифікації будівель	EN 15193-1:2017 – Energy performance of buildings – Lighting
Автоматизація освітлення	Не обов'язкова, але рекомендована	Рекомендована, інтегрується в BMS
Методика розрахунку	Коефіцієнтний, точковий, Dialux / Relux	Точковий, Dialux/Relux, daylight harvesting



До ключових нормативних документів, що регламентують ці аспекти, належать:

– Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» – передбачає обов'язкове впровадження енергоощадних технологій, зокрема в освітлювальних системах, на етапі проектування та реконструкції об'єктів;

– наказ Мінрегіону № 169 від 2020 року – встановлює методику визначення класу енергоефективності будівель, де освітлення є одним із ключових параметрів оцінки;

– ISO 50001:2018 *Energy Management Systems* – міжнародний стандарт, який рекомендує інтеграцію освітлювальних систем у загальну енергетичну стратегію об'єкта, з акцентом на постійне вдосконалення енергетичних показників.

Методика проектування освітлювальної установки передбачає такі основні етапи:

#### 1. Аналіз об'єкта

Перед початком розрахунків здійснюється збір вихідних даних:

– тип об'єкта: житловий, офісний, промисловий, освітній тощо;

– площа та геометрія приміщень: впливає на кількість світильників і рівномірність освітлення;

– природне освітлення: наявність вікон, світлових прорізів, орієнтація фасадів;

– функційне зонування: робочі зони, коридори, технічні приміщення.

#### 2. Світлотехнічні розрахунки

Здійснюється відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 та ДСТУ EN 12464-1:2016. Основні методи:

– коефіцієнтний метод – для загального освітлення простих приміщень;

– точковий метод – для локального освітлення або складних геометрій;

– програмне моделювання – за допомогою *Dialux*, *Relux*, *Autodesk Revit*.

#### 3. Вибір обладнання

Критерії вибору:

– тип джерела світла: *LED*, люмінесцентні, галогенні;

– світловий потік: відповідність розрахунковим значенням;

– колірна температура: 2700–6500 К залежно від призначення приміщення;

– індекс передачі кольору (*CRI*): не менше ніж 80 для робочих зон;

– ступінь захисту (*IP*): *IP20* для сухих приміщень, *IP65* – для вологих.

#### 4. Побудова електричних схем

У процесі проектування електроосвітлювальної установки розробляється комплекс схем, які забезпечують повне технічне представлення системи освітлення, її функціональну логіку, просторову організацію та способи підключення. До основних типів схем належать [12]:

– схема розташування. Відображає просторове розміщення елементів освітлювальної системи (світильників, датчиків, кабелів, трубопроводів тощо) відносно архітектурних елементів будівлі. За потреби включає позначення зв'язків між компонентами, як-от джгути, кабельні траси або монтажні канали;

– принципова електрична схема освітлювальної мережі. Визначає логіку електричних з'єднань між основними елементами системи: джерелами живлення, світильниками, вимикачами, автоматичними пристроями керування. Схема дає змогу зрозуміти функційну взаємодію компонентів і послідовність їх роботи;

– схема електричних з'єднань шафи керування. Деталізує способи внутрішнього з'єднання елементів у розподільчій або шафі керування. Включає типи з'єднань, маркування проводів, кабелів, джгутів, а також місця їх підключення до відповідних клем, реле, контролерів тощо;

– схема під'єднання. Відображає методи та засоби зовнішнього електричного або механічного приєднання освітлювальної установки до інших систем або джерел живлення. Включає точки підключення, типи роз'ємів, кабельні вводи, заземлення й інші елементи інтерфейсу.



Ці схеми є невід’ємною частиною технічної документації, забезпечують точність монтажу, спрощують обслуговування та дають можливість інтегрувати систему освітлення в загальну інженерну інфраструктуру об’єкта.

#### 5. Інтеграція автоматизації

На етапі проектування освітлювальної установки передбачається впровадження сучасних засобів автоматизації, що забезпечують ефективне, гнучке й енергоощадне керування системою освітлення.

До основних рішень належать:

- встановлення датчиків руху й освітленості – для автоматичного ввімкнення / вимкнення світла залежно від присутності людей та рівня природного освітлення;
- сценарне керування освітленням – налаштування різних режимів роботи (наприклад, «робочий», «нічний», «економний») відповідно до часу доби, подій або потреб користувачів;
- застосування протоколів автоматизації, як-от *DALI*, *KNX*, *Modbus*, що забезпечують інтеграцію освітлювальної системи з іншими інженерними мережами та дають змогу централізоване керування, моніторинг і діагностику.

Така методика проектування освітлювальної установки дає можливість системно й ефективно реалізувати освітлення відповідно до технічних, естетичних і енергоефективних вимог.

*Висновки.* Процес створення електричних схем освітлення є складним і багатогранним технічним завданням, що потребує глибоких інженерних знань, точного дотримання нормативних вимог і впровадження сучасних технологічних рішень. Ефективне проектування передбачає не лише забезпечення оптимального рівня освітленості, а й досягнення високих показників енергоефективності, безпеки та комфорту для користувачів. Такий комплексний підхід відповідає актуальним тенденціям розвитку інженерної інфраструктури та сприяє створенню надійних, адаптивних і довговічних систем освітлення.

#### Список використаних джерел

1. Тоценко В. О., Сарибоба Г. В., Бевза О. М. Автоматична система освітлення території підприємства. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2020. № 3–4. С. 28–33. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/54161/1/EAI2020\\_3-4\\_28-33.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/54161/1/EAI2020_3-4_28-33.pdf)
2. Кислиця Д. В., Грищенко А. В., Кислиця О. В. Перспективи розвитку систем автоматичного керування освітленням на основі HCL. *Сучасні напрями розвитку науки*. 2023. № 2. С. 45–52. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/3509>
3. Третьякова Л. Д., Мітюк Л. О., Качинська Н. Ф. Розумні технології у проектуванні систем електричного освітлення. *Art&Design*. 2024. № 1. С. 147–160. URL: [https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/26505/1/artdes\\_2024\\_N1\\_P147-160.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/26505/1/artdes_2024_N1_P147-160.pdf)
4. Плешков П. Г., Орлович А. Ю., Серебренніков С. В. та ін. Енергоефективні системи освітлення для промислових та комунально-побутових споживачів : навчальний посібник. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. 246 с.
5. Гулевський В. Б., Постол Ю. О., Ковальов О. О. Використання інформаційних технологій як ефективного засобу вивчення дисципліни «Основи проектування систем електрифікації». Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти : збірник науково-методичних праць ТДАТУ. 2023. Вип. 26. С. 37–46. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/16841>
6. Постол Ю. О., Гулевський В. Б. Цифрові технології управління сільським господарством. Актуальні питання виробництва продукції рослинництва та садівництва : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (Запоріжжя, 8 листопада 2023 р.). Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 92–95. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/17175>
7. ДБН В.2.5-28:2018. *Природне і штучне освітлення*. Київ : Мінрегіон України. 2018. URL: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3074958732556240833?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2)
8. ДСТУ EN 12464-1:2016. (2016). *Світло та освітлення. Освітлення робочих місць у приміщеннях*. Київ : ДП «УкрНДНЦ». URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=71838](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71838)



9. EN 15193-1:2017. *Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting*. Brussels : CEN. 2017. URL: [https://www.cencenelec.eu/standards/EN-15193-1\\_2017\\_1](https://www.cencenelec.eu/standards/EN-15193-1_2017_1)
10. ISO 50001:2018. (2018). *Energy management systems – Requirements with guidance for use*. Geneva : International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/standard/69426.html>
11. IEC 60364. (2020). *Low-voltage electrical installations*. Geneva : International Electrotechnical Commission. URL: <https://www.iec.ch/standard/60364>
12. ДСТУ 3321:2003. Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять / Я. Юзьків (керівн. розроб.). Вид. офіц. [Чинний від 2003-12-08]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. III, 51 с. (Національний стандарт України).

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2025*

*Стаття прийнята 12.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**V. Hulevskiy, Yu. Postol, K. Petrenko**  
**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **DESIGN OF SMART AND ENERGY-EFFICIENT LIGHTING SOLUTIONS**

### *Summary*

This article presents a methodology for designing electrical lighting circuits that aligns with modern requirements for energy efficiency, automation, and digital integration. A structured approach is proposed, combining lighting engineering calculations, electrical modeling, and energy management principles. The findings support the transition to intelligent lighting systems as an effective means of enhancing both energy performance and the functional capabilities of buildings.

**Keywords:** electrical lighting circuits, lighting automation, engineering systems design, energy-efficient lighting, energy audit, energy management.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-21>

УДК 621.311

С. П. Денисюк, д-р техн. наук

М. Ф. Сопель, д-р техн. наук

О. В. Сподинський, пров. інженер

Ю. М. Довгодько, пров. інженер

*Інститут електродинаміки Національної академії наук України*

e-mail: a.spodynskyi@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6299-3680

ORCID: 0000-0002-3438-5848

ORCID: 0009-0002-3947-2534

ORCID: 0009-0001-7010-8629

## СИНХРОФАЗОРИ В СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ: ВИЗНАЧЕННЯ, ВИМІРЮВАННЯ ТА АРХІТЕКТУРА WAMS

*Анотація.* З розвитком сучасних енергетичних систем постає нагальна потреба в підвищенні точності вимірювання електричних параметрів і керування електромережами. Одним із ключових інструментів цього процесу стали синхрофазори PMU (Phasor Measurement Unit), що забезпечують синхронізовані в реальному часі вимірювання фазових кутів, амплітуд і частот сигналів. У статті розглядаються основні проблеми, пов'язані з неоднозначністю визначення синхрофазора, впливом гармонік, шумів і похибок синхронізації, а також розроблено аналітичний підхід до формалізації вимірювань на основі перетворення Гільберта. Обґрунтовано визначення амплітуди, фази та частоти електричних сигналів у нестационарних умовах, розкрито архітектуру систем широкогозонного вимірювання WAMS (Wide Area Measurement Systems), до складу яких входять PMU, концентратори PDC (Phasor Data Concentrator), канали передачі даних і центральні системи керування. Наведено принципи побудови багаторівневих WAMS, включно із Super PDC, що дають змогу агрегувати дані з різних регіонів і забезпечують онлайн-моделювання та моніторинг електромереж у реальному часі. Показано роль GPS-синхронізації у забезпеченні єдиного часу вимірювань, а також наведено приклади практичного застосування WAMS для запобігання аварійним ситуаціям, синхронізації генераторів, адаптивного захисту й виявлення аномалій. Запропонована методика забезпечує високу точність та уніфікацію вимірювань, підвищення ефективності моніторингу й керування енергосистемами, а також адаптацію до викликів, пов'язаних з інтеграцією відновлюваних джерел енергії та переходом до інтелектуальних електричних мереж (Smart Grids).

*Ключові слова:* електроенергетична система, моніторинг, WAMS, PMU, інтелектуальні електричні мережі, синхрофазор, вимірювання, перетворення Гільберта.

*Постановка проблеми.* На сьогодні енергосистеми стають дедалі складнішими через зростання частки розподіленої генерації [7]. Важливість забезпечення стабільності та надійності таких систем потребує впровадження новітніх технологій вимірювання [8]. Синхрофазори, які є ключовим інструментом для вимірювання амплітуди та фазового кута електричних величин у реальному часі, сприяють оптимізації роботи енергетичних мереж і зниженню ризиків виникнення аварійних ситуацій [6]. З розвитком інтелектуальних мереж (Smart Grids) та інтеграцією відновлювальних джерел енергії, як-от сонячна та вітрова енергія, точність даних про стан системи стала критично важливою. Синхрофазори дають можливість здійснювати моніторинг змін фазових кутів, амплітуд і частот сигналів у реальному часі, що є надзвичайно затребуваним для діагностування стану системи. Вони забезпечують можливість ефективного розподілу енергетичних потоків і своєчасного виявлення аномалій у роботі обладнання. Завдяки точним даним синхрофазорів існує можливість запобігати перевантаженням електромережі та забезпечувати її стабільність навіть у випадках значних коливань навантаження.



*Аналіз останніх досліджень.* Історія технології синхрофазорів бере свій початок з кінця ХХ ст., коли було вперше запропоновано концепцію представлення змінного струму за допомогою фазорів [2]. Проте широке використання синхрофазорів стало можливим лише завдяки розвитку сучасних методів цифрової обробки сигналів та створенню стандартів, зокрема такого як [1]. Цей стандарт визначає загальні вимоги до пристроїв векторних вимірювань РМУ, але залишає відкритими питання про єдиний підхід до визначення синхрофазорів, що є викликом для інтеграції автоматизованих систем.

Незважаючи на досягнення в розвитку технологій вимірювання, інтеграція синхрофазорів у реальні енергосистеми стикається із численними викликами, зокрема, через вплив шумів, гармонік та інших завад, які можуть спотворювати результати вимірювань. Для подолання зазначених проблем потрібно не лише вдосконалювати алгоритми обчислень, але й запроваджувати нові підходи до їх стандартизації та верифікації.

Однією з основних проблем, пов'язаних із визначенням синхрофазорів, є відсутність однозначної методології для їх розрахунку. У сучасних енергосистемах сигнали мають складну структуру, що охоплює нестационарні компоненти, гармоніки та шум. Традиційні методи, які базуються на припущенні стаціонарності сигналу, часто не враховують реальних умов і призводять до значних похибок. Наприклад, різні алгоритми обчислення фазових кутів можуть давати несумісні результати для того самого сигналу.

Ще одним важливим аспектом є вплив гармонік, що виникають унаслідок наявності нелінійних навантажень у мережі [5]. Гармоніки можуть призводити до значних спотворень результатів вимірювання, що ускладнює аналіз стану системи. Незважаючи на те що сучасні пристрої РМУ мають засоби для фільтрації гармонік, їх ефективність залежить від конкретного алгоритму обробки сигналу.

Також важливим є питання синхронізації даних у часі. Для забезпечення точності синхрофазорів потрібно мати високоточні системи синхронізації, як-от GPS (Global Positioning System). Проте навіть найменші похибки в часовій синхронізації можуть призводити до значних похибок у вимірюваннях фазових кутів. Ця проблема особливо актуальна у великих енергосистемах, де сигнали передаються на великі відстані.

Крім того, стандарт [1], хоча і надає основні вимоги до пристроїв векторних вимірювань, усе ж залишає простір для різних інтерпретацій. Це створює ситуацію, коли пристрої від різних виробників можуть мати різні характеристики точності, що ускладнює їх інтеграцію в єдину систему.

Висока вартість обладнання та необхідність регулярного калібрування також є стримувальними факторами для впровадження синхрофазорів. До того ж процес верифікації вимірювань є складним і потребує використання високоточного тестового обладнання, що значно підвищує витрати.

*Основна частина.* Для подолання зазначених проблем необхідно розробляти нові методи аналізу сигналів, які враховують нестационарність і багатокomпонентність реальних сигналів. Наприклад, використання аналітичних сигналів, що отримуються за допомогою перетворення Гільберта, дає змогу значно знизити похибки й забезпечити однозначність вимірювань.

Основні величини, які вимірюються за допомогою синхрофазорів, включають фазовий кут, амплітуду та частоту сигналу [2]. Визначення цих величин базується на математичному представленні сигналу таким чином:

$$x(t) = X_m(t) \cos(\theta(t)), \quad (1)$$

де  $X_m(t)$  – амплітуда сигналу;  $\theta(t)$  – фазовий кут.

Для точного визначення електричних параметрів використовуються методи аналітичних сигналів. Одним із ключових інструментів є перетворення Гільберта, яке дає змогу отримати уявну складову сигналу:



$$x_h(t) = H\{x(t)\}, \quad (2)$$

де  $H\{x(t)\}$  – оператор перетворення Гільберта.

Сформований із використанням співвідношення (2) аналітичний сигнал можна подати у вигляді:

$$z(t) = x(t) + jx_h(t), \quad (3)$$

де  $z(t)$  – комплексний сигнал, що містить інформацію про амплітуду та фазу.

Амплітуда сигналу визначається за формулою:

$$X_m(t) = \sqrt{x^2(t) + x_h^2(t)}, \quad (4)$$

а фазовий кут – як арктангенс відношення уявної складової до дійсної:

$$\phi(t) = \arctan\left(\frac{x_h(t)}{x(t)}\right). \quad (5)$$

Також важливою величиною є частота, яка обчислюється як похідна фазового кута:

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}. \quad (6)$$

Формули (1)–(6) дають можливість із високою точністю аналізувати сигнал у реальному часі, що є критично важливим для роботи енергосистем. Крім теоретичної основи, вони забезпечують базу для розробки практичних алгоритмів обробки сигналів, які враховують реальні умови, як-от наявність шумів і гармонік.

Отже, визначення величин згідно з (1)–(6), що вимірюються в реальному часі з високою точністю, є основою для побудови ефективних систем моніторингу та керування енергосистемами, а завдяки використанню сучасних математичних підходів, як-от перетворення Гільберта, можна досягти високої точності та надійності вимірювань. Власне синхрофазор визначається на математичному аналізі сигналів і є ефективним для виділення ключових параметрів [2]. Важливою складовою є застосування методів аналітичного сигналу, які передбачають перетворення Гільберта для виділення уявної складової сигналу. Такий підхід забезпечує точне моделювання сигналу навіть у складних умовах.

Наведений підхід також враховує вплив гармонік та інших завад, що може бути компенсоване за допомогою відповідної фільтрації та корекції амплітудно-частотних характеристик. Наприклад, для сигналів, що містять низькочастотні гармоніки, застосовуються спеціальні цифрові фільтри, які мінімізують внесок небажаних компонентів.

Для реальних систем важливим є забезпечення коректної синхронізації вимірювань із глобальним часом [4]. Це досягається через використання систем синхронізації, як-от GPS, які забезпечують точність до наносекунд. Така синхронізація гарантує, що всі вимірювання відповідатимуть єдиній шкалі часу, що є критичним для аналізу розподілених систем.

Особливу увагу слід приділяти випадкам, коли сигнал містить високочастотні завади. У таких випадках можуть бути корисними методи спектрального згладжування або адаптивної фільтрації. Проведені тестові результати показують, що такі методи дають можливість зменшити похибки вимірювань на 20–30 %.

Застосування синхрофазорів в енергосистемах дає змогу проводити моніторинг частоти, амплітуди та фази сигналу з високою точністю [2]. Однак коректне визначення синхрофазора потребує попередньої фільтрації сигналів для видалення гармонік і шумів. Сучасні алгоритми, засновані на методах цифрової обробки сигналів, сприяють адаптації до реальних умов [2].

Іншим важливим аспектом є корекція амплітудно-частотних характеристик, які впливають на точність вимірювань. Використання адаптивних фільтрів і методів компенсації помилок

є необхідним для отримання надійних даних. До того ж аналіз вузькосмугових сигналів дає можливість оптимізувати процес обробки шляхом зменшення спектральних викривлень.

Під час визначення синхрофазора важливо також враховувати вплив перехідних процесів в енергосистемі. У разі виникнення аварійних ситуацій чи швидких змін навантаження система може генерувати сигнали, що значно відхиляються від номінальних параметрів. У таких випадках використання методів фазової синхронізації дає змогу забезпечити стабільність вимірювань.

Додатковий аналіз дає можливість ідентифікувати найбільш критичні елементи системи, які можуть спричинити похибки. Наприклад, для визначення впливу гармонік на результати вимірювань можна застосувати методи частотного розкладання, за якими можна оцінити внесок кожної гармоніки окремо.

Одним із важливих напрямів практичної реалізації синхрофазорних технологій є створення систем широкозонного вимірювання – WAMS (рис. 1). Їх ефективність забезпечується завдяки синхронізованим вимірюванням, що збираються в режимі реального часу з різних географічних точок енергосистеми.

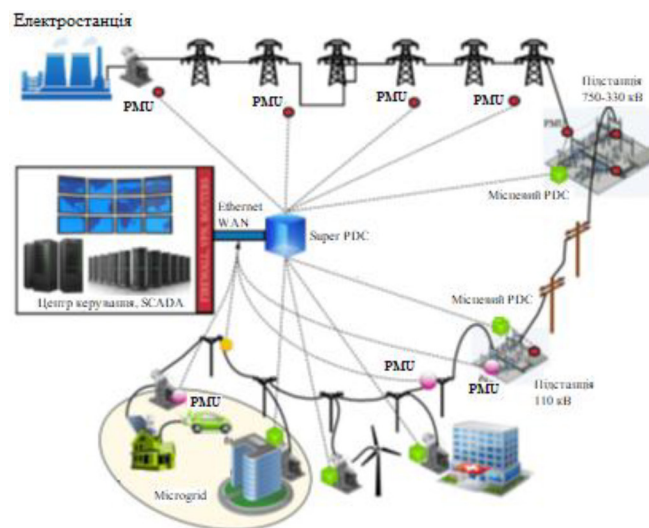


Рис. 1. Схема типової реалізації WAMS

Основними компонентами WAMS є [2]:

- PMU (Phasor Measurement Unit) – пристрої для синхронного вимірювання змінних струмів і напруги. Вони встановлюються у ключових вузлах мережі й центрах навантаження. PMU забезпечують вимірювання фазорів – комплексних величин, що містять амплітуду та фазовий кут сигналу. Для синхронізації використовується глобальна система позиціонування GPS, що дає можливість об'єднати всі вимірювання у єдиний часовий простір;

- PDC (Phasor Data Concentrator) – концентратори даних, що збирають інформацію з декількох PMU і передають її до центру керування. У багаторівневих WAMS існують локальні PDC, які передають дані до Super PDC, що агрегує інформацію з кількох регіонів. Це дає змогу кожному сегменту енергосистеми мати повну картину стану мережі, навіть за її межами;

- комунікаційна інфраструктура та програмне забезпечення – відповідають за передачу, обробку й архівацію даних. У центрі керування ці дані використовуються для моделювання в реальному часі, оцінки стану системи, візуалізації, раннього попередження, стабілізації та адаптивного захисту.

Швидкість обробки сигналів у WAMS зазвичай значно перевищує ту, що доступна в традиційних SCADA-системах. Це дає можливість у режимі on-line виявляти відхилення в роботі



мережі й оперативно реагувати для запобігання аварій, що визначає перспективи застосування WAMS у сферах, де традиційні SCADA-системи не спроможні надати об'єктивний результат.

Особливо цінною функцією є синхронізація генераторів. PMU дають можливість порівнювати фази та частоти навіть віддалених генераторів. Якщо два генератори працюють паралельно, то вони можуть бути безпечно синхронізовані лише за умови нульової різниці фаз, інакше можливі збої або аварійне відключення. GPS-приймачі у складі PMU гарантують точне узгодження фазових характеристик усієї системи.

Таким чином, WAMS із синхронізованими вимірюваннями дає змогу вийти на новий рівень управління енергосистемами, забезпечуючи стабільність, прогнозованість і адаптивність навіть у критичних ситуаціях.

Синхрофазори широко застосовуються для таких задач [2]:

– **моніторинг стабільності енергосистем.** Синхрофазори дають змогу в реальному часі відстежувати зміни частоти та напруги в різних вузлах мережі. Це сприяє своєчасному виявленню порушень стабільності системи та прийняттю необхідних заходів для їх усунення;

– **виявлення аномалій у роботі генераторів і трансформаторів.** Використання даних синхрофазорів допомагає виявляти приховані дефекти в обладнанні. Наприклад, відхилення у фазі чи амплітуді можуть вказувати на несправності обмоток або зниження ефективності охолодження;

– **оптимізація розподілу навантаження між вузлами мережі.** Завдяки точним даним про фазу й амплітуду синхрофазори дають можливість оптимально перерозподіляти потоки енергії, мінімізуючи втрати та запобігаючи перевантаженням окремих ділянок мережі;

– **оцінка динамічної поведінки енергосистем під час перехідних процесів.** У випадку аварій чи великих змін у навантаженні синхрофазори надають інформацію про швидкість і характер цих змін. Це допомагає краще зрозуміти динаміку системи й удосконалити моделі її поведінки.

Крім того, синхрофазори можуть використовуватися для навчання моделей машинного навчання, завдяки цьому можна передбачати можливі аварійні ситуації. Наприклад, аналіз даних PMU допомагає ідентифікувати приховані закономірності, які передують збоям у системі.

Системи, оснащені синхрофазорами, здатні автоматично адаптувати роботу до змін навантаження та забезпечувати високий рівень надійності постачання електроенергії. Це особливо актуально в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії, як-от сонячна та вітрова енергія, які характеризуються значною варіабельністю.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

- розробку адаптивних алгоритмів, що враховуватимуть специфіку конкретних енергосистем;
- створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень на основі даних PMU, машинного навчання та предиктивної аналітики;
- удосконалення методів обробки вузькосмугових та імпульсних сигналів, характерних для аварійних режимів;
- інтеграцію систем WAMS у середовища з відновлюваними джерелами енергії для забезпечення їх стабільності та прогнозованості.

#### *Висновки*

1. У статті розглянуто сучасний підхід до визначення синхрофазорів, заснований на аналітичному представленні сигналів і використанні перетворення Гільберта. Запропонована методика довела свою ефективність як у теоретичному, так і в практичному аспекті, оскільки враховує реальні умови роботи енергосистем – гармонічні спотворення, шум, нестационарність сигналів і похибки синхронізації. Такий підхід дає змогу підвищити достовірність вимірю-

вань, уніфікувати процес обчислення фазорів і створити основу для побудови масштабованих систем моніторингу та керування.

2. Ключовою інновацією дослідження є розгляд архітектури систем широкозонного вимірювання WAMS як комплексної інфраструктури для збору, агрегації та аналізу даних у режимі реального часу. Використання багаторівневої структури з локальними та центральними PDC, Super PDC і GPS-синхронізацією забезпечує єдиний часовий простір вимірювань і дає можливість здійснювати як оперативний контроль, так і ретроспективний аналіз та прогнозування можливих відхилень у роботі енергосистеми.

3. Практична реалізація запропонованого підходу доводить його здатність мінімізувати похибки вимірювань, підвищити стабільність енергомереж навіть за умов коливань навантаження або аварійних режимів. Завдяки точному моніторингу амплітуд, частот і фаз сигналів система синхрофазорів надає операторам змогу своєчасно виявляти порушення й запобігати аваріям, підвищуючи надійність та ефективність управління.

4. Інтеграція синхрофазорів у сучасні енергетичні системи, що охоплюють відновлювані джерела енергії, мікромережі та цифрові підстанції, відкриває нові можливості для розвитку концепції Smart Grid. Це створює адаптивну, взаємопов'язану та стійку енергетичну інфраструктуру, здатну реагувати на сучасні виклики енергетичної безпеки та сталого розвитку.

5. Загалом поєднання теоретичних засад і прикладних рішень у межах WAMS та технологій синхрофазорів формує потужну науково-технічну базу для розвитку цифрової енергетики. Запропонована методика забезпечує високу точність і надійність вимірювань, сприяє підвищенню ефективності моніторингу, керування та прогнозування стану енергомереж, а також відкриває нові перспективи для інтеграції інтелектуальних систем управління в енергетиці майбутнього.

#### *Список використаних джерел*

1. IEEE C37.118.1-2018. Synchronphasor Measurements for Power Systems. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/60255-118-1/5724>
2. Phadke A. G., Thorp J. S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. New York, USA. 2008. 245 p.
3. Lyons R. Understanding Digital Signal Processing. Boston, USA. 2011. 858 p.
4. Gabor D. Theory of Communication. IEE, 1946. Vol. 93 (2). P. 429–457. URL: <https://jcsphysics.net/lit/gabor1946.pdf>.
5. Stankovic A.M. Frequency Estimation in Power Systems: Theory and Application.
6. Anderson P. Analysis of Faulted Power Systems. IEEE Press, 1995. 536 p.
7. Білінов І. В., Денисюк С. П., Лежнюк П. Д., Ущиповський К. В., Слободян Р. О., Козачук О. І., Мірошник В. О., Сподинський О. В. Цифрова трансформація електроенергетики України. Реалізація в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення : монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2024. 362 с.
8. Белоха Г. С., Денисюк С. П., Дерев'яно Д. Г., Жуйков В. Я., Сопель М. Ф., Сподинський О. В. SMART-моніторинг ефективності функціонування локальних електроенергетичних систем : монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. 280 с.

*Стаття надійшла до редакції 14.10.2025*

*Стаття прийнята 05.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*





**S. Denysiuk, M. Sopel, O. Spodynskyi, Yu. Dovgodko**  
**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine**

**SYNCHROPHASORS IN MODERN POWER SYSTEMS:  
DEFINITION, MEASUREMENT, AND WAMS ARCHITECTURE**

*Summary*

With the advancement of modern power systems, there is an urgent need to improve the accuracy of electrical parameter measurements and power grid control. One of the key tools in this process is the synchrophasor PMU (Phasor Measurement Unit), which enables real-time synchronized measurements of phase angles, amplitudes, and signal frequencies. This paper examines major challenges associated with the ambiguous definition of synchrophasors, the influence of harmonics, noise, and synchronization errors, and proposes an analytical approach based on the Hilbert transform for accurate signal formalization. Particular attention is given to the mathematical substantiation of amplitude, phase, and frequency determination under non-stationary conditions. In addition, the paper details the architecture of Wide Area Measurement Systems (WAMS), which consist of PMUs, Phasor Data Concentrators (PDCs), communication networks, and centralized control systems. It outlines the principles of building multilevel WAMS, including Super PDCs, which aggregate data from multiple regions and enable real-time grid modeling and monitoring. The role of GPS synchronization in providing unified measurement timestamps is discussed, along with practical examples of WAMS applications such as preventing emergencies, generator synchronization, adaptive protection, and anomaly detection. The proposed methodology ensures high accuracy and consistency in measurements, enhances power system monitoring and control efficiency, and supports adaptation to challenges associated with renewable energy integration and the transition to Smart Grids.

**Keywords:** power system, monitoring, WAMS, PMU, smart grids, synchrophasor, measurement, Hilbert transform.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-22>

УДК 621.384.4

Р. Є. Кригуль<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3061-9176

С. П. Шаповал<sup>2</sup>, д-р. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4985-0930

С. В. Сиротюк<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9966-6299

М. Є. Касинець<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7686-7482

Т. О. Станицький<sup>1</sup>, старший викладач

ORCID: 0009-0006-3897-4267

І. О. Дудко<sup>1</sup>, асистент

ORCID: 0009-0003-0389-9226

<sup>1</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені

С. З. Гжицького

<sup>2</sup> Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: krrroma@ukr.net

## СИСТЕМА ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛИЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

*Анотація.* Сьогодні завдання розвитку альтернативного одержання енергії надзвичайно актуальне. Традиційні ресурси досить дорогі та впливають на розвиток держави. Це змушує шукати нові способи отримання енергії. Важливим чинником максимізації продуктивності та покращення механізації праці, якості й асортименту продукції є автоматизація технологічних процесів. У роботі представлено систему покращення енергоефективності споруди завдяки застосуванню поновлюваних джерел енергії. Представлені потрібні розрахунки. Для знаходження технічних параметрів цієї системи енергопостачання споруди закритого ґрунту з використання відновлюваних джерел енергії потрібно знати період використання теплиці, вимоги щодо вирощування розсади, площу огорожувальної конструкції. Це дає змогу знайти тепловий баланс, дібрати тепловий вентилятор та акумуляторну батарею, відшукати технічні параметри фотоелектричної панелі.

*Ключові слова:* споруда закритого ґрунту, сонячна фотопанель, сонце, акумуляторний елемент.

*Постановка проблеми.* У країнах із теплим літом і холодною зимою вирощувати овочеві культури, як-от червоний перець та помідори, не завжди доречно. Наприклад, овочі, вирощені в теплицях у теплих країнах, все одно будуть дешевшими. За останні роки імпорту таких культур збільшився вдвічі.

У нашій Україні приблизно 15 % помідорів та перцю вирощують у спорудах закритого ґрунту. Через значні затрати на опалення вартість продукту виходить неконкурентною. У сучасних теплицях близько 40 % собівартості припадає на обігрівання, інколи може доходити і до 50 %. Тому перець та помідори з теплих країн чи країн з дешевими енергоносіями навіть з урахуванням транспортування коштують менше. Максимальне надходження імпортованих помідорів переважно припадає на квітень та травень, коли потреба у свіжих овочах зростає, однак внутрішній ринок пропозиції ще не достатній. Та мінімальне постачання таких овочів є в травні – вересні, коли максимальна внутрішня пропозиція.

*Аналіз останніх досліджень.* Нині в країні є велика кількість споруд ґрунту, у яких вирощують різноманітні сільськогосподарські культури. Однак у таких спорудах застосовують морально та фізично застарілі системи управління процесами енергопостачання, а це мінімізує ефективність споруд. Сьогодні завдання піднесення альтернативних методик отримання енергії є актуальним. Звичні джерела енергії швидко вичерпуються та через незначний період часу можуть взагалі зникнути. Енергетичні ресурси досить дорогі та значно впливають на еко-

номіку держави. Тож цей фактор змушує людство шукати нові способи та методи отримання енергії.

Автоматизована система управління технологічними процесами є надзвичайно вирішальним і важливим фактором максимізації продуктивності та покращення умов праці, а це в подальшому збільшує якість і розширює асортимент продукції.

Автоматизоване регулювання будь-якого процесу дає змогу змінювати технологічні параметри [1; 2; 5; 6].

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Завдання статті – підвищити енергоефективність споруд закритого ґрунту через застосування відновлюваних джерел енергії.

*Основна частина.* Об'єктом дослідження є споруди закритого ґрунту. Вони обладнані полицями, як зображено на рис. 1. Полиці дають змогу збільшити площу для висівання на розсади.

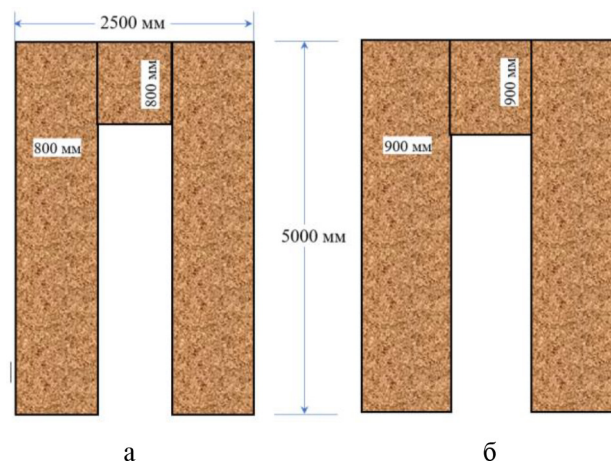


Рис. 1. Схема площі під розсаду (а) на полицях та (б) на ґрунті

Якщо розрахувати *корисну площу* під вирощування розсади, то вона буде становити приблизно 19 м<sup>2</sup>.

Посів насіння на розсаду відбувається переважно в кінці лютого. На основі архівних даних Українського гідрометцентру проаналізовано значення температур зовнішнього середовища в березні й квітні у 2019–2021 роках [8]. З графіка рис. 2 та рис. 3 можна побачити, що середня температура вдень була близько +10 °С, а вночі заморозки до –4 °С.

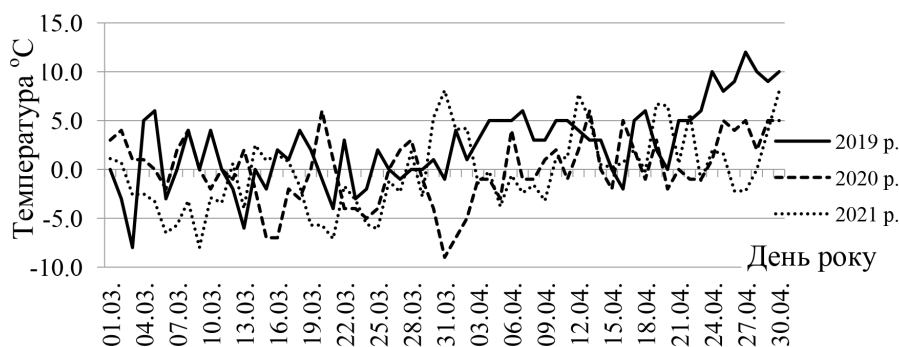


Рис. 2. Графік мінімальної температури впродовж доби

Вищенаведені дані є вхідними параметрами для обчислення теплового балансу споруди.

#### *Система енергопостачання теплиці*

Призначення системи – підігрів повітря в середині теплиці в холодний період доби, з використанням геотермального джерела та енергії променів сонця для заряджання акумуляторної батареї у світлий період.

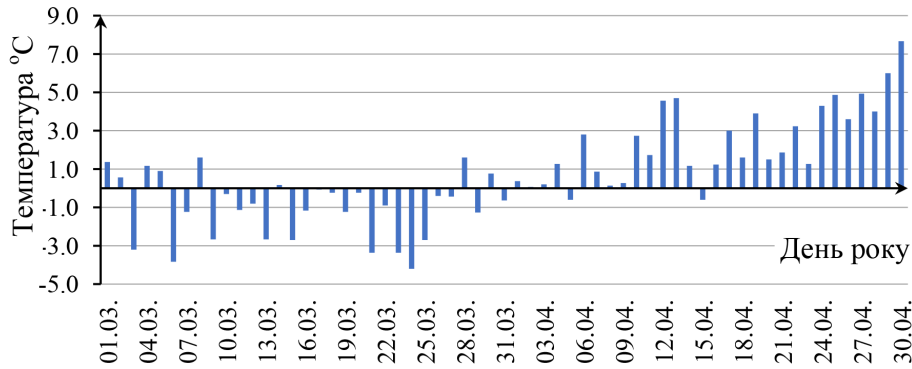


Рис. 3. Графік середньої мінімальної температури впродовж доби

Основні характеристики системи: автономність у роботі, стабільність температури в споруді в зимово-весняний період приблизно  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Система енергопостачання теплиці схематично зображена на рис. 4. Вона налічує: фотоелектричний модуль, контролер заряду АКБ, саму акумуляторну батарею, регулятор температури, витяжний вентилятор, колодязь завглибшки 8–9 м, трубопровід з утепленням.

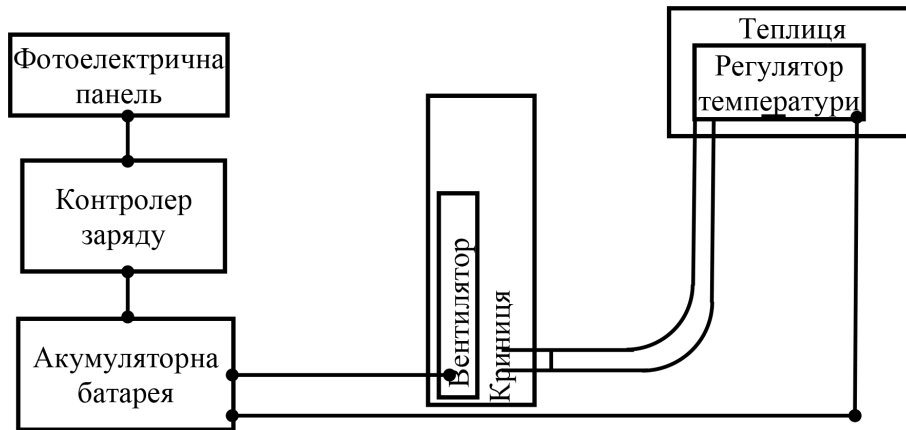


Рис. 4. Схема теплопостачання теплиці

Ми дослідили, що на глибині 6–7 м температура над водою становить  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тоді як температура зовнішнього середовища  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Змонтувавши утеплений трубопровід колодязя на 5 метрів до споруди та скомпонувавши її системою постійної температури, можна підтримувати плюсову температуру без окремих джерел енергії.

#### *Принцип роботи*

Найперше налаштовують регулятор температури на змикання контактів тоді коли температура  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тоді вмикається вентилятор, який подає тепле повітря в споруду.

Коли внутрішнє повітря досягне в теплиці до  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , регулятор від'єднує вентилятор. Фотоелектрична панель з контролером за день заряджає акумуляторну батарею, яка дає безперервну роботу системи на період близько 15–17 годин.

Об'єктом випробувань вибрано споруду закритого ґрунту з обігрівом геотермальними джерелами енергії. Для визначення теплових втрат та надходжень у різних ділянках теплиці. Схема зображена на рис. 5.

Дослідження показали, що в криниці переважно стала температура повітряного прошарку, з якого тепло надходить утепленим трубопроводом за допомогою вентилятора всередину споруди. Для того щоб система енергопостачання працювала ефективно, ми пропонуємо рецир-

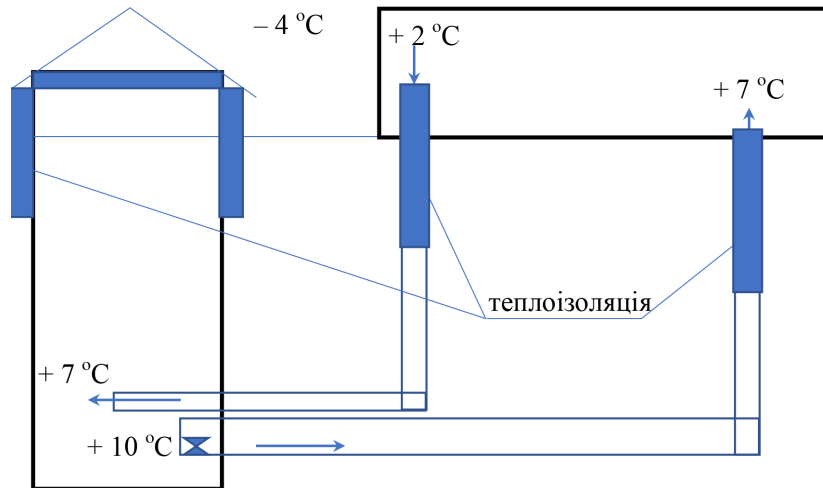


Рис. 5. Схема теплових втрат та надходжень

куляцію повітря за допомогою витяжного вентилятора й ще одного утепленого трубопроводу. Тобто в криницю зі споруди буде надходити підігріте повітря. Для споруд захищеного ґрунту нормові витрати теплової енергії визначаються умовами зовнішнього навколишнього середовища: температурою та відносною вологістю, кількістю сонячної енергії, швидкістю вітру та кількістю опадів. Вищенаведені фактори залежні одне від одного.

*Знаходження конструктивних параметрів теплиці*

Досліджено: довжина споруди  $L$  приблизно 5 м., ширина  $B$  – 2,5 м, її висота  $H$  до дуги – 1,1 м, радіус дуги приблизно становить 1,25 м.

Отже:

Площа  $S_1$  частини теплиці буде рівною:

$$S_1 = (L \cdot H) \cdot 2 + (B \cdot H) \cdot 2; \quad (1)$$

$$S_1 = (5 \cdot 1,1) \cdot 2 + (2,5 \cdot 1,1) \cdot 2 = 16,4 \text{ м}^2.$$

Площа  $S_2$  верхньої частини:

$$S_2 = L \cdot \pi \cdot R; \quad (2)$$

$$S_2 = 5 \cdot 3,14 \cdot 1,2 = 19,5 \text{ м}^2.$$

Далі знайдемо площу сторін  $S_3$  теплиці, які описують двома арками:

$$S_3 = \pi \cdot R^2; \quad (3)$$

$$S_3 = 3,14 \cdot 1,25^2 = 5 \text{ м}^2.$$

Так, загальна площа конструкції становитиме:

$$S = S_1 + S_2 + S_3; \quad (4)$$

$$S = 16,5 + 19,5 + 5 \approx 41 \text{ м}^2.$$

Цей параметр є головним для знаходження параметрів для системи енергопостачання споруди, *втрати теплоти* через огороження теплиці.

*Визначення теплового балансу теплиці*

Під час вирощування розсади, яка має висоту менш ніж 0,35 м перед висаджуванням у відкритий ґрунт, немає потреби обігрівати повний об'єм висотою 3,5 м. Достатньо обігрівати тільки робочий нижній об'єм від 0 до 1,5 м, відділивши його від загального малогабаритними покриттям. Так, обігрів дає змогу мінімізувати витрату тепла та питому теплову потужність нагрівального обладнання.

Тепловий баланс споруди дасть змогу визначити величину втрат тепла і необхідну потужність теплоти для одержання заданих умов, у цьому разі найголовнішим параметром є тепло. Як було згадано, допустима температура в споруді  $t_s$  для проростання розсади має бути не менш ніж  $+1-2$  °С. Проаналізувавши мінімальні значення температур повітря в березні та квітні впродовж 2019–2021 років, робимо висновок про те, що мінімальною температурою була  $t_3$ ,  $-4$  °С.

Обчислимо *тепловтрати* через огороження.

$$Q_{oz} = k_m \cdot S(t_s - t_3) \text{ кВт}, \quad (5)$$

де  $k_m$  – коефіцієнт теплопередачі, для стільникового полікарбонату товщиною 10 мм, становить  $2,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ ;  $S$  – площа поверхні огороження,  $\text{м}^2$ .

$$Q_{oz} = 2,3 \cdot 41 (1 - (-4)) = 470 \text{ Вт}$$

Розраховуємо потрібний об'єм  $V_p$  теплого повітря, який буде надходити від вентилятора через трубопровід, утеплений з криниці у споруду, щоб компенсувати  $0,47 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ .

Досліджено, що за температури повітря зовнішнього навколишнього середовища на ґрунті  $-4$  °С в криниці на глибині 7 м температура повітря буде  $+10$  °С.

Питома теплоємність повітря  $C$   $1 \text{ Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$  становить  $0,43 \text{ Дж}$ , а  $1 \text{ Вт} = 1,16 \text{ ккал}$ . Тобто потрібний об'єм повітря  $V_p$  для нагрівання теплиці розраховується з виразу.

$$471 \text{ Вт} = 546 \text{ ккал} = 229 \text{ Дж або } 229 \text{ м}^3 \text{ повітря.}$$

Це дає змогу для знаходження параметрів вентилятора.

*Вибір вентилятора.* Знайшовши об'єм повітря, добираємо припливну установку потрібної потужності. При цьому необхідно враховувати падіння продуктивності вентилятора в повітропроводі.

На сьогодні в ринку промислової та комерційної вентиляції представлено достатній добір обладнання. Здійснивши аналіз за ціною, технічними характеристиками, вибрано малогабаритний вентилятор з постійним струмом  $0,7 \text{ А}$  розмірами  $120 \times 120 \text{ мм}$  потужністю  $5 \text{ Вт}$ , швидкістю обертання  $2,7 \text{ тис об/хв}$ . Напряга живлення  $12 \text{ В}$  за  $230 \text{ м}^3/\text{год}$ . Графік продуктивності див. на рис. 6 [9].

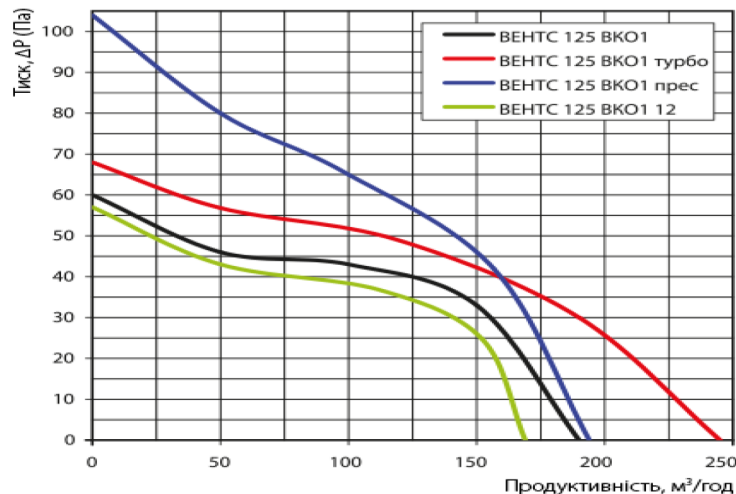


Рис. 6. Залежність продуктивності вентилятора

Із широкого ринку комерційної та промислової вентиляції обрано вентилятор Vents, 125 ВКО1 turbo.

*Знаходження ємності акумуляторної батареї*

Розділивши потужність навантаження, що виражена у Вт, на напругу акумулятора  $U$  12 В, отримаємо струм  $I$ , в А, споживання приладу, за годину.

$$I = P/U \text{ А.} \quad (6)$$

Добуток струму на необхідний період безперервної роботи акумулятора дасть його ємність  $E$ .

$$E = I \cdot t \text{ А} \cdot \text{год.} \quad (7)$$

Наприклад: вентилятор споживаною потужністю 5 Вт, період його роботи приблизно з 00:00 год, до 09:00 год, становитиме 9 годин. Тобто:

$$I = 5/12 = 0,4 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Це струм споживання вентилятором від АКБ впродовж 1 години. Помноживши струм на період роботи від акумулятора.

$$E = 0,42 \cdot 9 = 3,7 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Для того щоб подовжити термін служби акумулятора, наприклад, до десяти років, нам необхідно, щоб ступінь регулярного розряду був меншим. Глибина розряду не має бути більш ніж 30 % від номінальної. Оскільки акумулятори працюватимуть у холодну пору року, то глибина розряду знижується до 80 % ємності. У цьому разі:

$$E_{\text{АКБ}} = 3,77/0.3 \cdot 0.8 = 15,75 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Характеристика потрібна для розрахунку й вибору сонячної фотоелектричної панелі.

*Розрахунок сонячної фотоелектричної панелі*

Наприклад використовуватимемо сонячний фотоелектричний елемент з характеристиками:

Таблиця 1

Характеристики фотоелектричного елемента

Тип	монокристалічний
Потужність	4.3 Вт
Напруга	0.611 В
Робоча напруга	$U_{ce} = 0.5 \text{ В}$
Робочий струм	$I_{ce} = 8 \text{ А}$
Струм короткого замикання	8.4 А
Фізичні характеристики	
Габарити	156 × 156 мм

Через фотоелектричний модуль відбувається заряджання акумуляторної батареї. Щоб зарядити акумулятор упродовж світлого періоду дня, необхідно одержати на виході фотоелектричної панелі відповідний струм. Струм заряду акумулятора вибирають 10–17 % від його ємності.

$$I_{\text{зар}} = E_{\text{акб}} \cdot 0.17 = 3 \text{ А, напруга} \cdot U_{\text{зар}} = 12 \text{ В.}$$

Таблиця 2

Середні значення інсоляції сонця в Україні

Місяць року	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
кВт · год/м <sup>2</sup>	1,2	1,9	2,8	3,9	5,2	5,3	5,5	5,4	3,8	2,1	1,3	1,1

Потужність сонячної фотоелектричної установки залежатиме від добового надходження сонячної радіації та її сумарної площі і  $n_{\text{ФЕЛ}}$  – коефіцієнта корисної дії фотоелектричного модуля.



Для розрахунку добової електроенергії виробленої установкою використаємо математичний вираз:

$$P_{\text{ФЕП доб.}} = E \times S \times N_{\text{ФЕП}} \times n_{\text{ФЕП}} \times n_{\text{ТЕП}}; \quad (8)$$

$$P_{\text{ФЕП доб.}} = 1900 \times 0.024336 \times 8 \times 0.17 \times 1 = 65 \text{ Вт} \times \text{год},$$

де  $P_{\text{ФЕП доб.}}$  – енергія вироблена системою, Вт × год у день;

$E$  – середньомісячна радіація, Вт × год/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа фото елемента, м<sup>2</sup>;

$N_{\text{ФЕП}}$  – кількість фотоелектричних елементів;

$n_{\text{ФЕП}}$  – коефіцієнт корисної дії фотоелектричних елементів;

$n_{\text{ТЕП}}$  – тепловий коефіцієнт фото модуля, який враховує втрати під час нагрівання фотоелектричної панелі в сонячний період, приблизно рівний 85–100 %.

З наступного виразу визначаємо необхідну кількість фотоелектричних перетворювачів, округливши їх до більшого значення:

$$N_{\text{ФЕП}} = P_{\text{ФЕП}} / E \times S \times n_{\text{ФЕП}} \times n_{\text{ТЕП}}, \quad (9)$$

де  $P_{\text{ФЕП}} = P_{\text{ФЕП доб.}} \cdot 1.2$  – потужність, яка споживається системою та враховує втрати на заряджання-розряджання акумулятора приблизно рівний 20 %, Вт × год / добу.

Використавши дані з таблиці сонячної інсоляції, наприклад, обравши місяць з мінімальною сонячною радіацією, знайдемо кількість елементів:

$$N_{\text{ФЕП}} = 54/1900 \times 0.02436 \times 0.17 \times 1 = 7,9 \approx 8 \text{ ел.}$$

*Добір контролера заряду.* На виході із сонячної фотоелектричної панелі струм 8А і напруга 12 В. Для цього підійде контролер типу PWM зі струмом 10 А та напругою 12 В, температурою – 30–60 °С

*Система енергопостачання теплиці з використанням відновлюваних джерел енергії* призначена для підігріву повітря всередині споруди приблизно від 00:00 до 08:00 год завдяки теплу геотермальних джерел і енергії сонця для заряджання акумулятора у світлий період доби.

*Склад системи:*

Сонячна фотоелектрична панель – KV 65Вт/12В; контролер заряду – 10А/12В; акумулятор – 12В/16А × год; регулятор температури РТ-0102; датчик температури РТ-100; вентилятор 5Вт; криниця глибиною 8 м; утеплений трубопровід.

Досліджено, що на глибині 6–7 м температура повітря над поверхнею води приблизно +10 °С за температури над поверхнею ґрунту – 5 °С [7].

Провівши утеплений канал з глибини колодязя всередину теплиці й облаштувавши її системою постійної температури, забезпечуємо додатну температуру в споруді.

*Висновки.* На цьому етапі розвитку виняткову увагу необхідно приділити підвищенню енергопостачання в споруді закритого ґрунту. Необхідно особливо звернути увагу на застосування відновлюваних джерел енергії.

Найперше для знаходження параметрів запропонованої нами системи підвищення ефективності енергопостачання потрібно вивчити період застосування теплиці, вимоги щодо вирощування овочів і габаритні розміри огорожувальної конструкції.

Це дасть змогу безпомилково обрати складники системи підвищення енергопостачання теплиці завдяки використанню відновлюваних джерел енергії та знайти її параметри: потужність вентилятора, тепловий баланс, підібрати акумулятор і знайти параметри сонячної фотоелектричної панелі.

*Список використаних джерел*

1. Іваненко В. Ф. Особливості формування енерговитрат на виробництво продукції овочівництва закритого ґрунту. *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. Гжицького*. 2011. № 2(48). С. 71–78.
2. Мартиненко І. І. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. Київ : Урожай, 1995. 224 с.
3. Статистичні нотатки. Аграрний сектор. *Державна служба статистики України*. 2018. URL: [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua) (дата звернення: 25.09.2020).
4. Тиравський В. Парниковый эффект. *Статус*. 2011. № 22(192). URL: <http://statuspress.com.ua/nisha/parnikovuj-effekt-2.html> (дата обращения: 25.09.2020).
5. Гіль Л. С. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Ч. 1. Закритий ґрунт. Навчальний посібник / Л. С. Гіль, А. І. Пашковський, Л. Т. Суліма. Вінниця : Нова Книга. 2008. 368 с.
6. Іваненко П. П., Прісіпка О. В.. Закритий ґрунт : навч. посібник для вищ. агр.. зал. освіти II–IV рівнів акрид. Київ, Урожай, 2001. 360 с.
7. Технологічні процеси галузей промисловості : навч. посібник / Д. М. Колотило, А. Т. Соколовський, С. В. Гарбуз; За наук. ред. Д. М. Колотила, А. Т. Соколовського. Київ : КНЕУ, 2003. 380 с.
8. Архівні дані «Українського гідрометеорологічного центру». URL: <https://meteo.gov.ua/ua/33393/services/> (дата звернення: 30.04.2021).
9. Вентиляційні системи Вентс. URL: <https://vents.ua/ua/modification/vents-125-vko1-turbo-220-60#characteristic> (дата звернення: 25.09.2020).
10. de Almeida, A., Quaresma, N. & Biosse, E. (2022). The role of energy efficiency and renewable energies to accelerate sustainable energy access – a perspective case study of Mozambique. *Energy Efficiency* 15, 36. URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10045-w>
11. Wciślik, S., Kotrys-Działak, D. (2021). Thermal building upgrade with off-grid PV system: a Polish case. *Energy Efficiency* 14, 70 URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09980-x>
12. García-López, M., Montano, B. & Melgarejo, J. (2023) Household energy consumption and the financial feasibility of self-consumption through photovoltaic panels in Spain. *Energy Efficiency* 16, 57. URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10139-z>
13. Mahjoob Karambasti, B., Ghodrati, M., Naghashadegan, M. et al. (2022) Optimum design of a greenhouse for efficient use of solar radiation using a multi-objective genetic algorithm. *Energy Efficiency* 15, 66. URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-022-10073-6>
14. de Almeida, A., Moura, P. & Quaresma, N. (2020) Energy-efficient off-grid systems-review. *Energy Efficiency* 13, 349–376. URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09813-y>
15. Barbato, A., Capone, A., Carello, G. et al. (2014) A framework for home energy management and its experimental validation. *Energy Efficiency* 7, 1013–1052. URL: <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9269-3>
16. Ноуе MDJ, Ahmed MR, Hannan S (2020) Автоматизована система моніторингу та управління теплицею за допомогою датчиків і сонячної енергії. *Eur J Eng Res Sci* 5(4):510–515. URL: <http://doi.org/10.24018/ejers.2020.5.4.1887>
17. Selmani MO, El Khayat M, Guerbaoui M, Ed-Dahhak A, Lachhab A, Bouchihi B (2019) До автономних теплиць на сонячній енергії. *Procedia Comput Sci* 148:495–501. ISSN 1877-0509
18. Aakanksha A, Anand C, Shameem Akhter S, Nikitha S, Pavan Kumar N (2021) Розумна автоматизація теплиць за допомогою сонячної енергії. *IJCRT* 9(6). ISSN: 2320-2882

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025

Стаття прийнята 01.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**R. Krygul<sup>1</sup>, S. Shapoval<sup>2</sup>, S. Syrotyuk<sup>1</sup>, M. Kasynets<sup>2</sup>, T. Stanytskyi<sup>1</sup>, I. Dudko<sup>1</sup>**  
**<sup>1</sup> Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv**  
**<sup>2</sup> Lviv Polytechnic National University**

## **GREENHOUSE POWER SUPPLY SYSTEM USING RENEWABLE ENERGY SOURCES**

### *Summary*

Today, task developing alternative energy sources is extremely relevant. Traditional resources are quite expensive and affect the development of the state. This forces us to look for new ways to obtain energy. An important factor in increasing productivity and improving working conditions, increasing quality and expanding the range of products is the automation of technological processes. The work presents system for increasing the energy efficiency of a greenhouse through the use of renewable energy sources. The necessary calculations are presented. To determine the technical parameters of the system we have proposed for increasing the efficiency of energy supply of a closed ground structure using renewable energy sources, it is necessary to know the period of use of the greenhouse, requirements for growing seedlings, the area of the enclosing structure. This in turn makes it possible to find the following parameters: heat balance, select a thermal fan, select a battery, and find the technical parameters of the photovoltaic panel.

**Keywords:** greenhouse, photovoltaic panel, sun, well, battery.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-23>

УДК 662.613:621.311.22:620.92:330.43

Ю. В. Маслов, технік

ORCID: 0009-0009-3060-2575

*Департамент інженерії надійності та технічного обслуговування*

e-mail: maslov.yuriy@gmail.com

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЦТВА «ЗЕЛЕНОГО» АМІАКУ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОЛІЗНОГО ВОДНЮ: ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕТРОФІТУ ЗАВОДІВ У ДІЇ

*Анотація.* У роботі узагальнено техніко-економічне моделювання ретрофіту аміачного виробництва із «сірого» на «зелене» на основі електролізного водню. Збережено ключові підсистеми підприємств, зокрема контур Габера-Боша, замінено секцію риформінгу на електролізну. Система містить сонячні та вітрові установки, акумулятори, сховища енергії і водню. Досліджено острівну конфігурацію з автономним живленням, оптимізовано потужності й режими роботи з урахуванням локальних ресурсів. Аналіз проведено для чотирьох українських підприємств у трьох сценаріях: сірому, сонячному й вітровому. Установлено, що ключовими чинниками вартості є ціна електроенергії, ефективність електролізерів, довговічність обладнання та обсяги накопичення енергії. Вітрова генерація в сприятливих умовах може досягати рівня витрат традиційного виробництва. Отримані результати окреслюють практичні передумови переходу до зеленого аміаку та підґрунтя для подальшої оптимізації технологічних і фінансових параметрів.

*Ключові слова:* потужність, контур Габера-Боша, конфігурація, CAPEX, ціна електроенергії, нормована вартість.

*Постановка проблеми.* Виробництво аміаку є однією з базових галузей хімічної промисловості, адже саме цей продукт лежить в основі виробництва мінеральних добрив і багатьох хімічних сполук. Традиційна технологія, заснована на паровому риформінгу метану, характеризується значними енергетичними витратами та високими викидами парникових газів, що стає критичним за умов посилення вимог до декарбонізації промисловості. У сучасних енергетичних умовах актуальним напрямом є заміна вуглецевих джерел водню на електролізні системи, що використовують енергію відновлюваних джерел. Водночас економічна доцільність такого переходу потребує обґрунтованої оцінки, оскільки вартість обладнання, електроенергії та систем зберігання може суттєво впливати на кінцеву собівартість аміаку. У цьому контексті техніко-економічне моделювання дає змогу визначити оптимальну конфігурацію систем, порівняти сценарії «сірого» й «зеленого» виробництва та оцінити ефективність ретрофіту заводів з урахуванням регіональних потенціалів сонячної та вітрової енергетики.

*Аналіз останніх досліджень.* У науковому просторі сьогодення представлено значну кількість досліджень, присвячених декарбонізації виробництва аміаку шляхом поєднання техніко-економічного моделювання ретрофіту дійсних потужностей, оптимізації конфігурацій відновлюваної генерації та електролізерів, аналізу життєвого циклу й сценарного оцінювання вартості електроенергії та вуглецевих платежів. Так, А. Ізелла, Р. Остуні та Д. Манка [1] виконали техніко-економічну оцінку гібридних альтернатив для декарбонізації синтезу аміаку через ретрофіт сірого заводу із частковим поданням зеленого водню, що виробляється електролізом. Розглянуто дві конфігурації живлення електролізера: зовнішня чиста електрика з ВДЕ та власна фотоелектрична станція. Порівняно базовий сірий сценарій і дві гібридні схеми з оцінкою витрат на аміак і скорочення викидів. Показано, що близько 10 % частки зеленої енергії



може підтримувати собівартість виробництва на конкурентному рівні. Для першого півріччя 2023 надбавка до собівартості за зовнішньої електрики становила приблизно від +4,3 % до +11 %, тоді як за власної ФЕС – від – 1,4 % до +4,9 %. Перевага власної генерації пов'язана з уникненням мережових тарифів і кращим узгодженням профілю навантаження. Відзначено чутливість результатів до ціни електроенергії ефективності електролізера та параметрів зберігання й потребу у валідації на натурних кейсах.

С. Вінарделл, П. Ніколас, А. Састре, Дж. Кортіна та С. Вальдеррама [2] зосередилися на порівнянні базового сценарію виробництва сірого аміаку з трьома «зеленими» конфігураціями на основі сонячної, вітрової та комбінованої генерації для умов Іспанії. Виконано комплексну оцінку стабільності з поєднанням техніко-економічних показників і LCA (Life Cycle Assessment – оцінка робочого циклу). Показано істотне зниження впливів на зміну клімату та виснаження копалин порівняно із сірим варіантом, водночас зростають навантаження за землекористуванням, дефіцитом мінеральних ресурсів, прісноводною евтрофікацією і кислотністю. суходолу. За помірних цін на газ і вуглець економічно переважає сірий аміак, однак за високих цін та розширеної торгівлі викидами «зелені» сценарії стають конкурентоспроможними. Наголошено на важливості узгодження з інфраструктурними параметрами та ланцюгами транспортування.

Д. Сайгін, Х. Бланко з колегами [3] зосереджені на системній техніко-економічній оцінці виробництва аміаку із чистого водню з порівнянням зелених маршрутів на електролізі та блакитних з уловлюванням CO<sub>2</sub>. Показано роль аміаку як енергоносія і вплив вибору технології на глобальний попит на природний газ. Наведено, що нинішнє виробництво близько 183 млн т NH<sub>3</sub> споживає орієнтовно 4 % світового газу, тоді як у сценаріях досягнення 1,5 градуса попит на аміак може зрости в 3–4 рази до 2050 року. Результати підкреслюють залежність витрат і викидів до вартості електроенергії, ККД електролізерів, параметрів CCS, оптимізації розмірів та стандартів сертифікації вуглецевого сліду.

Техніко-економічну конфігурацію ланцюга «відновлювана електроенергія – аміак» як ретрофіт дійсних потужностей «вугілля – аміак» аналізують Л. Пан, Дж. Лі, Дж. Хуан та ін. [4]. Запропоновано оптимізацію розмірів сонячних і вітрових електростанцій, електролізерів та буферних сховищ водню для мінімізації рівня собівартості аміаку (LCOA – levelized cost of ammonia). На кейсі Внутрішньої Монголії відтворено промислові обсяги випуску близько 7–11 тис. т на місяць за умови узгодженого добору потужностей, а орієнтовний рівень собівартості становить близько 469 доларів США за тонну що нижче за ринкові орієнтири 605–650 доларів США за тонну. Переважна частка інвестицій припадає на вітрові електростанції приблизно 58 % що визначає капіталомісткість схеми. Паритет витрат із варіантом на вугіллі досягається за вуглецевого платежу близько 47,1 долара США за тонну CO<sub>2</sub>. Чутливість результатів зумовлена вартістю електроенергії, ціною та ККД електролізерів українського виробництва і фінансовими параметрами кредитування.

Однак незважаючи на значну кількість наукових досліджень, питання ефективності ретрофіту заводів для виробництва «зеленого» аміаку залишається відкритим.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є техніко-економічне моделювання переобладнання аміачних підприємств із технології парового риформінгу метану на виробництво «зеленого» аміаку на основі електролізного водню з урахуванням регіональних особливостей відновлюваних джерел енергії. Завдання дослідження: побудувати модель енергетичного балансу електролізної системи, визначити вплив структури потужностей сонячних і вітрових станцій на собівартість водню, оцінити питомі витрати електроенергії та капітальні й експлуатаційні складники, порівняти сценарії для чотирьох основних українських майданчиків, а також встановити межі економічного паритету між «сірим» і «зеленим» виробництвом аміаку.



*Основна частина.* Техніко-економічне моделювання ретрофіту аміачного виробництва із «сірого» на «зелене» базується на принципі збереження основних технологічних підсистем, що не залежать від способу одержання водню. Такий підхід дає змогу мінімізувати капітальні витрати на перебудову виробничого майданчика, в інфраструктурі зберігаються блок повітроподілення (ASU – Air Separation Unit), контур синтезу аміаку Габера-Боша та криогенна система зберігання аміаку. Заміни зазнає лише секція парового риформінгу метану (SMR – Steam Methane Reforming), яка повністю виключається з технологічного ланцюга, впроваджуючи замість неї електролізну водневу систему (EHPS – Electrolytic Hydrogen Production System) [5].

Система EHPS містить п'ять основних блоків: сонячні електростанції (далі – СЕС), вітрові електростанції (далі – ВЕС), електролізери для виробництва водню, акумуляторна система накопичення енергії (ACHE – Battery energy storage system – BESS), компресори високого тиску та резервуари для зберігання  $H_2$ . Вироблений водень подається до контуру синтезу аміаку за сталого дебіту, що відповідає потребам процесу Габера-Боша. Конфігурація елементів вибирається з урахуванням регіонального профілю відновлюваної генерації та доступності мережевого резерву.

$$\min LCOH = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{C_{capex}(t) + C_{opex}(t)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{m_{H_2}(t)}{(1+r)^t}}, \quad (1)$$

де  $C_{capex}$  – капітальні витрати (CApital EXpenses) на СЕС або ВЕС, електролізери, компресори, акумулятори та сховища,  $C_{opex}$  – експлуатаційні та технічні витрати (OPerating EXpenses),  $m_{H_2}$  – маса виробленого водню на рік  $t$ ,  $T$  – термін служби обладнання СЕС за 25 років та ВЕС за 20 років,  $r$  – ставка дисконтування [6].

У подальших розрахунках приймається острівна конфігурація (off-grid): EHPS функціонує повністю ізольовано та автономно від мережі, на основі генерації відновлюваних джерел енергії. Така конфігурація зумовлює потребу в значних площах розміщення генерувальних установок і достатніх обсягах електричних та водневих сховищ для згладжування часових флуктуацій виробітку.

Щоб мінімізувати LCOH (Levelized Cost of Hydrogen нормована вартість виробництва водню) і забезпечити стале подання водню, модель оптимізує як установлені потужності підсистем (сонячні панелі, вітрогенератори, електролізери, АСНЕ, компресія та зберігання  $H_2$ ), так і погодинний оперативний режим, який у кожний момент визначає розподіл доступної потужності між ВДЕ та АСНЕ:

$$P_{CEC}(t) + P_{BEC}(t) = P_{ELZ}(t) + P_{COMP}(t) + P_{aux}(t) + P_{ACHE}(t) + P_{loss}(t), \quad (2)$$

де  $P_{CEC}$ ,  $P_{BEC}(t)$  – миттєва генерація від СЕС і ВЕС,  $P_{ELZ}(t)$  – споживання електроенергії електролізерами,  $P_{COMP}$  – електрична потужність компресорів  $H_2$  (стискання до тиску зберігання / подання),  $P_{ACHE}$  – заряд ( $P_{ACHE} > 0$ ) і розряд батарей ( $P_{ACHE} < 0$ ),  $P_{aux}$  – інші допоміжні навантаження (АСУ, охолодження тощо),  $P_{loss}$  – втрати у перетворювачах, трансформаторах і лініях.

У межах моделювання розглядається сценарій ретрофіту аміачних підприємств, що базуються на технології парового риформінгу метану. Базовою аналітичною основою є 4 великі виробничі майданчики – ПрАТ «Азот» (Черкаси) [7], ПрАТ «Рівнеазот» [8], ПАТ «Дніпроазот» [9] і АТ «Одеський припортовий завод» (ОПЗ) [10], для яких змодельовано заміну SMR-модуля на електролізну водневу систему. Такий підхід дає змогу порівняти техніко-економічну ефективність переходу до електролізного водню в різних регіональних умовах, враховуючи локальну вартість електроенергії та потенціал ВДЕ.

Таблиця 1

## Виробництво аміаку на рік промисловими майданчиками

Промисловий майданчик	Потужність виробництва аміаку на рік
ПрАТ «Азот» (Черкаси)	962 тис. т
ПрАТ «Рівнеазот»	420 тис. т
ПАТ «Дніпроазот»	450 тис. т
АТ «Одеський припортовий завод»	900 тис. т

\* Джерело: Власна розробка автора

У традиційному виробництві аміаку найбільшу частку змінних витрат становить закупівля метану, який одночасно використовується як вихідна сировина для отримання водню та як паливо для теплових стадій процесу при цьому для сучасних установок питоми витрати природного газу зазвичай оцінюються на рівні близько 28–33 ГДж на тонну  $\text{NH}_3$  що відповідає приблизно 0,8–0,95 тис.  $\text{m}^3$   $\text{CH}_4$  на тонну, тоді як на менш ефективних лініях цей показник може наближатися до близько 1,1 тис.  $\text{m}^3$  на тонну, кінцева собівартість сірого аміаку через це істотно залежить від ціни газу [11]. Так, котирувальні ціни на природний газ за листопад 2025 року становили 20 050,00 грн за тис. куб. м [12].

Якщо в «сірій» схемі ключовим визначальним фактором собівартості є природний газ, то в «зеленій» вирішальним стає обсяг і ціна електричної енергії. Питома електроємність виробництва  $\text{NH}_3$  в комплексних схемах «електроліз водню → контур Габера-Боша» визначається насамперед роботою електролізера та з допоміжними вузлами становить  $\sim 7\text{--}10$  кВт·год/кг  $\text{NH}_3$ , за промислово реалістичних параметрів [13]. Тобто виробництво «зеленого» аміаку в тих самих обсягах вимагатиме приблизно:

Таблиця 2

## Вимоги щодо енергії на рік для виробництва «зеленого аміаку»

Промисловий майданчик	Модульовані вимоги щодо енергії на рік
ПрАТ «Азот» (Черкаси)	9,62 ТВт · год
ПрАТ «Рівнеазот»	4,20 ТВт · год
ПАТ «Дніпроазот»	4,5 ТВт · год
АТ «Одеський припортовий завод»	9 ТВт · год

\* Джерело: Власна розробка автора

Для моделювання енергетичного балансу електролізної водневої системи (EHPS) доцільно враховувати усереднені регіональні характеристики відновлюваних джерел енергії, що визначають потужність генерувальних блоків та вартісні показники системи. Сонячна електростанція з установленою потужністю 10 МВт по стороні змінного струму та 12,5 МВт по стороні постійного струму забезпечує близько 10,92–11,57 ГВт·год виробітку на рік. Інвестиційні CAPEX в саму СЕС становлять близько 10,06 млн доларів США [14].

Вітрова станція на чотири агрегати у випадку з карпатським майданчиком дає близько 76,6 ГВт · год на рік у варіанті з турбінами Enercon E – 175 EP5 і близько 91,93 ГВт · год на рік у варіанті з Vestas V136–4.5 MW, при цьому орієнтовні CAPEX становлять близько 25,02 млн євро для комплектації з Enercon та близько 29,71 млн євро для комплектації з Vestas [15].

Як видно з рисунку 1, максимальна ефективність СЕС досягається в Одеській області, тоді як у Рівненській вона найменша із чотирьох майданчиків.

Вітер же приблизно однаковий для всіх чотирьох виробничих майданчиків.

Таблиця 3 узагальнює річні витрати на виробництво  $\text{NH}_3$  для чотирьох майданчиків у трьох сценаріях: «сірій» та «зеленій» із живленням від ВЕС і СЕС. Для «сірого» варіанта розраху-

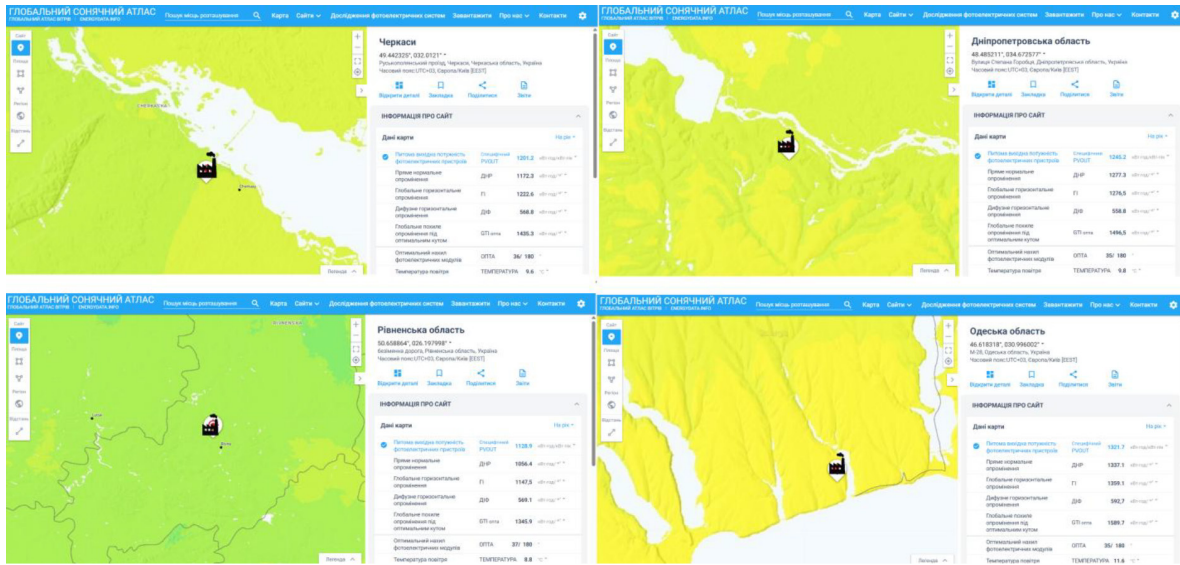


Рис. 1. Сонячний атлас [16]

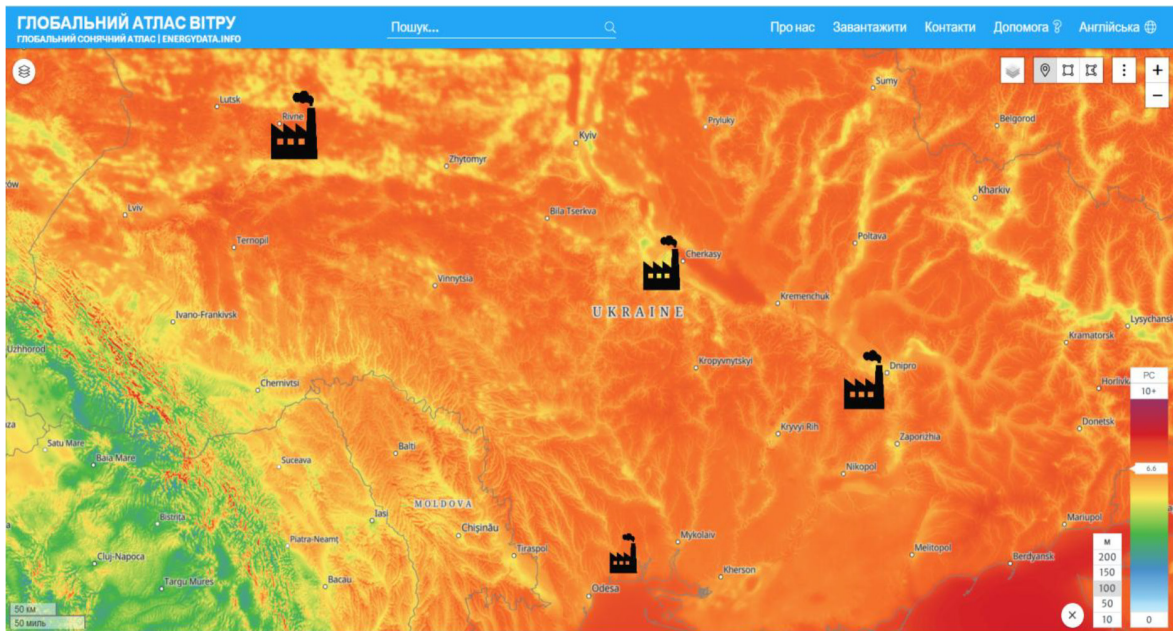


Рис. 2. Атлас Вітру [16]

нок виконано за питомим споживанням природного газу та його ринковими цінами з урахуванням експлуатаційних витрат. Для «зеленого» використано показник LCOE (Levelized Cost of Energy – нормована вартість електроенергії), який відображає повну приведену собівартість виробництва 1 МВт · год енергії за весь термін служби установки.

$$LCOE = \frac{FCR \cdot CAPEX + FOM}{CF \cdot 8760} + VOM + FUEL - PTC, \quad (3)$$

де  $FCR$  – фіксована річна ставка покриття капіталу (Fixed Capital Recovery Rate),  $FOM$  – фіксовані витрати обслуговування (Fixed Operation and Maintenance costs),  $CF$  – коефіцієнт використання потужності (Capacity Factor),  $VOM$  – змінні витрати обслуговування (Variable Operation and Maintenance costs),  $FUEL$  – паливо,  $PTC$  – виробничий податковий кредит (Production Tax Credit). Для BEC / CEC зазвичай  $FUEL = 0$ , а  $PTC$  застосовується лише в юрисдикціях із відповідними пільгами (в Україні зазвичай  $PTC = 0$ ).



Результати моделювання витрат для покриття електроенергії необхідної на виробництво зеленого аміаку (Табл. 2) відповідно до виробничих потужностей заводів (Табл. 1), а також порівняльний приклад нинішніх приблизних витрат при виробництві сірого аміаку подано в таблиці 3.

Показані в таблиці річні витрати слід інтерпретувати з урахуванням трьох чинників. По-перше, собівартість «сірого»  $\text{NH}_3$  значно залежить від ціни газу, за типової норми 28–33 ГДж на тонну зміни паливного індикатора прямо транслуються в євро на тонну продукції.

По-друге, для «зелених» сценаріїв застосовано узгоджену з українськими умовами песимістичну оцінку LCOE вітру і сонця з урахуванням CAPEX, у яких капітальні витрати приведено до річного еквіваленту, OPEX, балансувальними та ризиковими надбавками. Базово за технічними параметрами виходить близько 46 €/МВт·год для вітру й близько 73 €/МВт·год для СЕС, у розрахунках же використано «песимістичні» 75 €/МВт·год для вітру і 100 €/МВт·год для СЕС, ці LCOE помножено на питомі 7–10 кВт·год на кілограм  $\text{NH}_3$ . Варто врахувати що навіть базові 46 €/МВт·год для вітру самі по собі не дають паритету із «сірим»  $\text{NH}_3$ , до паритету веде поєднання нижчої ціни електроенергії порядку не вище 35–40 €/МВт·год та електроємності не вище 8 МВт·год на тонну. Також для розрахунків взято гарантований термін служби обладнання, фактичний може перевищити його на 5 та більше років, даючи змогу ще більше зменшити витрати. По-третє, тривалий тренд здешевлення вітроустановок і сонячних панелей знижує їхній LCOE, а отже, і витрати «зеленого»  $\text{NH}_3$  в майбутньому.

Таблиця 3

Річні витрати при використанні повних потужностей виробництва аміаку

Промисловий майданчик	Сірий $\text{NH}_3$ : витрати/рік (М€)	Зелений $\text{NH}_3$ (вітер): витрати/рік (М€)	Зелений $\text{NH}_3$ (сонце): витрати/рік (М€)
ПрАТ «Азот» (Черкаси)	394.4	709.6	914.9
ПрАТ «Рівнеазот»	172.2	310.0	399.0
ПАТ «Дніпроазот»	184.5	332.9	428.8
АТ «Одеський припортовий завод»	369.0	665.2	857.3

\* Джерело: власна розробка автора

Також якщо планується неминуха заміна зношеного SMR, варто порівнювати електролізний варіант з альтернативою на новий SMR і враховувати різницю капітальних та операційних витрат між варіантами. У такому разі сукупні додаткові відносно простої заміни витрати ретрофіту аміачних заводів можуть становити менш ніж 1 % загальної вартості системи.

**Висновки.** У результаті техніко-економічного моделювання встановлено, що перехід від традиційного парового риформінгу метану до електролізного отримання водню для виробництва аміаку потребує суттєвих капітальних вкладень, однак відкриває можливість поступового зменшення експлуатаційних витрат у разі зниження вартості відновлюваної енергії. Проведені розрахунки свідчать, що сонячна генерація нині залишається економічно дорожчим джерелом для «зеленого» аміаку, тоді як вітрова енергія за оптимістичних умов може досягати рівня витрат, близького до «сірого» виробництва. Особливо це стосується сценаріїв із підвищенням цін на природний газ, коли вітровий варіант стає конкурентним навіть без додаткових субсидій. Установлено, що найбільш відчутний вплив на рівневу вартість водню мають ціна електроенергії, ефективність електролізерів і тривалість служби обладнання. Подальше зниження LCOE відновлюваних джерел, удосконалення систем зберігання енергії та підвищення ефективності електролізерів здатні забезпечити економічну доцільність ретрофіту аміачних заводів в Україні та створити підґрунтя для переходу галузі до «зеленого» виробництва.

*Список використаних джерел*

1. Isella A., Ostuni R., Manca D. Towards the decarbonization of ammonia synthesis – A techno-economic assessment of hybrid-green process alternatives. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 486. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150132
2. Vinardell S., Nicolas P., Sastre A. M., Cortina J. L., Valderrama C. Sustainability assessment of green ammonia production to promote industrial decarbonization in Spain. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2023. Vol. 11. No. 44. P. 15975–15983. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c04694
3. Saygin D., Blanco H., Boshell F., Cordonnier J., Rouwenhorst K., Lathwal P., Gielen D. Ammonia production from clean hydrogen and the implications for global natural gas demand. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 2. DOI: 10.3390/su15021623
4. Pan L., Li J., Huang J., An Q., Lin J., Mujeeb A., Xu Y., Li G., Zhou M., Wang J. Renewable-to-ammonia: Configuration strategy and technoeconomic analysis. *iScience*, 2023. Vol. 26. No. 12. DOI: 10.1016/j.isci.2023.108512. PMCID: PMC10755057
5. Mingolla S., Gabrielli P., Manzotti A., Robson M. J., Rouwenhorst K., Ciucci F., Sansavini G., Klemun M. M., Lu Z. Effects of emissions caps on the costs and feasibility of low-carbon hydrogen in the European ammonia industry. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. DOI: 10.1038/s41467-024-3753
6. Rezaei M., Akimov A., Gray E. M. Levelised cost of dynamic green hydrogen production: A case study for Australia's hydrogen hubs. *Applied Energy*. 2024. Vol. 370. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123645
7. Черкаський «Азот» завантажив потужності на 100 %. *ПрАТ «Азот» (м. Черкаси)* : вебсайт. 19 листопада 2021. URL: <https://www.azot.ck.ua/content/articles/1368/> (дата звернення: 21.10.2025).
8. Про виробництво. *ПрАТ «Рівнеазот» OSTCHEM* : вебсайт. URL: <https://www.ostchem.com/uk/o-kompanii/proizvodstvo/rovno> (дата звернення: 23.10.2025).
9. Забезпечення дотримання екологічних вимог ПАТ «Дніпроазот» за рахунок очищення його газових викидів від парів хлору. *Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»* : вебсайт. URL: [https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/other/1719032021/roboti-2021/08\\_absorber-khloru.pdf](https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/other/1719032021/roboti-2021/08_absorber-khloru.pdf) (дата звернення: 21.10.2025).
10. *АТ «Одеський припортовий завод»* : вебсайт. URL: <https://opz.odessa.ua/> (дата звернення: 23.10.2025).
11. Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertiliser production *Paris: International Energy Agency* : website. URL: <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap> (last accessed: 27.10.2025).
12. Українська енергетична біржа. *Біржові котирування: Природний газ. Середньо- та довгостроковий ринок* : вебсайт. URL: <https://www.ueex.com.ua/exchange-quotations/natural-gas/medium-and-long-term-market/> (дата звернення: 22.10.2025).
13. Nami H., Hendriksen P. V., Frandsen H. L. Green ammonia production using current and emerging electrolysis technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 199. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114517
14. Буратинський І. Термін окупності гібридної сонячної електростанції, до складу якої входить установка зберігання електроенергії з різними технічними параметрами. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3(74). С. 42–52. DOI: 10.36296/1819-8058.2023.3(74)42-52
15. Лесько В. О., Покровський К. Б., Ференсович Р. Я. Оцінка ефективності вітрогенераторів в реальних умовах з додатковими експлуатаційними витратами. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. Вип. 6. С. 37–41. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-37-41>
16. *Global Solar Atlas* : website. URL: <https://globalsolaratlas.info/map> (last accessed: 27.10.2025).

Стаття надійшла до редакції 27.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**Yu. Maslov**  
**Reliability and Maintenance Engineering (RME)**

**TECHNO-ECONOMIC MODELLING OF “GREEN” AMMONIA PRODUCTION  
BASED ON ELECTROLYTIC HYDROGEN: EVALUATION OF RETROFIT  
EFFICIENCY FOR EXISTING PLANTS**

*Summary*

The article presents a summary of the techno-economic modeling of ammonia production retrofit from “grey” to “green” based on electrolytic hydrogen. The approach relies on preserving the main subsystems of existing plants – in particular, the Haber-Bosch loop, the air separation unit, and the cryogenic storage – while fully replacing the steam methane reforming (SMR) section with an electrolytic hydrogen system. The system includes solar panels, wind turbines, electrolyzers, a battery storage system, electric and hydrogen storage units, as well as a compression facility. An island configuration with autonomous power supply from renewable sources is examined, which imposes increased requirements on electricity and hydrogen buffers. The model simultaneously determines the optimal installed capacities of subsystems and their hourly operation mode, taking into account regional wind and solar resources. Four Ukrainian industrial sites – Cherkasy, Rivne, Kamianske, and the Odesa Port Plant – were selected for applied verification. Three ammonia production scenarios were compared: grey (natural gas-based) and two green ones powered by wind and solar energy. The assessment was carried out using the levelized cost of electricity, with capital expenditures annualized, and including operational costs, balancing requirements, and typical risk premiums. The results show that the key cost factors for green production are electricity price, electrolyzer efficiency, equipment lifetime, and storage requirements. Under conservative assumptions, solar generation remains the more expensive option relative to the traditional scheme, while wind generation under favorable conditions approaches the cost level of grey ammonia. The competitiveness of the wind-powered option increases under scenarios of rising natural gas prices. The relationship between system parameters and total annual costs for each plant is shown, enabling comparison of regional profiles and cost structures. The study outlines the practical meaning of retrofit in terms of work scope and cost composition, emphasizing the need for transparent baseline assumptions regarding electricity prices, degradation of generating assets, and replacement of electrolyzer stacks. Directions for further research are identified, including expanded sensitivity analysis for discount rate and storage parameters, as well as refinement of parity conditions for different wind-solar combinations under national energy conditions.

**Keywords:** power, Haber-Bosch loop, configuration, CAPEX, electricity price, levelized cost.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-24>

УДК 621.32:004.89:620.92

К. Г. Петренко, ст. викладач

ORCID: 0009-0007-2972-4001

Ю. О. Постол, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-0749-3771

В. Б. Гулевський, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-1434-9724

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-4974-5201

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

E-mail: yulia.postol@tsatu.edu.ua

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ОСВІТЛЕННЯ З АВТОМАТИЗОВАНИМ КЕРУВАННЯМ

*Анотація.* У статті проаналізовано сучасні технології автоматизованого керування освітленням з акцентом на оцінці їх енергоефективності, функціональних можливостей та перспектив інтеграції в інженерну інфраструктуру. Проведено класифікацію основних типів систем, зокрема централізованих, децентралізованих, адаптивних та інтелектуальних рішень. Визначено ключові переваги впровадження таких технологій, серед яких – зменшення енергоспоживання, підвищення рівня комфорту користувачів, здатність до автоматичної адаптації до змін зовнішнього середовища, а також можливість інтеграції з іншими компонентами «розумної» інфраструктури. На основі аналізу отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо модернізації інженерних систем освітлення з урахуванням актуальних тенденцій цифровізації та сталого розвитку.

*Ключові слова:* автоматизоване керування освітленням, енергоефективність, інженерна інфраструктура, інтелектуальні системи.

*Постановка проблеми.* Одним із пріоритетних напрямів енергетичної оптимізації є модернізація освітлювальних систем, що становлять вагомую частку загального енергоспоживання в житловому, комерційному та промисловому секторах.

Традиційні системи освітлення, що функціонують у статичному режимі, не враховують динаміки зовнішніх умов, як-от рівень природного освітлення, присутність людей або зміни в режимах експлуатації приміщень. Це призводить до нераціонального використання електроенергії та зниження загальної енергоефективності об'єктів. З огляду на це, актуальним стає впровадження автоматизованих систем керування освітленням, здатних адаптувати свою роботу відповідно до реальних потреб користувачів та умов середовища.

Сучасні технологічні досягнення створюють передумови для розробки інтелектуальних систем освітлення нового покоління. Такі системи забезпечують не лише суттєве зниження енергоспоживання, а й підвищення рівня комфорту, безпеки та екологічної сталості, що відповідає вимогам сталого розвитку й концепції «розумного» середовища.

*Аналіз останніх досліджень.* У контексті дедалі більших вимог до енергоефективності та цифрової трансформації інженерної інфраструктури, автоматизовані системи освітлення стали об'єктом активного наукового дослідження. Останні публікації демонструють значний прогрес у впровадженні інтелектуальних технологій, що дають змогу оптимізувати споживання електроенергії, підвищити комфорт користувачів та зменшити екологічне навантаження [1].

У роботі [2] проведено систематичний огляд потенціалу енергозбереження в будівлях завдяки впровадженню «розумного» освітлення. Автори підкреслюють, що використання daylight harvesting, сенсорних технологій та адаптивного керування дає змогу знизити споживання електроенергії до 60 %.



У публікації [3] розглянуто архітектуру інтелектуальних освітлювальних систем, зокрема *IoT*-рішення, хмарні платформи та сценарне керування. Автори акцентують увагу на важливості інтеграції освітлення з іншими системами «розумного будинку» для досягнення максимального ефекту.

Автори в роботі [4] досліджують концепцію *Human Centric Lighting*, яка враховує біоритми людини та вплив спектра світла на когнітивні функції. Це відкриває нові перспективи для автоматизованих систем, орієнтованих на комфорт і добробут користувачів.

У вітчизняному дослідженні, опублікованому в збірнику НУПП [5], розглянуто типові функції систем автоматичного керування освітленням, зокрема підтримання нормативного рівня освітленості, оптимізацію потужності залежно від присутності людей, комбіноване керування та реалізацію концепції *Human Centric Lighting*. Автори також аналізують нормативні вимоги ЄС щодо екодизайну джерел світла та енергетичного маркування.

У публікації [6] розглянуто практичні аспекти впровадження автоматизованих систем освітлення в житлових, комерційних та промислових об'єктах. Зокрема, описано компоненти таких систем: датчиків руху, *LED*-джерел світла, мереж зв'язку та програмного забезпечення – які забезпечують гнучке керування освітленням, зниження витрат та покращення екологічних показників.

Так, аналіз наукових джерел свідчить про високий потенціал автоматизованих освітлювальних систем у контексті енергоефективності, цифрової інтеграції та сталого розвитку.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Метою роботи є аналіз сучасних підходів до автоматизованого керування освітленням, оцінка їх енергоефективності та перспективи впровадження в інженерну інфраструктуру з урахуванням вимог сталого розвитку.

*Основні матеріали дослідження.* Автоматизація та цифровізація освітлювальних систем є ключовими напрямками розвитку сучасної інженерної інфраструктури. Вони сприяють гнучкому керуванню світловими потоками, зниженню енергоспоживання й покращенню комфорту користувачів.

Одним із базових елементів таких систем є таймери, які виконують низку важливих функцій у контексті енергоефективного освітлення.

Таймери часу забезпечують автоматичне вмикання та вимикання освітлення у задані часові інтервали. Вони особливо ефективні для зовнішнього освітлення, рекламних конструкцій та офісних приміщень.

Цифрові таймери з програмованими сценаріями дають змогу точно налаштувати режими освітлення відповідно до графіка роботи об'єкта або добового циклу.

Інтеграція таймерів у системи «розумного будинку» дає змогу поєднувати їх із датчиками руху, освітленості, клімат-контролем та іншими компонентами, створюючи комплексні сценарії керування.

Підтримка цифрових протоколів (*DALI*, *KNX*, *BACnet*) забезпечує роботу таймерів у складі централізованих систем керування з можливістю дистанційного налаштування та моніторингу.

#### 1. Основні переваги використання таймерів:

- енергоефективність – освітлення активується лише за потреби, що знижує витрати електроенергії;
- автоматизація – виключає необхідність ручного керування;
- безпека – можливість імітації присутності, освітлення в нічний час;
- гнучкість – налаштування графіків освітлення відповідно до дня тижня, сезону або конкретної події.

Практичний приклад: житловий комплекс «Софія Резиденс».

У 2023 році в житловому комплексі «Софія Резиденс» (с. Софіївська Борцагівка, Київська область) було реалізовано проєкт з впровадження таймерного керування освітленням сходових



клітин у багатоквартирних будинках. Метою ініціативи було зменшення витрат на електроенергію та підвищення рівня безпеки мешканців у нічний час.

Технічне рішення: у кожному під'їзді встановлено реле часу, що активує освітлення при натисканні кнопки або відкритті дверей. Таймери запрограмовані на автоматичне вимкнення світла через 2–3 хвилини, що дає змогу уникнути надмірного енергоспоживання.

Досягнуті результати: у поєднанні з *LED*-світильниками система забезпечила суттєву економію ресурсів. Зниження споживання електроенергії на освітлення сходових клітин – до 60 % порівняно з постійним освітленням. Зменшення витрат на обслуговування – завдяки зниженому навантаженню на світильники та подовженому терміну служби *LED*-ламп. Підвищення безпеки – освітлення активується лише за потреби, що зменшує ризик травматизму. Покращення естетики та комфорту – світильники не засліплюють, а таймери забезпечують достатній час для пересування між поверхами.

Датчики освітленості є ключовими компонентами сучасних автоматизованих систем освітлення. Їх основне призначення полягає в забезпеченні адаптивного керування штучним освітленням залежно від рівня природного світла. Це дає змогу оптимізувати енергоспоживання, підвищити комфорт користувачів та забезпечити сталість освітлювального середовища.

Пристрій вимірює рівень освітленості навколишнього середовища (у люксах) і, залежно від заданих порогових значень, активує або деактивує штучне освітлення. Такий підхід є основою *daylight harvesting* – технології, що дає змогу максимально використовувати природне світло для зменшення навантаження на електромережу.

## 2. Принцип роботи.

Принцип дії датчиків освітленості базується на реакції світлочутливого елемента (фоторезистора або фотодіода) на інтенсивність світлового потоку. При зниженні освітленості нижче заданого порогу спрацьовує реле, яке активує освітлення. У разі достатнього рівня природного світла освітлення автоматично вимикається.

## 3. Типи датчиків освітленості.

Є кілька основних типів датчиків освітленості, які відрізняються за принципом роботи та сферою застосування:

Фоторезисторні датчики – змінюють електричний опір залежно від рівня освітлення; застосовуються в побутових системах, на фасадах будівель та в під'їздах.

Фототранзисторні датчики – генерують електричний струм при освітленні; використовуються на промислових об'єктах та у вітринах.

Цифрові датчики освітленості – характеризуються високою точністю та можливістю програмування порогів спрацювання; застосовуються в інтелектуальних системах освітлення.

Сутінкові датчики – активують освітлення при настанні темряви; використовуються у вуличному освітленні та на парковках.

## 4. Сфери застосування.

Датчики освітленості широко застосовують на різних типах об'єктів: вуличне освітлення (ліхтарі, прожектори); фасади будівель, входи, під'їзди; сходові майданчики, коридори, складські приміщення; офіси, навчальні заклади, торгові центри – у складі *daylight harvesting* систем.

## 5. Ефективність та технічні характеристики.

Основні технічні параметри датчиків освітленості містять: діапазон спрацювання: 10–250 люкс; потенційна економія енергії: до 30–50 %; ступінь захисту: *IP20–IP65* (залежно від моделі); сумісність: *LED*, люмінесцентні та галогенні джерела світла.

## 6. Висновки.

Датчики освітленості є ефективним засобом реалізації адаптивного освітлення в автоматизованих системах. Їх використання дає змогу досягти значної економії енергії, підвищити



функціональність освітлення та створити комфортне середовище для користувачів. Завдяки широкому спектру типів та можливостей інтеграції ці пристрої є незамінними в сучасному енергоефективному будівництві.

Датчики руху є важливими елементами енергоефективної автоматизації освітлення. Їх основне призначення – автоматичне вмикання освітлення або інших систем у момент появи руху в зоні дії пристрою. Такі рішення особливо ефективні в місцях короткочасного перебування людей: коридорах, сходових майданчиках, санвузлах, гаражах, технічних приміщеннях, а також у зонах зовнішнього освітлення – на фасадах, парковках, під'їздах.

## 2. Принцип роботи.

Датчик постійно сканує простір на наявність змін. У разі фіксації переміщення об'єкта (наприклад, людини або тварини) пристрій активує реле, яке вмикає освітлення. Після завершення руху світло вимикається автоматично через заданий інтервал часу – від 10 секунд до 30 хвилин залежно від налаштувань.

## 3. Типи датчиків руху.

Є кілька основних типів датчиків руху, що відрізняються за принципом дії та особливостями застосування:

Інфрачервоні (*PIR*) – реагують на теплове випромінювання тіла людини. Це найпоширеніший тип, який вирізняється економічністю та чутливістю до дрібних об'єктів, зокрема тварин.

Мікрохвильові – працюють за принципом випромінювання електромагнітних хвиль і фіксації їх змін. Вони здатні виявляти рух крізь тонкі перегородки, мають високу чутливість і застосовуються в складних умовах.

Ультразвукові – випромінюють звукові хвилі та аналізують їх відбиття. Ефективні для виявлення дрібних рухів, особливо в приміщеннях з перешкодами.

Комбіновані – поєднують кілька технологій (наприклад, *PIR* + мікрохвильову), що дає змогу мінімізувати хибні спрацювання та забезпечити високу точність. Застосовуються переважно в охоронних системах.

## 4. Сфери застосування.

Датчики руху використовують у різних типах об'єктів: у житлових будинках – для освітлення коридорів, сходів, ванних кімнат. На промислових об'єктах – у складських приміщеннях, технічних зонах. У зовнішньому освітленні – на фасадах, парковках, біля під'їздів.

## 5. Ефективність та технічні характеристики.

Застосування датчиків руху дає змогу досягти зниження енергоспоживання на рівні до 30–50 % порівняно з традиційними системами освітлення. Час затримки вимкнення світла може регулюватися в межах від 10 секунд до 30 хвилин. Кут огляду датчиків варіюється від 90° до 360°, а дальність виявлення – від 3 до 12 метрів залежно від моделі та умов експлуатації.

## 6. Висновки.

Датчики руху є ефективним засобом автоматизації освітлення, що дає змогу зменшити витрати електроенергії, підвищити рівень безпеки та комфорту. Завдяки різноманітності типів і гнучким налаштуванням ці пристрої можуть бути адаптовані до будь-яких умов експлуатації – від побутових до промислових.

*Daylight harvesting* – це інтелектуальна стратегія керування освітленням, яка передбачає максимальне використання природного світла для зменшення споживання електроенергії. Система автоматично регулює яскравість штучного освітлення залежно від кількості доступного денного світла, забезпечуючи комфортний рівень освітленості при мінімальних витратах. Такий підхід дає змогу не лише знизити енергоспоживання, а й продовжити термін служби світильників завдяки зменшенню навантаження.



## 2. Принцип роботи системи.

Функціонування *daylight harvesting* базується на взаємодії кількох компонентів: датчики освітленості (*lux*-сенсори) вимірюють рівень природного світла, що надходить у приміщення через вікна, світлові ліхтарі або фасадні прорізи. Контролер освітлення аналізує отримані дані та надсилає команди на світильники. Світильники з функцією димування автоматично зменшують яскравість або вимикаються, якщо природного світла достатньо.

У темний час доби або за умов недостатнього природного освітлення система підвищує яскравість штучного освітлення для підтримання нормативного рівня.

## 3. Ефективність *daylight harvesting*.

Згідно з узагальненими даними, *daylight harvesting* забезпечує економію енергії в межах 20–60 % залежно від типу приміщення та рівня доступу до природного світла. Плавне регулювання освітлення, що сприяє підвищенню комфорту користувачів. Збільшення терміну служби світильників завдяки зменшенню інтенсивності їх використання. Повну інтеграцію із системами управління будівлею (BMS) через протоколи *KNX*, *DALI*, *BACnet*.

## 4. Приклад практичного застосування.

У 2024 році компанія *Customize Lighting Ukraine* реалізувала *daylight harvesting* у багатофункціональному офісному приміщенні в місті Київ. Проєкт був орієнтований на принципи сталого розвитку та енергоефективності.

Система містила: фотоелектричні датчики освітленості, розміщені біля вікон і на стелі, які забезпечували точне вимірювання рівня природного світла. Автоматизовані LED-світильники з функцією димування, що регулювали яскравість відповідно до показників сенсорів. Централизовану систему керування, яка давала змогу налаштовувати сценарії освітлення та інтегрувати їх з HVAC-системою.

Досягнуті результати: зниження споживання електроенергії на освітлення в зонах з доступом до природного світла – на 40–45 %. Зменшення теплового навантаження на систему кондиціонування, що сприяло додатковому скороченню витрат на охолодження. Покращення умов праці: працівники відзначили зменшення втоми очей, підвищення концентрації та загального самопочуття завдяки доступу до природного світла.

5. Висновки. *Daylight harvesting* є ефективною технологією, що дає змогу досягти значної економії енергії, покращити умови праці та зменшити екологічне навантаження. Практичний досвід упровадження в українських умовах підтверджує її доцільність й адаптивність за умови правильного проєктування та інтеграції з іншими інженерними системами.

Сценарне керування освітленням – це метод автоматизації, за якого освітлення змінюється відповідно до заздалегідь визначених сценаріїв. Ці сценарії враховують такі параметри: час доби, тип діяльності, присутність людей, рівень природного освітлення та інші фактори. Такий підхід дає змогу не лише підвищити комфорт користувачів, а й суттєво знизити енергоспоживання, забезпечуючи гнучке та адаптивне світлове середовище.

## 2. Принцип роботи.

Система сценарного керування освітленням функціонує на основі таких компонентів, як контролер освітлення (наприклад, *KNX* або *DALI*), який зберігає набір сценаріїв. Сенсори руху, освітленості та присутності, що активують відповідний сценарій. Інтерфейс користувача – сенсорна панель, мобільний застосунок або голосовий асистент – дає змогу вручну перемикає режими.

Часові тригери – сценарії можуть запускатися автоматично за розкладом (наприклад, нічний режим о 22:00).

## 3. Основні сценарії керування.

Найпоширеніші сценарії передбачають: Робочий режим – максимальна яскравість для продуктивної діяльності; застосовується в офісах та навчальних аудиторіях. Презентаційний



режим – приглушене освітлення з акцентом на екран або сцену; використовується в конференц-залах. Нічний режим – мінімальне освітлення для охоронних потреб або навігації; актуальний для коридорів і технічних зон. Енергозбереження – освітлення лише в активних зонах, решта – вимкнена або приглушена; застосовується у виробничих цехах. Комфортний режим – тепле світло з низькою яскравістю для відпочинку; використовується в лаунж-зонах.

#### 4. Ефективність упровадження.

Згідно з практичними даними, сценарне керування дає змогу: знизити енергоспоживання до 35 % порівняно з постійним освітленням; підвищити комфорт користувачів завдяки адаптації освітлення до їхніх потреб; забезпечити гнучкість – створення нових сценаріїв можливе без зміни апаратної частини системи.

#### 5. Приклад застосування.

У межах модернізації офісної інфраструктури в одному з бізнес-центрів реалізовано проєкт сценарного керування освітленням на основі *DALI*-контролерів та сенсорних панелей. Основна мета – створити адаптивне світлове середовище, яке відповідає різним режимам роботи офісу та підвищує комфорт працівників.

Реалізовані сценарії освітлення.

Система передбачає кілька попередньо налаштованих сценаріїв, які автоматично активуються залежно від часу доби, типу активності або потреб користувачів:

Робочий режим (08:00–18:00): освітлення працює на повну яскравість із нейтральною колірною температурою (4000K). У зонах біля вікон активується *daylight harvesting* – зменшення штучного освітлення при достатньому природному світлі.

Презентаційний режим: освітлення приглушується до 40 %, активується акцентне підсвічування екранів, а світильники в зоні глядачів вимикаються для створення комфортного переглядового середовища.

Технічний / прибирання: усі світильники вмикаються на максимальну потужність, незалежно від присутності персоналу, що забезпечує повну видимість для обслуговувального персоналу.

Нічний режим (після 20:00): мінімальне освітлення зберігається лише в коридорах та на рецепції (20 % яскравості), решта зон залишаються вимкненими для економії енергії.

Індивідуальні сценарії: кожен працівник має можливість налаштувати освітлення у своєму кабінеті через мобільний застосунок – змінювати яскравість, колірну температуру, встановлювати таймери відповідно до особистих уподобань.

Результати впровадження.

Впровадження системи принесло відчутні переваги: енергоефективність: споживання електроенергії зменшено на 35 % порівняно з попередньою неавтоматизованою системою. Комфорт працівників: користувачі відзначили зниження втоми очей, покращення концентрації та загального самопочуття завдяки адаптивному освітленню. Гнучкість: система легко адаптується до змін у плануванні офісного простору або графіку роботи, що особливо актуально для динамічних бізнес-середовищ.

#### 6. Висновки.

Сценарне керування освітленням є ефективним інструментом автоматизації, який поєднує енергоефективність, комфорт та технологічну гнучкість. Його впровадження дає змогу створити адаптивне світлове середовище.

Цифрові протоколи: основа автоматизації.

Цифрові протоколи відіграють ключову роль у керуванні освітленням. *DALI* орієнтований на локальні системи освітлення, забезпечуючи точне керування світильниками та зворотний зв'язок. *KNX* дає змогу автоматизувати всі інженерні системи будівлі, хоча його зворотний



зв'язок обмежений. *BACnet*, своєю чергою, використовується для великих об'єктів і забезпечує повну інтеграцію із системами управління будівлею (*BMS*). Вибір протоколу залежить від масштабу об'єкта, вимог до керування та наявності інших інженерних систем.

*IoT, III та Big Data*: новий рівень інтелекту.

Інтеграція освітлення з *IoT* дає змогу об'єднати світильники, датчики руху, освітленості та контролери в єдину мережу. Вони взаємодіють через протоколи *ZigBee*, *Wi-Fi*, *KNX* або *DALI*, а керування здійснюється дистанційно – через мобільні застосунки або хмарні платформи.

Штучний інтелект здійснює аналіз поведінкових патернів користувачів, що дає змогу прогнозувати потреби в освітленні з урахуванням часу доби, метеорологічних умов та рівня активності в приміщенні. На основі накопичених даних система формує адаптивні сценарії освітлення, постійно вдосконалюючи свої алгоритми завдяки механізмам машинного навчання.

Великі дані допомагають збирати інформацію з тисяч сенсорів у будівлі. Це дає змогу візуалізувати споживання, виявляти аномалії та оптимізувати графіки освітлення. Інтеграція з *BMS* забезпечує комплексний енергетичний моніторинг.

Приклад реалізації: бізнес-центр «*SmartPoint*», Київ.

У 2024 році в київському бізнес-центрі було впроваджено систему інтелектуального освітлення на основі NB-IoT. Світлодіодні світильники з можливістю димування та зміни колірної температури (від теплого 2700K до холодного 6500K) реагують на заповнення приміщень, рівень природного освітлення та поведінку користувачів. Датчики присутності, руху та освітленості передають дані в реальному часі до хмарної платформи, яка за допомогою *III* аналізує ситуацію та формує сценарії освітлення. Враховується кількість людей у приміщенні, рівень денного світла, час доби, погодні умови та тип активності – чи то робоча зона, переговорна, чи зона відпочинку.

Результати вражають: енергоспоживання зменшено на 42 % порівняно з традиційною системою, покращено ергономіку середовища – світло адаптується до біологічних ритмів працівників, зменшуючи втому очей. Керування стало гнучким – адміністратори можуть змінювати сценарії через мобільний застосунок або вебінтерфейс. Освітлення синхронізується з вентиляцією, охороною системою та енергомоніторингом.

*Висновки.* Проведений аналіз сучасних технологій автоматизованого керування освітленням засвідчив їх високий потенціал у контексті енергоефективності, функціональної гнучкості та відповідності принципам сталого розвитку.

Перспективи впровадження автоматизованих освітлювальних рішень в інженерну інфраструктуру є надзвичайно широкими, особливо з огляду на глобальні тенденції цифровізації, екологічної відповідальності та розвитку «розумних» міст.

#### *Список використаних джерел*

1. Постол Ю. О., Гулевський В. Б. Підвищення енергоефективності житлового сектору. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, Т. 2. С. 121–129. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/17892>
2. Hossain M. A., Islam M. R. Energy saving potential of smart lighting systems in buildings: A review. *Energy and Buildings*, 199, 2019. 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.014>
3. Khan M. A., Rehman S., Khan, A. Z. Smart lighting systems: A review on recent developments. *Journal of Building Engineering*, 29, 2020. Article 101779. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101779>
4. Fotios, S., Houser K. Human-centric lighting: An overview of current research and future perspectives. *Lighting Research & Technology*, 51(7), 2019. 1029–1048. <https://doi.org/10.1177/14771477153519852264>
5. Візір Ю. С. Системи автоматичного керування освітленням – ефективний шлях економії електроенергії та підвищення якості освітлення. Системи управління, навігації та зв'язку, 1(67), 2022. 45–52. URL: <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/3509>



6. 0462.ua Система автоматичного керування освітленням: Сучасні технології для житлових і комерційних об'єктів. 2023. URL: <https://www.0462.ua/list/446578>

7. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Автоматична система керування освітленням. 2019. Електронний архів КПІ. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37437/1/2019-095-099.pdf>

*Стаття надійшла до редакції 10.10.2025*

*Стаття прийнята 01.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**K. Petrenko, Yu. Postol, V. Hulevskyi, A. Kovalyov**  
**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **ENERGY-EFFICIENT LIGHTING WITH AUTOMATED CONTROL**

### *Summary*

This article presents an analysis of contemporary technologies for automated lighting control, with a focus on evaluating their energy efficiency, functional capabilities, and prospects for integration into engineering infrastructure. A classification of the main types of systems is provided, including centralized, decentralized, adaptive, and intelligent solutions. The key advantages of implementing such technologies are identified, such as reduced energy consumption, enhanced user comfort, automatic adaptation to changing environmental conditions, and the ability to integrate with other components of smart infrastructure. Based on the analysis of the obtained results, practical recommendations are formulated for the modernization of lighting systems, taking into account current trends in digitalization and sustainable development.

**Keywords:** automated lighting control, energy efficiency, engineering infrastructure, intelligent systems.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-25>

УДК 621.3

О. Ю. Юрченко, PhD, доцент

Г. В. Барсукова, канд. техн. наук, доцент

К. В. Мороз, зав. навч. лаб.

М. С. Новіков, студент

М. О. Щебетенко, студент

Сумський національний аграрний університет

e-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3047-6654

ORCID: 0000-0002-4261-2182

ORCID: 0009-0004-9665-6908

ORCID: 0009-0004-8033-3127

ORCID: 0009-0007-4902-5056

## ТЕОРЕТИЧНО ПРО КОНСТРУКТИВ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ З МОЖЛИВІСТЮ ПОКРАЩЕННЯ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Анотація.* Покращення характеристик електричних двигунів є можливим шляхом зміни конструкції їх обмоток. Збільшення рівня використання електричних двигунів у різних галузях на різних режимах роботи вимагає підходу, спрямованого на раціональне використання ресурсів. У роботі на прикладі конкретно обраного електричного двигуна представлено аналіз можливості підвищення його потужності шляхом зменшення довжини петлі в лобовій частині обмотки електричного двигуна. Як наслідок, зменшення довжини петлі в лобовій частині з 70 мм до 20 мм для конкретного електричного двигуна призводить до зменшення довжини витка обмотки в 1,8 раза, що дає змогу зменшити опір котушок, що встановлені в пазах електричного двигуна. Зменшення опору дає змогу збільшити силу струму, а отже, і потужності цього електродвигуна, а також раціонального використання габаритів двигуна та проводу у витках котушок його обмоток.

*Ключові слова:* електричний двигун, котушка, обмотка, активна сталь, провід, статор, ротор, пари полюсів, потужність, сила струму, опір, напруга, питомий опір, довжина провідника, площа поперечного перерізу, габаритні розміри, раціональне використання, підвищення ефективності.

*Постановка проблеми.* Структура електричного двигуна є досить відомою. Основні його елементи мають різний характер руху. Зокрема, статор є нерухомою частиною електричного двигуна, а ротор – рухомою. У статорі реалізовано укладку обмоток. Такі обмотки виконано окремим котушками. Кожна з них має власний набір витків проводу визначеного діаметра.

Виконання статора електричного двигуна, зокрема котушок його обмотки, різняться в неідентичних двигунів. Якщо вести мову про довжину витка проводу в котушці електричного двигуна, то можна зробити висновок, що на потужність, отримувану із цього електродвигуна, впливає довжина витка проводу, площа його поперечного перерізу та матеріал, що визначатиметься згодом як питомий опір того чи іншого провідникового матеріалу.

Котушки, укладені в пази статора, окремо є можливістю розглядати, як матеріал поза активною сталлю структурних елементів електродвигуна. Тому внесення змін в конструкцію обмоток шляхом зміни довжини витка має своє продовження при зміні потужності безпосередньо електричного двигуна.

У такому разі раціональне використання габаритів електродвигуна та проводу, що використовується для його котушок, спрямоване на зменшення довжини витка котушки, що викликано окремими випадками аналізу конструкції конкретного електродвигуна з великими розмірами петлі в лобовій частині котушки електричного двигуна.

*Аналіз останніх досліджень.* Понад 80 % усіх споживачів електроенергії є електродвигунами. Електродвигуни різної потужності та напруги є ключовими елементами багатьох про-



мислових та технологічних процесів. Контроль стану електродвигуна необхідний для забезпечення стабільної роботи широкого спектра виробничих установок. Пошкодження обмоток є однією з причин відмов електродвигунів. Тому серед перспектив ресурсоефективних технологій в енергетиці є контроль стану електрообладнання, що обертається. Надійний контроль стану обмоток є актуальним завданням сучасної технології електротехніки [1].

Високошвидкісні асинхронні двигуни широко використовують у промисловості та сільському господарстві [2]. Втрати високошвидкісного двигуна безпосередньо впливають на ефективність перетворення енергії. Для реалізації швидкого та точного розрахунку втрат у роботі [2] на етапі проектування двигуна встановлено аналітичні моделі втрат змінного струму обмотки та втрат ротора високошвидкісного двигуна, що живиться інвертором. Ґрунтуючись на принципі еквівалентності площ, прийнятий пошаровий метод для обліку впливу типу паза статора та нерівномірного розподілу провідників у пазі. Крім того, аналітична модель втрат змінного струму обмотки може враховувати вплив радіального магнітного поля та просторових гармонік. Ефект вихрових струмів, гістерезису та насичення ротора можуть бути враховані за допомогою методу пошарового аналізу. Гармонійний розподіл фазної напруги та фазного струму виходить шляхом схемного моделювання. На цій основі розраховуються втрати змінного струму обмотки та втрати ротора за умови живлення інвертора. Крім того, вивчається вплив частоти струму, діаметра провідника та коефіцієнта несучої частоти на втрати змінного струму в обмотці, а також вплив довжини повітряного зазору та коефіцієнта несучої частоти на втрати в роторі. Крім того, у роботі [2] створено експериментальну платформу для визначення характеристик втрат і наростання температури високошвидкісного двигуна, а також перевірено точність аналітичних розрахунків та кінцевоелементного моделювання за допомогою експерименту з наростання температури в обмотці та експерименту з втрат у роторі.

Двигуни з ротором, що обертається, широко цінують за високу швидкість, підхід у конструктивному виконанні заповнення пазів, низький опір струму тощо [3]. Для досягнення високої продуктивності необхідно ретельно контролювати робочу температуру ЕД, оскільки висока температура може прискорити зменшення ресурсу двигуна й навіть призвести до його відмови [4]. Тому в роботі [5] запропоновано новий підхід до керування тепловим режимом обмоток електричних машин в умовах високих навантажень.

У статті [6] розглядається співвідношення між електричними та магнітними навантаженнями для конструкції повністю надпровідного електричного двигуна. На підставі отриманих результатів автори припускають, що машини з більш високим електричним навантаженням можуть мати вищу щільність вихідної потужності при нижчому ККД та коефіцієнт потужності. Тому економічна та ефективна конструкція електродвигуна вимагає знання точних значень теплопровідності всіх компонентів. Теплопровідність обмотки – складний параметр для визначення та покращення [7]. Сучасні технології дають змогу регулювати перебіг процесів автоматично без втручання персоналу для різних електричних двигунів [8]. Тому для збільшення рівня можливостей, зокрема крутного моменту, у роботі [9] використовуючи один і той самий магнітний контур, об'єднано два різні типи обмоток. Одна з них – обмотка з повітряним зазором, яка встановлюється безпосередньо на задній стінці статора, використовуючи магнітне поле в повітряному зазорі для створення сил Лоренца, що діють на обмотку й забезпечують одну частину моменту, що крутить. Інша – пазова обмотка, яка фіксується всередині невеликих пазів задньої стінки статора, створюючи магнітні сили і вносячи другу частину моменту, що крутить. Це призводить до надлегкої, ефективної, динамічної та високомоментної електричної машини для широкого спектра застосування.

Як наслідок зі сказаного, дослідження обмоток електричного двигуна є актуальними з метою покращення вольт-амперних та тягових характеристик.

*Формулювання мети статті.* Метою статті є аналіз можливості зміни конструкції обмоток електричного двигуна з метою:

- збільшення його потужності;
- раціонального використання габаритних розмірів електричного двигуна.

Визначена проблематика дослідження стосується безпосередньо конкретних варіантів електричних двигунів, де довжина петлі на виході з активної сталі є досить великою. З метою раціонального використання ресурсів та потужності дослідження спрямовано на аналіз можливості покращення характеристик електродвигуна шляхом внесення змін у конструкцію (довжину петлі) витка котушки електричного двигуна.

*Основна частина.* Конструкція електродвигуна, представленого в дослідженні, є класичною. З метою проведення конструктивного аналізу виконання обмоток електричного двигуна з погляду довжини витка використано електричний двигун АИУ100L2У2,5 (рис. 1) потужністю 5,5 кВт зі швидкістю обертання вала 2856 об./хв.



Рис. 1. Електричний двигун АИУ100L2У2,5

Електричний двигун, що має досить високу потужність, використовують з метою приведення в дію різного устаткування в сільськогосподарському та промисловому виробництві. Габаритні розміри електричного двигуна становлять 385 мм довжини, 215 мм висоти та 205 мм ширини. З погляду конструктиву, такий електричний двигун має у своєму складі обмотки з мідного проводу. Класифікацією на маркування електричного двигуна указано:

- АИУ – тип електродвигуна;
- 100 – умовний габарит;
- L – позначення довжини сердечника;
- 2 – число полюсів (1 пара полюсів);
- У2 – категорія розміщення.

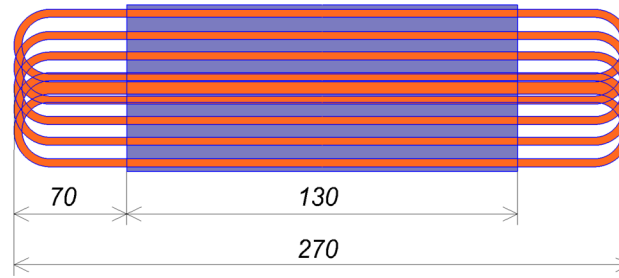


Рис. 2. Розміри активної сталі та обмоток електричного двигуна АИУ100L2У2,5

Виконання статора електричного двигуна вказаної марки має певні конструктивні особливості. Зокрема, довжина активної сталі в статорі та роторі електродвигуна становить 130 мм. Лобова частина обмоток становить 70 мм. З огляду на розташування обмоток у статорі електричного двигуна, стає помітним нераціональне використання габаритів електричного двигуна.

Виконання обмотки електричного двигуна, зокрема, довжина витка обмоток у варіанті довжини активності сталі 130 мм та лобової частини (петлі котушки) 70 мм, згідно з рис. 2, становить 700 мм. З урахуванням великого розміру лобової частини обмотки (70 мм), раціональне використання габаритів електричного двигуна доцільно реалізовувати шляхом зменшення петлі витка обмотки електричного двигуна. Унаслідок цього стандартне значення довжини сталі буде незмінним – 130 мм, лобова частина витка буде зменшеною в розмірі. З огляду на це, зі зменшенням довжини витка обмотки електричного двигуна відбиватиметься зменшення опору провідника за виразом:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

де  $R$  – електричний опір, Ом;  
 $\rho$  – питомий опір, Ом·м;  
 $l$  – довжина провідника, м;  
 $S$  – площа поперечного перерізу провідника, мм<sup>2</sup>.

Зменшуючи опір витка обмотки електричного двигуна завдяки незмінній напрузі, є можливість збільшити струм за законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \text{ А}, \quad (2)$$

де  $U$  – напруга, В.

Так, склавши вирази 1 та 2, збільшення сили струму для електричного двигуна відбуватиметься за виразом 3:

$$I = \frac{US}{\rho l}, \text{ А}, \quad (3)$$

Зміна конструкції витків обмотки електричного двигуна призводитиме до зменшення довжини витків за їх незмінної кількості. Заводського виконання указаний електричний двигун має одну пару полюсів, звідси – швидкість обертання вала електродвигуна 3 000 об./хв відповідно до виразу 4:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (4)$$

де:  $n$  – синхронна частота, об./хв;  
 $f$  – частота струму, Гц;  
 $p$  – кількість пар полюсів.

Виконання котушок електричного двигуна реалізовано в кількості 12 одиниць відповідно до 24 пазів у статорі (2 пази на 1 котушку обмотки електродвигуна). Кількість витків котушки становить 68 одиниць з діаметром проводу 1,25 мм. Довжина одного витка обмотки електричного двигуна становить суму двох довжин активної сталі та двох довжин півкіл (для лобової частини обмотки). Так, довжина витка математичним способом визначатиметься відповідно до виразу 5:

$$l = 2L_a + 2L_p, \quad (5)$$

де:  $L_a$  – довжина активної сталі, мм;

$L_p$  – довжина петлі, мм.

$$l_1 = 2 \cdot 130 + 2 \cdot 220 = 700 \text{ мм}$$

У такому разі довжина одного витка для електричного двигуна становить 700 мм. Унаслідок цього зі зменшенням розміру петлі для лобової частини обмотки електричного двигуна, скажімо, до 20 мм (рис. 3), довжина витка становитиме 386 мм відповідно до виразу 5:

$$l_2 = 2 \cdot 130 + 2 \cdot 63 = 386 \text{ мм}$$

Шляхом зменшення довжини петлі на виході з активної сталі в обмотці електричного двигуна з 70 до 20 мм за незмінної довжини витка в активній сталі статора та ротора електричного двигуна довжина витка зменшується із 700 мм до 386 мм, що становить показник в 1,8 раза.

Зменшення довжини витка обмотки електричного двигуна призводитиме, відповідно до виразу 3, до збільшення сили струму за незмінної напруги електричної мережі. Унаслідок цього збільшення сили струму матиме наслідок збільшення потужності електричного двигуна відповідно до виразу 6:

$$P = U \cdot I, \quad (6)$$

Так, зменшення довжини витка обмотки електричного двигуна в 1,8 раза призводитиме до зменшення його опору в стільки разів. Використовуючи закон пропорційності, збільшення сили струму в 1,8 раза призведе до збільшення потужності з 5,5 кВт до 9,9 кВт.

Враховуючи можливість зменшення довжини витка обмотки електричного двигуна шляхом зменшення довжини петлі на виході з активної сталі, що призводить до збільшення потужності, відкритим залишається питання стійкості до перегріву електродвигуна. Збільшення потужності без внесення коректив у структуру статора та ротора (зі збереженням стандартного набору заліза, тобто маси), найімовірніше, призводитиме до збільшення робочої температури електричного двигуна.

Здійснені розрахунки стосуються безпосередньо указаної марки електричного двигуна. Також важливо відмітити, що зменшення довжини петлі на виході з робочої сталі електродвигуна може бути реалізованим на різну довжину. У такому разі розрахунок проведено зі зменшенням довжини петлі з 70 до 20 мм, що призводить за незмінної довжини активної сталі, тобто довжини проводу у витку обмотки активної сталі, із 700 до 386 мм, що становить показник 1,8 раза.

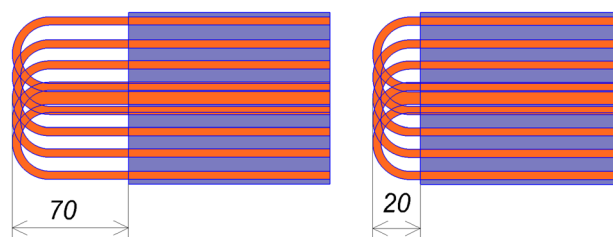


Рис. 3. Зміна розмірів петлі котушки електричного двигуна



Рис. 4. Діаграма зміни потужності залежно від зміни довжини витка обмотки.

$I_1$  – стандартна довжина витка;  $I_2$  – видозмінена довжина витка

**Висновки.** Внесення змін у конструктив електричного двигуна можливе завдяки довжині витка обмотки, що вкладається в пази. З виконанням аналізу конструктивних характеристик обмоток електродвигуна на прикладі конкретного двигуна потужністю 5,5 кВт з однією парою полюсів у роботі розглянуто можливість раціонального використання габаритів електродвигуна, а також потужності, що дається на виході з нього. Установлено, що одна довжина петлі (лобової частини обмотки конкретно обраного електродвигуна) становить більше значення за довжину активної сталі. Унаслідок цього раціональне використання габаритів та ресурсу електродвигуна може бути спрямованим на зменшення петлі в котушці обмотки. Зі зменшення петлі (одразу двох) в кожному з витків котушки обмотки є можливість зменшення опору проводу. Наслідком цього є збільшення сили струму за незмінної напруги електричної мережі відповідно до закону Ома. Збільшення сили струму призводить до збільшення потужності. Подальші дослідження тематики доцільно було б спрямувати на визначення температурних показників електричного двигуна, що будуть змінюватися зі збільшенням сили струму, а отже, і потужності.

#### Список використаних джерел

1. Mytnikov A. V., Lavrinovich V. A., Evseeva A., Stepanov I. Development of advanced winding condition control technology of electric motors based on pulsed method. *Resource-Efficient Technologies*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2017.08.001>
2. Xu H., Zhao J., Xion Y., Duan Y. Analysis and calculation of the winding loss and rotor loss of solid rotor induction motors for flywheel energy storage system considering the influence of inverter power supply. *Journal of Energy Storage*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117224>
3. Feng, J., Sun, P., Wei, D., Shi, W., Yang, S., & Zhao, Z. Study on radial Oil Spray Cooling of end windings with Hairpin Motors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105675>
4. Li X., Zhao X., Zhang Z., Avelin A., Liu S., Li H. Selecting cooling methods for electric motors. *Applied Thermal Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126554>
5. Broumand M., Yun S., Hong Z. A novel phase change material-based thermal management of electric machine windings enabled by additive manufacturing. *Applied Thermal Engineering*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122802>
6. Terao Y., Okumura S., Ohsaki H. Study on Electric and Magnetic Loadings in Fully Superconducting Motor Design. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2023.1354399>
7. Stock M., Lohmeyer Q., Meboldt M. Increasing the Power Density of e-motors by Innovative Winding Design. *Procedia CIRP*, 36, 2015. 236–241. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.078>



8. Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В. Особливості вмикання електродвигунів на паралельну роботу при автоматизації процесів у сільському господарстві. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 2024. (3 (57), 79–85. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.10>

9. Kasper R., Borchardt N. Boosting Power Density of Electric Machines by Combining Two Different Winding Types. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 2016. 322–329. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.576>

*Стаття надійшла до редакції 20.09.2025*

*Стаття прийнята 05.10.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**O. Yurchenko, H. Barsukova K. Moroz, M. Novikov, M. Shchebetenko**  
**Sumy National Agrarian University**

## **THEORETICALLY ABOUT THE DESIGN OF ELECTRIC MOTOR WINDINGS WITH THE POSSIBILITY OF IMPROVING THEIR CHARACTERISTICS**

### *Summary*

Improving the characteristics of electric motors is possible by changing the design of their windings. Increasing the level of use of electric motors in different industries in different operating modes requires an approach aimed at rational use of resources. In this paper, using the example of a specifically selected electric motor, an analysis of the possibility of increasing its power by reducing the length of the loop in the frontal part of the winding of the electric motor is presented. As a result, reducing the length of the loop in the frontal part from 70 mm to 20 mm for a specific electric motor leads to a reduction in the length of the winding turn by 1.8 times, which thereby makes it possible to reduce the resistance of the coils installed in the slots of the electric motor. Reducing the resistance makes it possible to increase the current strength, and, consequently, the power of this electric motor, as well as rational use of the dimensions of the motor and the wire in the turns of the coils of its windings. Making changes to the design of an electric motor is possible due to the length of the winding turn that is inserted into the grooves. By performing an analysis of the design characteristics of the windings of an electric motor on the example of a specific 5.5 kW motor with one pair of poles, this work considers the possibility of rational use of the dimensions of the electric motor, as well as the power given at its output. It has been established that one loop length (of the frontal part of the winding of a specifically selected electric motor) is greater than the length of the active steel. As a result, rational use of the dimensions and resource of the electric motor can be aimed at reducing the loop in the winding coil. By reducing the loop (two at once) in each of the turns of the winding coil, it is possible to reduce the resistance of the wire. Further research on the topic would be advisable to focus on determining the temperature indicators of an electric motor, which will change with increasing current strength, and therefore power.

**Keywords:** electric motor, coil, winding, active steel, wire, stator, rotor, pole pairs, power, current, resistance, voltage, resistivity, conductor length, cross-sectional area, overall dimensions, rational use, efficiency improvement.



---

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ**

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-26>

УДК 515.2

О. О. Вершков, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0009-0616-8983

О. Є. Мацулевич, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

О. Ю. Михайленко, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-8836-3222

І. Р. Тетервак, асистент

ORCID: 0009-0009-0616-8983

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: [oleksandr.vershkov.tsatu.edu.ua](mailto:oleksandr.vershkov.tsatu.edu.ua)**ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ «БАЗА ІНЖЕНЕРНИХ ЗНАТЬ  
ДЛЯ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ ГАЗОДУВОК»**

*Анотація.* Виробничі підприємства дуже залежать від цін на продукцію, на робочу силу та на нові програмні продукти, які можуть значно скоротити витрати. Наявна на сьогодні проблема впливає на збільшення часу на розробку чи конструювання нових приладів, тим самим зменшуючи ефективність праці. Наслідком цього є великі витрати, які не виправдовують очікування. Проаналізувавши комерційні програмні продукти, ми дійшли висновку, що вони є висококласними, але дуже дорогими, для їх використання треба придбати ліцензію, для впровадження – мати потужне програмне забезпечення, а для чіткого функціонування будь-якої із систем потрібна штатна група ІТ-спеціалістів високого рівня. Наводиться інтерфейс усіх форм модуля розрахунку собівартості, додано зв'язок із реєстрами та рахунками бази знань, а також розроблено і проведено тестування додатка. Проведено верифікацію додатка. Виявлено, що створена інформаційна система повністю відповідає технічному завданню і не має логічних помилок.

*Ключові слова:* програмний модуль, база інженерних знань, газодувка, компресор, структурний синтез, собівартість, валідація, верифікація.

*Постановка проблеми.* Зі зростанням конкуренції в сучасній економіці критичну роль відіграє всебічний контроль над активами, доходами й витратами компанії. Для підвищення конкурентоспроможності підприємство повинно прагнути до їхньої оптимальної збалансованості, що є запорукою виявлення потенціалу для зниження витрат і збільшення прибутків. У контексті потреби в модернізації системи управління потребує вдосконалення процес менеджменту виробничої сфери. Виробнича діяльність охоплює всі операції з виготовлення основної продукції (послуг), що є головною метою існування компанії та ключовим джерелом її доходу.

*Аналіз попередніх досліджень.* Більшість діагностичних програм призначені насамперед тільки для вимірювання характеристик роботи інформаційної системи. Це можуть бути відносно прості характеристики, наприклад утилізація портів комутатора або процесора сервера.

Комерційні програмні продукти є висококласними, але дуже дорогими, для їх використання треба придбати ліцензію – це по-перше. По-друге, для впровадження цих продуктів потрібно мати високе організаційне та програмне забезпечення, придбати купу приладів. По-третє, для чіткого функціонування будь-якої із систем потрібно проводити навчальні курси для персоналу та мати штатну групу ІТ-спеціалістів високого рівня.

Проаналізувавши вищенаведені способи реалізації модуля обліку торговельних представників, ми прийняли рішення розробити модуль на базі існуючого додатка.

*Формулювання цілей статті.* Мета цієї роботи полягає в розробці програмного модуля для роботи з інформацією про компресори, яка призначена для перегляду, додавання, редагування записів. Оскільки існуючі аналоги не відповідають усім вимогам, було вирішено розробити новий програмний засіб – новий програмний продукт, який базується на базі інженерних знань. Таким чином, інженер вводитиме параметри, які йому потрібні для підбору того чи іншого компресора, а програма показуватиме, які слід вибрати для подальшої роботи. Такий програмний продукт значно скоротить витрати часу на розрахунки та підбір бажаних компресорів, тим самим збільшить ефективність праці.

*Основна частина.* Структура бази знань спроектована таким чином, що користувач у будь-який момент часу може швидко отримати вичерпну інформацію щодо газодувки та в разі потреби й наявності привілеїв відредагувати або видалити цю інформацію.

Виходячи з технічного опису конструкції проєктованого виробу, можна виділити функціональні вузли, що визначають його робочий процес: вхідний пристрій, компресор (підпірні ступені, компресор середнього тиску, компресор високого тиску), роздільник потоків внутрішнього і зовнішнього контурів, сопло, повітря-повітряний радіатор для зниження температури повітря, що відбирається в різних перетинах компресора на охолодження турбін, основна камера згоряння, підведення вторинного повітря за камерою згоряння, турбіна (турбіна високого тиску, турбіна середнього тиску, турбіна низького тиску, вільна турбіна), перехідний канал між вузлами двигуна (зовнішній контур, дифузор камери згоряння, затурбінний дифузор, перехідний канал перед вільною турбіною), змішувач потоків зовнішнього та внутрішнього контурів, споживач потужності від ротора турбіни. У комбінованих енергетичних установках додатково виділяються такі вузли, як котел-утилізатор, насос подачі води, парова турбіна, дроселі робочого тіла, конденсатор водяної пари (поверхневий, що змішує), підігрівачі робочого тіла (поверхневого і змішувального типів), деаератор, елементи вприскування робочого тіла (води, пари, газу) та ін.

#### *Робота з програмним модулем*

Запустити програму можна подвійним клацанням лівої кнопки миші на іконці Kompressor.exe. Після цього з'явиться splash-вікно програми (рис. 1).

База знань – це особливого роду база даних, розроблена для управління знаннями (метаданими), тобто збиранням, зберіганням, пошуком і видачею знань. Розділ штучного інтелекту, який вивчає бази знань і методи роботи зі знаннями, називається інженерією знань. Бази знань – це зазвичай конфіденціальна інформація. Тому до програми було введено вікно авторизації та реєстрації (рис. 2, 3).



Рис. 1. Splash-вікно програми

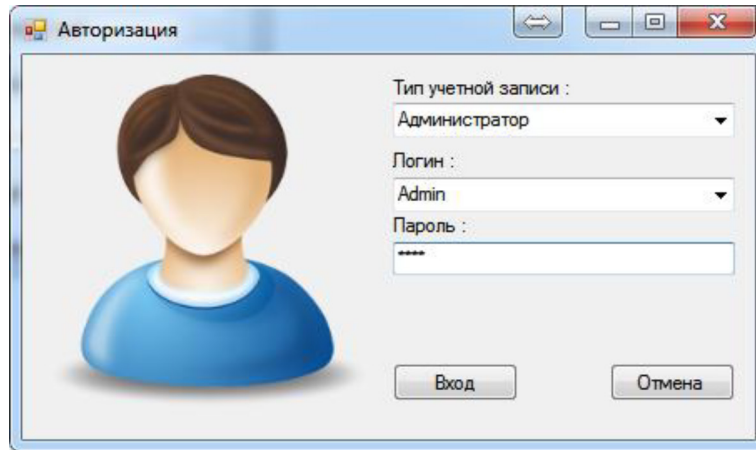


Рис. 2. Вікно авторизації

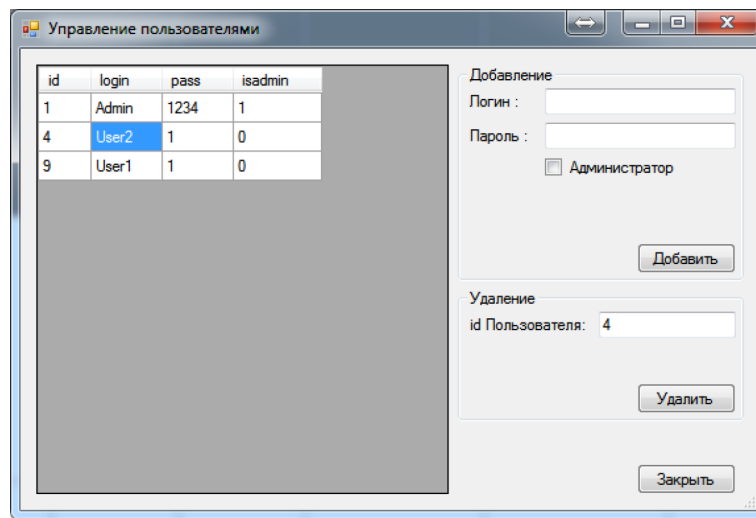


Рис. 3. Управління користувачами

Після авторизації можна переглянути базу знань: ми бачимо газодувки та багато інформації про кожну з них. Вони класифікуються за такими параметрами: назва, двигун, маса, діаметр колеса газодувки, діаметр колеса турбіни, частота обертання, максимальна ступінь підвищення тиску, продуктивність, допустима температура, адиабат ККД (рис. 4).

id	Назва	Двигун	Маса	Діаметр колеса газодувки	Діаметр колеса турбіни	Частота обертання	Мак. степ. підвищення тиску	Продуктивність	Дистанція	ККД	Температура	Картинка		
18	ТКР-6, 50-1	ОНД-170/-180/-1700	10.1			85	76	60000	1.8	0.2	650	0.75	0.68	
19	ТКР-6 (04)	Д-245, 12С	6.5	192	0	61	61	115000	2.1	0.15	700	0.72	0.71	
20	ТКР-7	Д-440; Д-442	7.8	90	0	76	75	60000	2.5	0.25	700	0.75	0.68	
21	ТКР-8, 5С	Д-160Н	13.2			85	85	60000	2	0.2	650	0.75	0.7	
22	ТКР-13Н-3	Д-100; Д-170	22.6			110	110	45000	1.0	0.10	650	0.72	0.74	

Рис. 4. Перегляд бази знань

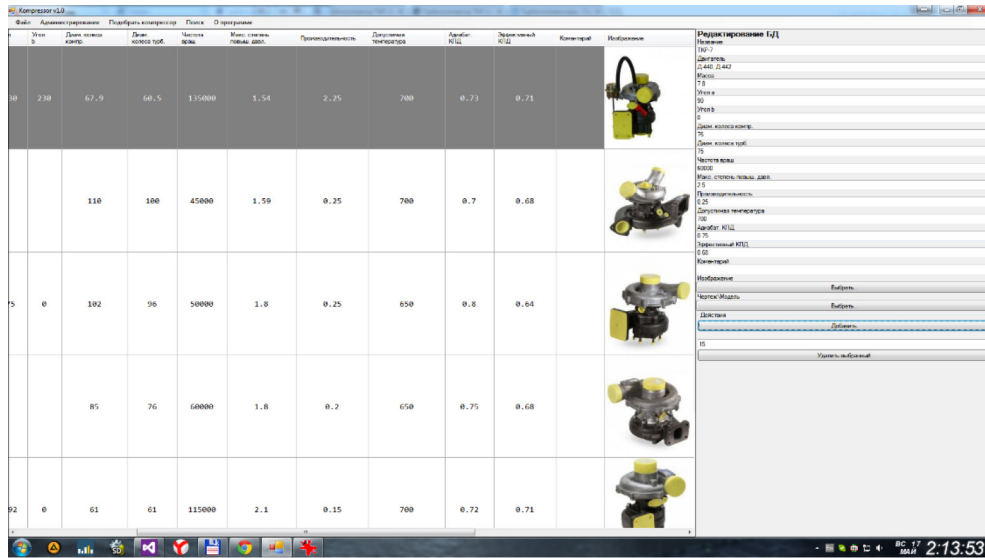


Рис. 5. Редагування бази знань

Також можна редагувати базу знань, добавляти / видаляти об'єкти (рис. 5).

У продукційних системах штучного інтелекту елементом подання знань є правило-продукція. Таке правило містить передумову, яка визначає його придатність за конкретного стану змінних бази даних: якщо... то... Тому було прийнято рішення розробити розрахункове вікно у програмі. Це вікно розраховує газодувки за масою, частотою обертання та продуктивністю. Можна вибрати один найважливіший критерій або одразу всі (рис. 6).

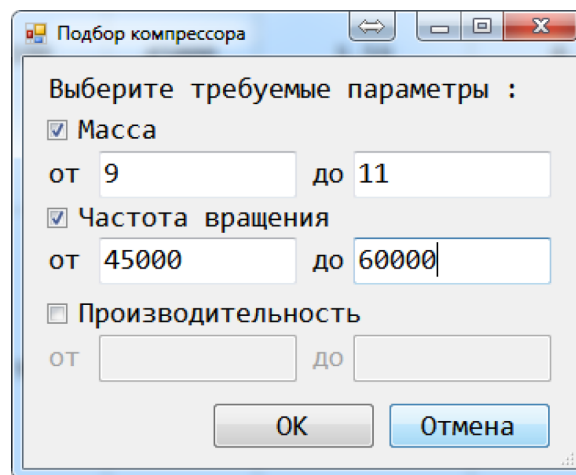


Рис. 6. Розрахунок компресора

Також програма дає змогу переглядати креслення щодо кожного турбокомпресора. Вона взаємодіє з Autodesk Inventor (рис. 7).

Для більшої зручності та гарного інтерфейсу програма має пошукове вікно, вкладку «Про програму» та короткі відомості про принцип роботи турбокомпресорів.

Щоб викликати довідку, треба натиснути лівою клавішею миші на вкладку з відповідною назвою – «Довідка».

Слід зазначити, що головним етапом створення програмного забезпечення є перевірка його роботи. Процес верифікації вимог до ПЗ є невід'ємною частиною всього процесу розробки. Верифікація тісно пов'язана з проєктуванням, розробкою та супроводом програмної системи. У таблиці 1 наведено специфікацію тестів для перевірки працездатності функцій програмного модуля.

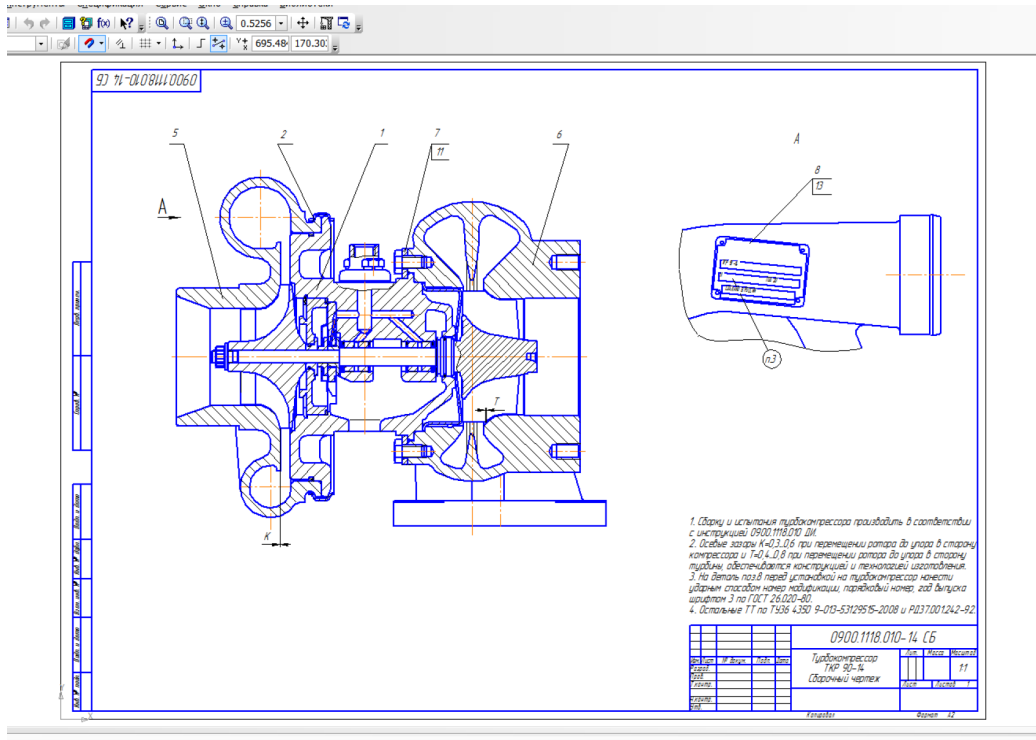


Рис. 7. Перегляд кресленика

Таблиця 1

Специфікації тестів для функції

Код та назва функції (функціоналу)	Специфікація
1. Специфікації на входи	Входом до програмного модуля є документ Kompressor, тому для тестування підготовлено два документи: багаторядковий документ на замовлення кількості продукції, яка вже є на складі, та на замовлення кількості продукції, якої немає на складі
2. Специфікації на виходи	Виходами будуть документи «Розраховані газодувки», «Креслення». Підготовлені для порівняння прораховані результати для двох вхідних документів
3. Середовина тестування	Тестування середовища, програмного коду та навантажувальне тестування проводиться автоматично під час програмування та запуску на виконання.
4. Спеціальні вимоги	Не вимагає спеціальних вимог
5. Тест. Документ Kompressor	Очікувана поведінка – під час проведення має показати наявність товару для продажу на складі; очікувана продуктивність – 100 %; очікувана достовірність – 100 %

**Висновки.** У роботі розроблено інтерфейс усіх форм модуля розрахунку собівартості, додано зв'язок з реєстрами та рахунками бази знань, а також розроблено і проведено тестування додатка. Проведено верифікацію додатка. Виявлено, що створена інформаційна система повністю відповідає технічному завданню і не має логічних помилок.

*Список використаних джерел*

1. Мацулевич О. Є., Щербина В. М., Залевський С. В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету* [Електронний ресурс]. Мелітополь : ТДАТУ, 2019. Вип. 8. Т. 1. С. 55–68.
2. Дереза О. А., Антонова Г. В., Тетервак І. А., Валієва К. М. Аналітичні дослідження методики інтелектуального аналізу даних. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : матеріали ІV Міжнар. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 29–31 травня 2023 р.) Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 147–153.



3. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Науковий вісник Національного державного аграрного університету*. 2023. № 4, pp. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>.
4. Дереза О. О., Мацулевич О. Є., Антонова Г. В., Михайленко О. Ю. Автоматизація процесу профілювання черв'ячних фрез без інтерференції. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25. Т. 2. С. 120–126.
5. Вершков О. О., Мацулевич О. Є., Тетервак І. Р., Супрун М. В. Моделювання кулачків зубозаточувальних верстатів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25. Т. 2. С. 106–110.
6. Мацулевич О. Є., Вершков О. О., Чаплінський А. П., Супрун М. В. Моделювання зубного мосту в пакеті програм DENTCAD. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25. Т. 2. С. 134–140.
7. Мацулевич О. Є., Щербина В. М., Залевський С. В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 8. Т. 1. С. 55–68.
8. Мацулевич О. Є., Щербина В. М. Використання пакета прикладних програм NETCRACKER. Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях : матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конференції з міжнар. участю (м. Мелітополь, 11–13 вересня 2017 р.). Мелітополь, 2017. С. 107–108.
9. Корчинський В. М., Свинаренко Д. М., Мацулевич О. Є. Методи підвищення інформаційних показників багатоспектральних зображень на основі ортогоналізації даних. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2014. Вип. 14 (2). С. 264–270.
10. Щербина В. М., Холодняк Ю. В., Івженко О. В. Впровадження комп'ютерної графіки в навчальний процес при підготовці фахівців інженерних спеціальностей. *Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти*. 2020. Вип. 24. С. 554–558.
11. Мацулевич О. Є., Зінов'єва О. Г. Розв'язання задач аналізу тренд-сезонних часових рядів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19 (2). С. 264–270.
12. Мацулевич О. Є., Щербина В. М., Антонова Г. В. Програмне забезпечення для автоматизованого визначення параметрів різального інструменту фрезерної обробки корпусних деталей. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2020. Вип. 20. Т. 3. С. 275–281.
13. Мацулевич О. Є., Вершков О. О., Холодняк Ю. В., Чаплінський А. П. Розробка мурашиного алгоритму для оптимізації оперативного планування робіт по збиранню врожаю кісточкових. *Плодовий сад – новітнє в теорії та практиці* : матеріали V Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 106–110.
14. Гавриленко Є. А., Чаплінський А. П., Тетервак І. Р. Розробка функціональної моделі процесу створення САПР геометричних поверхонь зубозаточувального інструменту. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 29–31 травня 2023 р.) Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 48–56.
15. Дереза О. А., Антонова Г. В., Тетервак І. А., Валієва К. М. Аналітичні дослідження методики інтелектуального аналізу даних. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 29–31 травня 2023 р.) Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 147–153.
16. Гавриленко Є. А., Холодняк Ю. В., Мірошніченко М. Ю. Алгоритм моделювання одновимірних обводів за заданими умовами. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, том 1. № 22.
17. Івженко О. В., Антонова Г. В. Реверс інжиніринг та виготовлення складної тривимірної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, том 1. № 23.
18. Михайленко О. Ю., Антонова Г. В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, том 2. № 26.
19. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
20. Івженко О. В., Антонова Г. В., Чаплінський А. П., Михайленко О. Ю. Спеціалізований програмний модуль розрахунку операційних норм часу обробки деталей сільськогосподарської техніки за умов індивіду-



альної організації праці. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології* : матеріали III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (Запоріжжя, 12–19 грудня 2022 р.) Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. С. 361–368.

*Стаття надійшла до редакції 19.10.2025*

*Стаття прийнята 05.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**O. Vershkov, O. Matsulevych, O. Mykhaylenko, I. Tetervak  
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **SOFTWARE MODULE “ENGINEERING KNOWLEDGE BASE FOR STRUCTURAL SYNTHESIS OF GAS PIPES”**

### *Summary*

In the age of information technology, the ability to work with large amounts of data is critically important, and knowledge bases are actively used for this purpose. Long-term storage and processing of information is an integral part of the functioning of almost all modern systems. Thus, information is a key resource for ensuring efficiency in any industry. Due to the growth of data flows and the need for faster processing, automation is necessary: manual operations are becoming inefficient. The quality of administrative decisions now depends on the most accurate and reliable assessment of current dynamics and potential prospects.

The behavior and motivation of the developers are quite understandable and justified. The task is set – to develop a knowledge base for the structural synthesis of gas blowers in the enterprise's design documentation system. One of the popular multi-user SKBZs and tools for quick calculation of gas blowers is selected. Finally, the system itself is created, which is a combination of a knowledge base and applications that refer to it.

After analyzing commercial software products and concluding that they are high-end and therefore very expensive, a license must be purchased for use, high-end software is required to implement these products, and a staff of high-level IT specialists is required for the smooth operation of any of the systems.

The paper presents a new software module. It provides an interface for all forms of the cost calculation module, adds links to registers and knowledge base accounts, and develops and tests the application. The application has been verified. It has been found that the created information system fully complies with the technical specifications and has no logical errors.

**Keywords:** software module, engineering knowledge base, gas blower, compressor, structural synthesis, cost, validation, verification.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-27>

УДК 514.18

Є. А. Гавриленко, д-р техн. наук  
О. Є. Мацулевич, канд. техн. наук  
Г. В. Антонова, ст. викладач  
М. В. Супрун, асистент

ORCID: 0000-0003-4501-445X  
ORCID: 0000-0001-5553-709X  
ORCID: 0000-0002-0357-6086  
ORCID: 0009-0000-5903-1336

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*  
e-mail: yevhen.havrylenko@tsatu.edu.ua

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ САМ/САД-СИСТЕМ DELCAM ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРЕСОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ

*Анотація.* Комп'ютерне моделювання виробів із полімерних матеріалів і проектування прес-форми для їх виготовлення ґрунтується на застосуванні сучасних систем автоматизованого проектування та забезпечує високу продуктивність і якість виготовлення виробів із полімерних матеріалів шляхом застосування технології лиття під тиском.

У роботі розглянуто можливості вдосконалення проектування ливарного оснащення за допомогою використання САД/САМ-систем фірми Delcam і верстатів із ЧПУ. Це дає можливість підвищити якість продукції, що досягається шляхом зменшення похибок базування через багаторазові перестановки. У разі використання цієї технології зменшується трудомісткість деталі, а отже, її собівартість.

Метою цієї роботи було сконструювати прес-форму для лиття під тиском і, крім того, розробити керуючу програму в середовищі PowerMILL для фрезерної обробки її компонентів.

*Ключові слова:* ливарне оснащення, прес-форма, кронштейн, матриця, чорнове фрезерування, чистове фрезерування, візуалізація.

*Постановка проблеми й аналіз попередніх досліджень.* У сфері виробництва полімерних побутових виробів автоматизація та оптимізація робочого процесу є критичними для виживання на ринку. Основна мета таких заходів – досягнення конкурентних переваг через гарантування якості, зменшення собівартості, скорочення термінів виконання замовлень і забезпечення гнучкості для виготовлення продукції різної конфігурації та розмірів.

*Формулювання цілей статті.* Для забезпечення виконання цих вимог найбільш вигідним є застосування автоматизованих систем проектування як самого виробу, так і технологічного оснащення (прес-форм) для його виготовлення.

Комплекс програмних продуктів (PowerSHAPE, PowerMILL, ArtCAM, FeatureCAM, Exchange, Toolmaker) ефективно застосовується в процесі розробки та виробництва всіх типів прес-форм для пластикових виробів. Ці програми є невіддільною частиною виробництва, забезпечуючи підтримку на всіх етапах: від імпорту САД-моделі замовника до контролю точності готових компонентів оснащення та тестових деталей.

*Основна частина.* Проектування ливарного оснащення починається з побудови моделі деталі.

Вихідним об'єктом для виконання цієї роботи є готова пластмасова деталь. Виконуємо необхідні наміри і за ними робимо робоче креслення відповідно до ЕСКД (рис. 1).

На початковому етапі було встановлено систему координат, що ідентична тій, яка використовується в програмному забезпеченні.

Побудова моделі стартувала зі створення перерізу центральної частини (рис. 2) та його подальшого дублювання (рис. 3).

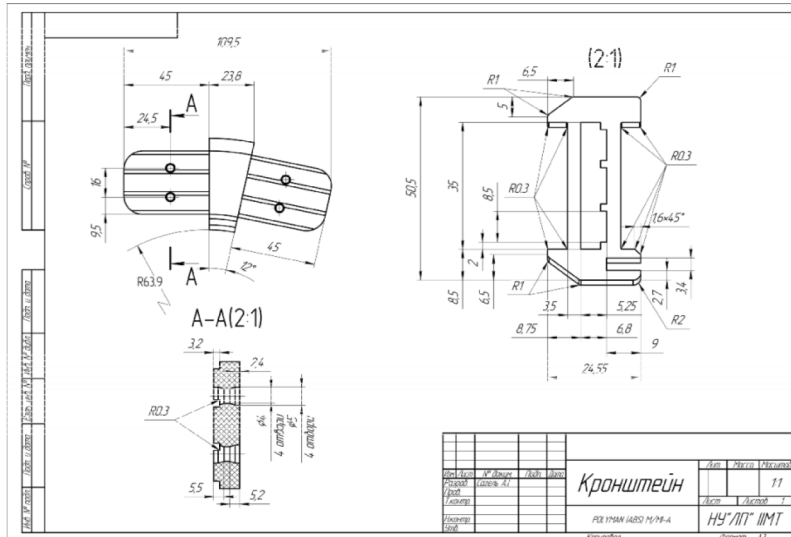


Рис. 1. Робочий кресленик кронштейна

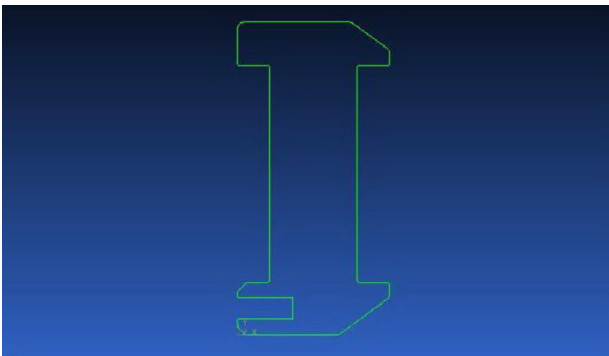


Рис. 2. Контур центральної частини

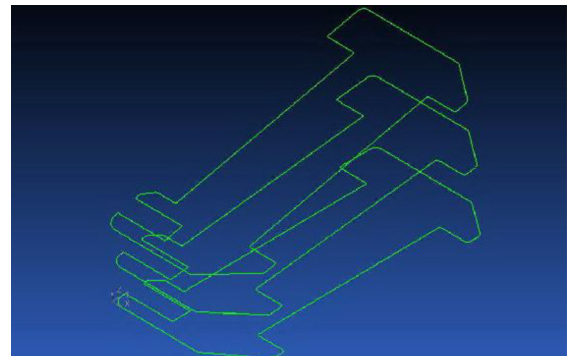


Рис. 3. Поворот контуру з копіюванням

Маючи 3 контури, ми використовували інструмент «Автоповерхня» й отримали поверхню центральної частини моделі (рис. 4).

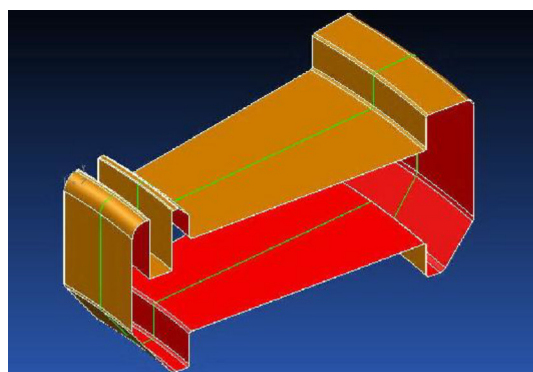


Рис. 4. Поверхня центральної частини деталі

Побудова бічного профілю потребувала попереднього введення нової системи координат. Отримавши необхідний другий контур, ми виконали створення бічної поверхні для центральної секції моделі (рис. 5).

Для побудови лівого крила моделі були створені контури, які обмежують його бічну поверхню (рис. 6).

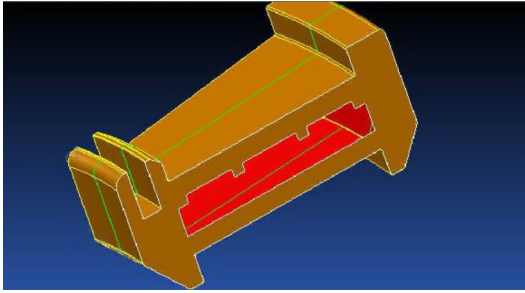


Рис. 5. Бічна поверхня центральної частини моделі

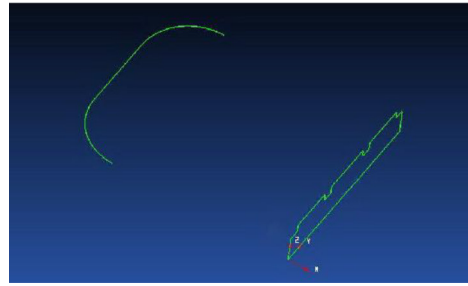


Рис. 6. Контури, які обмежують бічну поверхню моделі

За допомогою інструмента «Поверхня витягуванням» створили поверхню лівого крила й обмежувальну його поверхню. Використовуючи інструмент «Перетин поверхонь», ми отримали криву по лінії їх перетину (рис. 7 та рис. 8).

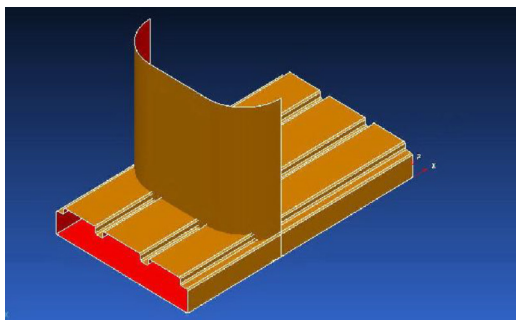


Рис. 7. Поверхня лівого крила

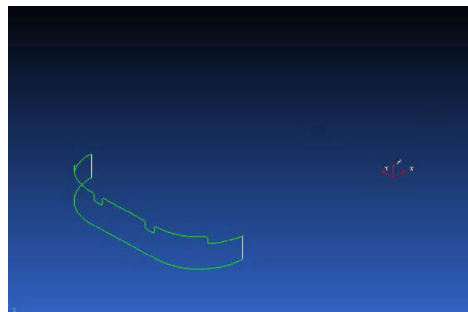


Рис. 8. Обмежувача поверхня

Далі ми редагуємо поверхню крила за допомогою інструмента «Обмежити об'єктом», вказуючи обмежувальним об'єктом створену нами лінію перетину (рис. 9). Потім, вибравши криву перетину, ми створюємо автоповерхню (рис. 10).

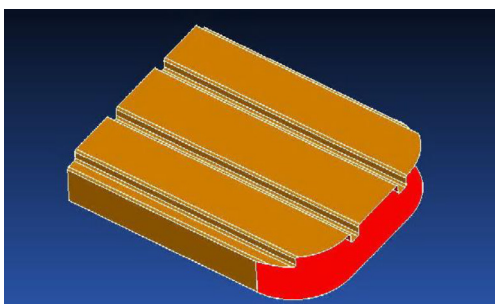


Рис. 9. Редагована поверхня лівого крила

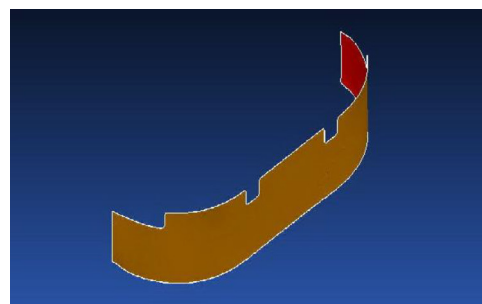


Рис. 10. Створена автоповерхня

Наступним нашим кроком стала побудова отворів. Для цього побудували профіль отвору й використали інструмент «Поверхня обертання» для створення поверхні отвору (рис. 11 та рис. 12). Далі ми використовуємо інструмент «Обмежити об'єктом», редагуємо поверхню отвору (рис. 13).

Наступне крило моделі ми побудували, використовуючи початкову систему координат та інструмент «Дзеркальне відображення» (рис. 14). Для перегляду результату використовували «Фото реалістичне відображення» моделі (рис. 15).

Працюючи з CAD-системою POWERSHAPE, потрібно відзначити її переваги:

- простий і зрозумілий інтерфейс;
- великий арсенал засобів для маніпуляцій з поверхнями;



Рис. 11. Твірна поверхні

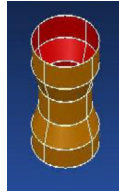


Рис. 12. Фантом поверхні отвору

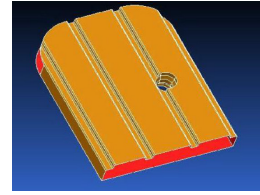


Рис.13 Відредагована поверхня отвору

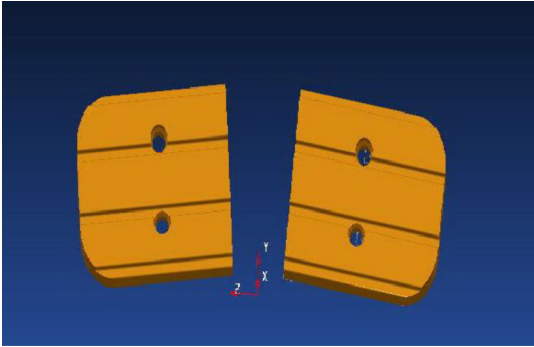


Рис. 14. Дзеркальне відображення лівого крила

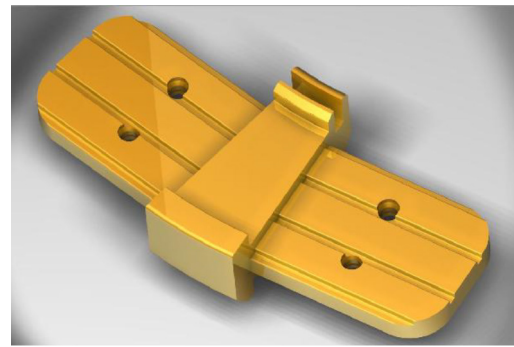


Рис. 15. Фото реалістичне відображення

- ефективного редагування поверхневих елементів;
- підтримка гібридного моделювання (одночасна робота з твердотільними та поверхневими об'єктами).

На подальшому етапі проектування потрібно вибрати площину розкриття для кронштейна.

Основні вимоги до цього вибору:

- залишення деталі в рухомій частині прес-форми після її розкриття;
- збереження форми та розмірів деталі в процесі її вилучення з оснащення.

Площину розкриття показано на рис. 16.

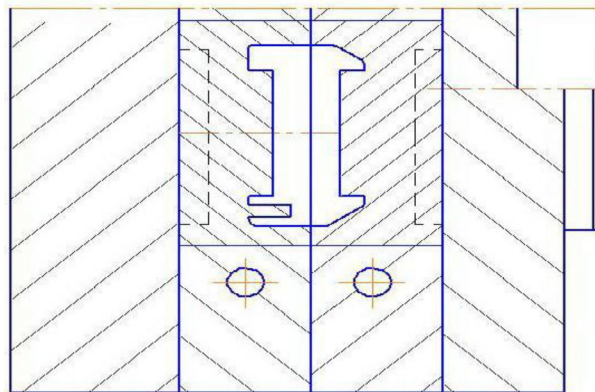


Рис.16. Площина розкриття для кронштейна

Конфігурація деталі потребує формування зовнішнього її контуру в рухомій і нерухомій матриці, тому для виштовхування деталі з прес-форми доцільно застосувати штовхачі. Для забезпечення плавного виштовхування деталі ми застосовуємо 8 штовхачів (рис. 17).

Моделювання матриці у PowerShape може здійснюватися за допомогою опції Toolmaker або шляхом традиційного проектування. Незважаючи на переваги Toolmaker, для виконання цієї роботи було вибрано класичний метод.

Побудова нерухомої матриці почалася зі створення її профілю (рис. 18). Потім за допомогою копіювання елементів було згенеровано каркас цілої матриці (рис. 19).

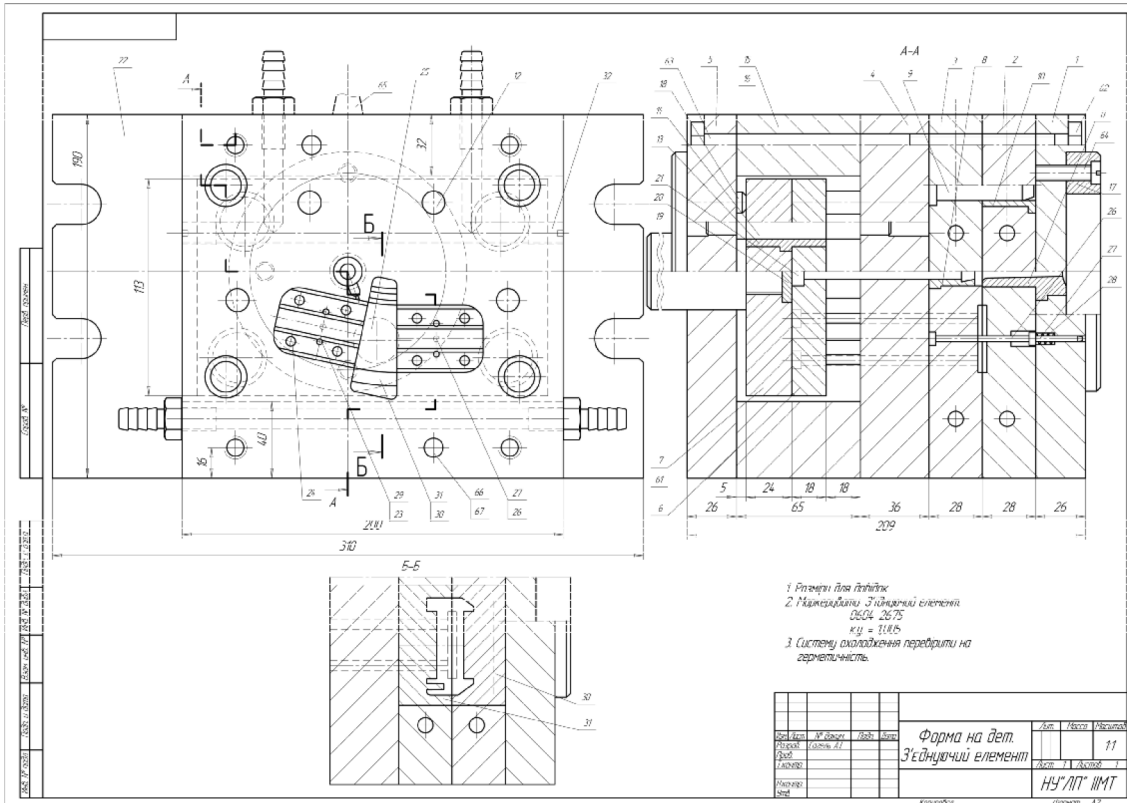


Рис. 17. Кресленик пресформи для виготовлення кронштейну

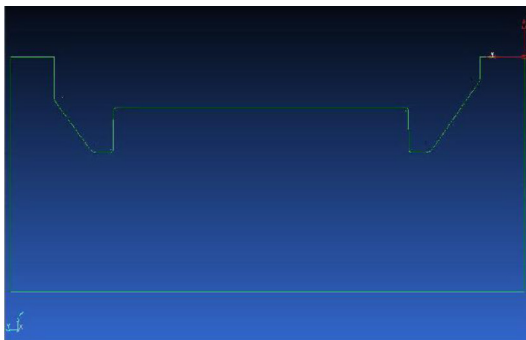


Рис. 18. Профіль матриці

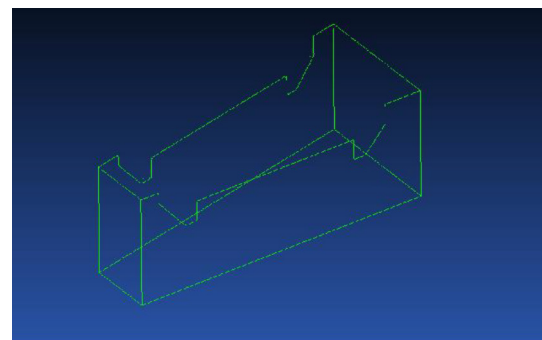


Рис. 19. Згенерований каркас цілої матриці

Подальше моделювання передбачало створення профілю верхньої секції матриці, після чого інструмент «Автоповерхня» дав змогу створити поверхневу модель (рис. 20). Роботу було завершено додаванням фаски на вертикальних крайніх гранях і побудовою бічного бурта (рис. 21). Рухома матриця була створена аналогічним чином, але на основі відмінного початкового профілю (рис. 22).

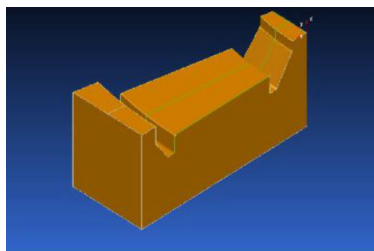


Рис. 20. Поверхнева модель матриці



Рис. 21. Нерухома матриця

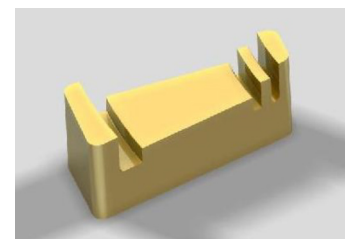


Рис. 22. Рухома матриця

Процес механічної обробки реалізовано за допомогою САМ-системи POWERMILL.

Перед початком розробки керуючих програм потрібно виконати такі операції:

- завантаження моделі в САМ-систему;
- визначення геометрії вихідної заготовки;
- встановлення настановних (базових) параметрів заготовки;
- підбір різальних інструментів;
- формування стратегій фрезерування;
- генерація та експорт результатів обробки.

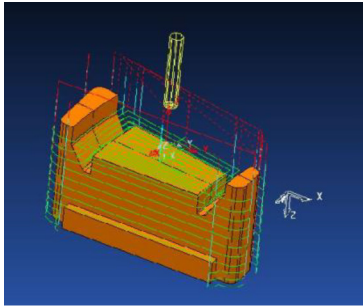


Рис. 23. Чорнове фрезерування

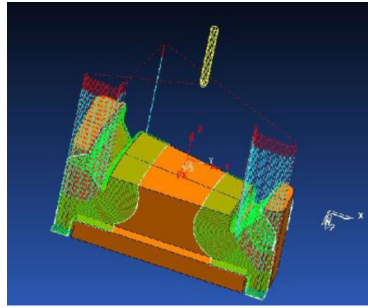


Рис. 24. Чистове фрезерування

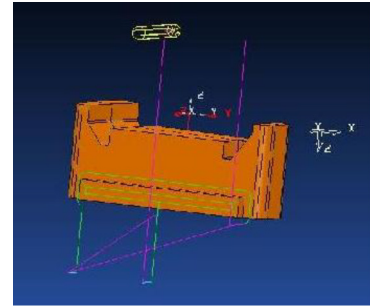


Рис.25 Остаточна чистова обробка

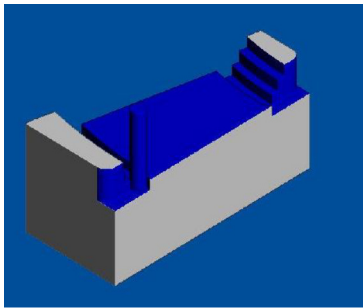


Рис. 26. Візуалізація процесу обробки за першою траєкторією

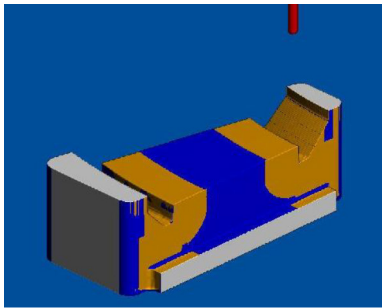


Рис. 27. Візуалізація процесу обробки за другою траєкторією

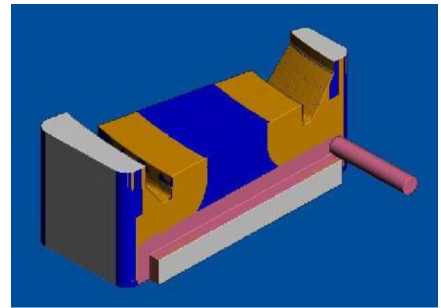


Рис. 28. Візуалізація процесу обробки за третьою траєкторією

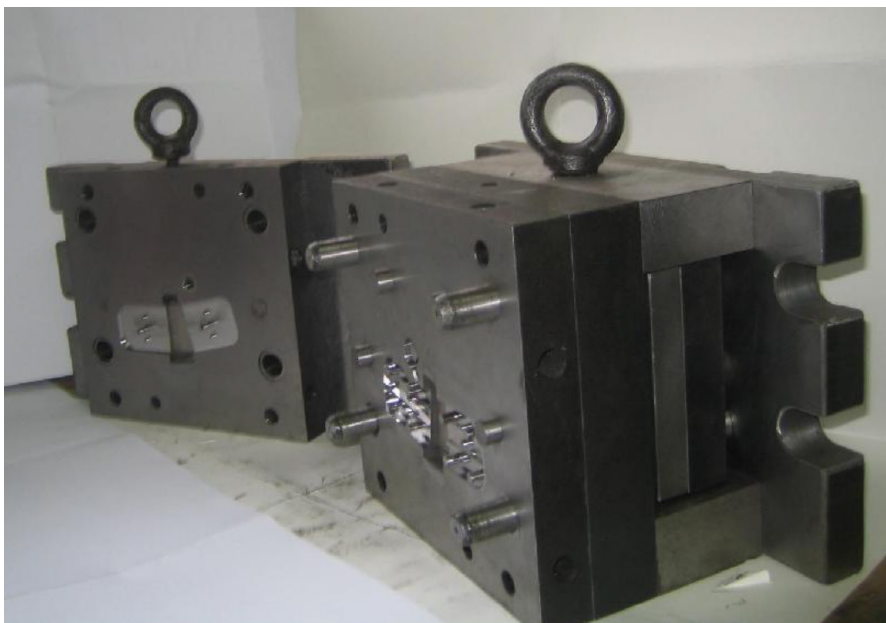


Рис. 29. Матриця прес-форми



Тривісний цикл обробки нерухої матриці поділено на такі фази:

1. Чорнове фрезерування (кінцева фреза, рис. 23).
2. Чистове фрезерування (кульова фреза, рис. 24).
3. Остаточна чистова обробка (кінцева фреза, рис. 25).

Використавши модуль ViewMill, ми зробили візуалізацію процесу обробки (рис. 26, рис. 27 та рис. 28) (різними кольорами позначено обробку за різними траєкторіями).

Проведені дослідження дозволили створити матрицю прес-форми (рис. 29).

*Висновки.* За результатами дослідження було підтверджено, що комплекс САМ/САD-систем Delcam є ефективним інструментом для оптимізації виробництва пресованих виробів. Практична цінність роботи полягає в тому, що її викладення були застосовані в процесі виробництва деталей.

#### Список використаних джерел

1. Мацулевич О. Є., Дереза О. О., Тетервак І. Р. Використання САD-системи UNIGRAPHICS для технологічної підготовки виробництва корпусних деталей. *Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти : збірник науково-методичних праць ТДАТУ*. 2023. Вип. 26. С. 166–175.
2. Мацулевич О. Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи Technologi CS при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства сільськогосподарського машинобудування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, том 1. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-13
3. Програмування автоматизованих процесів обробки деталей : навчально-методичний посібник. Лабораторний практикум / Ю. О. Дмитрієв, О. Є. Мацулевич, С. А. Гавриленко, Ю. В. Холодняк, Г. В. Антонова (протокол № 8 від 28.04.2022), Мелітополь, 2022. 170 с.
4. Мацулевич О. Є., Щербина В. М., Залевський С. В. Автоматизація процесу геометричного моделювання робочих поверхонь насадок для фонтанів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 8. Т. 1. С. 55–68.
5. Мацулевич О. Є., Зінов'єва О. Г. Розв'язання задач аналізу тренд-сезонних часових рядів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19 (2). С. 264–270.
6. Вершков О. О., Мацулевич О. Є., Тетервак І. Р., Супрун М. В. Моделювання кулачків зубозаточувальних верстатів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т 2. С. 106–110.
7. Мацулевич О. Є., Вершков О. О., Чаплінський А. П., Супрун М. В. Моделювання зубного мосту в пакеті програм DENTCAD. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. Вип. 25, т. 2. С. 134–140.
8. Alrefo I. F., Rawashdeh M. O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2024. Vol. 3. P. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>
9. Alrefo I. F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2023. Vol. 4. P. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
10. Дереза О. А., Антонова Г. В., Тетервак І. А., Валієва К. М. Аналітичні дослідження методики інтелектуального аналізу даних. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 29–31 травня 2023 р.)* Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 147–153.
11. Гавриленко С. А., Холодняк Ю. В., Мірошніченко М. Ю. Алгоритм моделювання одновимірних об'єктів за заданими умовами. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, том 1. № 22.
12. Івженко О. В., Антонова Г. В. Реверс інжиніринг та виготовлення складної тривимірної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, том 1. № 23.
13. Михайленко О. Ю., Антонова Г. В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, том 2. № 26.



14. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
15. Вершков О. О., Бондаренко Л. Ю., Антонова Г. В., Тетервак І. Р. Аналіз дослідної експлуатації програмного модулю розрахунку норм часу обробки деталей сільськогосподарської техніки. *Сучасні комп'ютерні та інформаційні системи і технології : матеріали III Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф.* (Запоріжжя, 12–19 грудня 2022 р.) Запоріжжя : ТДАТУ, 2022. С. 94–100.
16. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Моделювання кривих ліній з заданою точністю. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II Всеукраїн. наук.-практ. інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 28–31.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025

Стаття прийнята 08.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



**Ye. Havrylenko, O. Matsulevych, G. Antonova, M. Suprun  
Dmytro Motornyi Tavrria State Agrotechnological University**

## **ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF USING DELCAM SAM/CAD SYSTEMS FOR THE PRODUCTIO OF PRESSED PARTS**

### *Summary*

The modern market actively uses plastic products due to their lightness, strength, and cost-effectiveness. The most common method of manufacturing them is injection molding (which accounts for more than a third of the total volume). This process is used for serial and mass production and is inextricably linked to the development of molds. To ensure competitiveness and manufacturability, especially when working with complex products, it is necessary to use CNC machines and automated design systems.

Difficulties arise when ensuring the operational requirements for the product and the technological requirements for the design of casting equipment. To solve this problem, in our opinion, it is necessary to involve specialists who simultaneously possess the skills of automated design of casting equipment and the skills of creating design projects. This will make it possible to significantly reduce the time required for design work.

Computer modeling of polymer products and designing molds for their manufacture is based on the use of modern computer-aided design systems and ensures high productivity and quality of polymer products through the use of injection molding technology.

This work considers the possibilities of improving the design of molding equipment using Delcam CAD/CAM systems and CNC machines. In the project, processing was carried out on a three-axis CNC machine. This allows for improved product quality, achieved by reducing positioning errors through multiple repositioning. The use of this technology reduces the labor intensity of the part and, accordingly, its cost.

The aim of this work was to design a mold for die casting and, in addition, to develop a control program in the PowerMILL environment for milling its components.

**Keywords:** casting equipment, mold, bracket, die, rough milling, finish milling, visualization.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-28>

УДК 378.147:004

Г. В. Гешева, асистент

ORCID: 0000-0003-3052-4393

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: hanna.hesheva@tsatu.edu.ua

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РЕЗУЛЬТАТІВ МОНІТОРИНГОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТАЦІЇ ПЕРШОКУРСНИКІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ»

*Анотація.* Процес адаптації студентів першого курсу до вимог вищої освіти є ключовим фактором забезпечення їхнього академічного успіху та професійного розвитку. У цій статті представлено аналітичний огляд результатів моніторингового дослідження, проведеного серед студентів, які спеціалізуються на інформатиці. Дослідження зосереджено на визначенні основних викликів, з якими стикаються студенти першого курсу протягом першого року навчання, зокрема психологічної адаптації, інтеграції в академічне середовище, мотивації до навчання та соціальної взаємодії в студентській спільноті. Особлива увага приділяється ролі систем освітньої підтримки, методів навчання та використання інформаційних технологій у сприянні успішній адаптації. Результати моніторингу надають цінну інформацію про динаміку адаптації студентів першого курсу, що дає змогу сформулювати практичні рекомендації щодо вдосконалення інституційних стратегій підтримки цих студентів. Отримані результати сприяють глибшому розумінню процесу адаптації студентів технічних спеціальностей і можуть слугувати основою для подальших досліджень у галузі вищої освіти.

*Ключові слова:* академічна успішність, соціалізація студентів, навчальне середовище, мотивація до навчання, професійна орієнтація, освітня адаптація.

*Постановка проблеми.* На сьогодні тема адаптації в будь-якому середовищі є важливою складовою успіху в різних сферах – чи то в роботі, чи в навчанні. І тому ми розглядаємо тему адаптації студентів першого курсу після середнього ступеня освіти, щоб зрозуміти, що можна покращити з боку куратора та викладачів для того, щоб процес адаптації першокурсників був більш комфортним для них в умовах дистанційного навчання.

*Аналіз останніх досліджень.* Перелік останніх досліджень у напрямі адаптації студентів-першокурсників, зокрема спеціальності «Комп'ютерні науки» та суміжних ІТ-спеціальностей, які я брала до уваги в процесі написання цієї наукової статті:

- стаття 2023 року про оптимізацію процесу адаптації студентів-першокурсників у дистанційному навчанні із застосуванням цифрових технологій, що підвищує швидкість та якість засвоєння знань [2];
- звіт 2023 року моніторингового дослідження адаптації студентів першого курсу в коледжі, який передбачав анонімне анкетування з визначенням рівня адаптації [1];
- наукова стаття 2024 року про вплив адаптивного навчання на розвиток життєстійкості студентів у складних умовах із рекомендаціями щодо індивідуалізації навчального процесу [3];
- аналіз особистісних чинників психологічної адаптації першокурсників до навчання у вищому навчальному закладі, опублікований 2025 року [4];
- дослідження 2025 року, яке вивчає соціально-психологічну адаптацію студентів до освітнього середовища, визначаючи основні труднощі та напрями підтримки [5].



Ці дослідження охоплюють різні аспекти адаптації студентів, зокрема методи навчання, психологічні фактори, вплив цифрових технологій і суспільних викликів, що може бути корисно для формування моєї статті з урахуванням моніторингового дослідження.

Розглянуто ключові напрями, серед яких упровадження змішаних та дистанційних форм навчання, використання цифрових технологій для підвищення ефективності адаптації, а також соціально-психологічні аспекти адаптації в умовах сучасного освітнього середовища. Окрему увагу приділено впливу стресових чинників та життєстійкості студентів у кризових ситуаціях, зокрема під час воєнного стану. Виявлено, що, попри значний прогрес у дослідженнях, недостатньо опрацьованими залишаються питання індивідуалізації адаптаційного процесу, а також впливу зовнішніх факторів на психологічний комфорт і академічну успішність студентів ІТ-спеціальностей.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою моєї статті є аналіз адаптації студентів першого курсу спеціальності F3 «Комп'ютерні науки» для розуміння подальшої роботи зі студентами для досягнення максимальної підготовки майбутніх фахівців у галузі ІТ. Завданнями дослідження є залучення студентів до проходження опитування й аналіз відповідей із формуванням подальшого плану дій.

*Основна частина.* У рамках мого дослідження було опитано вступників після завершення здобуття загальної середньої освіти. За допомогою Google forms було складено перелік питань для визначення рівня адаптації на перших тижнях навчання та надано можливість висловити певні побажання чи проблеми, які могли виникнути в перші дні.

Кураторство – це важливий процес синергії досвідчених фахівців зі студентами. Це комплексний процес взаємодії досвідченого викладача зі студентами, що передбачає не лише обмін досвідом, а й підтримку в навчанні, соціальній адаптації та професійному самовизначенні першокурсників.

Із кожним роком молодь змінюється, тож важливо враховувати підготовку, яку можна їм дати в рамках навчання, а також додатково для розвитку й підсилення їхньої компетентності та фаховості у сфері ІТ. Адже ІТ-сфера є однією з динамічних, розвинутих галузей, тож необхідність слідкувати за трендами та «йти в ногу з часом» у цій сфері є дуже актуальною.

Опитування мало пілотний характер і відображає думку частини вибірки, тому висновки варто розглядати як орієнтовні та такі, що потребують подальшої перевірки на розширеній сукупності респондентів. У рамках дослідження з групи з 15 осіб взяли участь в опитуванні лише 33,3 % (5) студентів. Опитування було не обов'язкове, а за бажанням, це, зі свого боку, показує залученість і зацікавленість у розвитку та реагуванні на додаткові активності з боку куратора групи. У статті ми братимемо відповіді цих 5 студентів за 100 % для подальшого аналізу та висновків. Щодо особливостей цього пілотного дослідження, то до плюсів слід віднести таке:

- ми все одно маємо якісні дані, які можемо використовувати;
- це може стати підґрунтям для подальшого розширення вибірки або вдосконалення самої анкети.

Серед мінусів потрібно зазначити такі:

- надто мала вибірка. 5 студентів не відображають всю групу, тому дані не можна вважати репрезентативними;
- високий ризик похибки;
- може мати місце зміщення вибірки, оскільки існує висока ймовірність, що на запитання відповідали переважно респонденти з більшою зацікавленістю або мотивацією. Через це отримані результати можуть не повною мірою відображати загальну ситуацію в усій групі.

Серед питань зупинимо свою увагу на висвітлені й аналізі таких:

1. Якою мірою Вам зараз подобається вибрана спеціальність (рис. 1)?

Якою мірою Вам зараз подобається вибрана спеціальність?  
5 відповідей

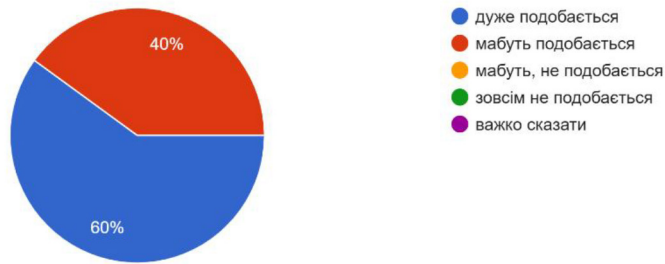


Рис. 1. Вибір спеціальності

Більша частина респондентів зазначили, що спеціальність, яку вони обрали, їм подобається, тоді як решта зазначила, що спеціальність «мабуть, подобається». Більша частина опитаних респондентів уже мають певну вісь розвитку та бачення свого навчання за вибраною спеціальністю.

### 2. Чи завжди Ви розумієте викладача на заняттях (рис. 2)?

Чи завжди Ви розумієте викладача на заняттях?  
5 відповідей

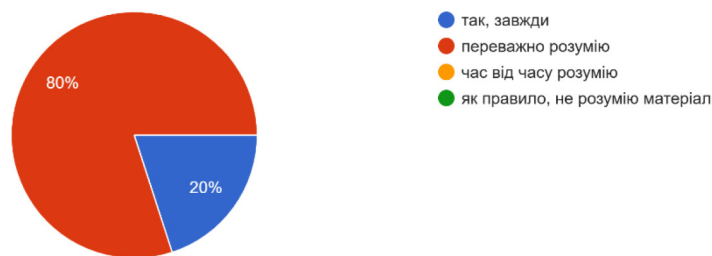


Рис. 2. Адаптація щодо розуміння викладеного матеріалу

На початкових етапах навчання у закладі вищої освіти важливо своєчасно опанувати навчальні теми, розуміти вимоги й ефективно комунікувати з викладачами. Це сприяє легшому засвоєнню знань у майбутньому й отриманню додаткового досвіду під час навчання. Більша частина респондентів зазначили, що переважно розуміють викладача, тобто можемо зробити висновки: 1) викладачі досить простою мовою пояснюють складні теми; 2) ступінь підготовки минулих абітурієнтів достатньо нормальний для сприйняття більш серйозної інформації та навчання, яке надається в освітньому процесі університету.

### 3. Що для Вас є найважчим в університеті (рис. 3)?

Що для Вас є найважчим в університеті?  
5 відповідей

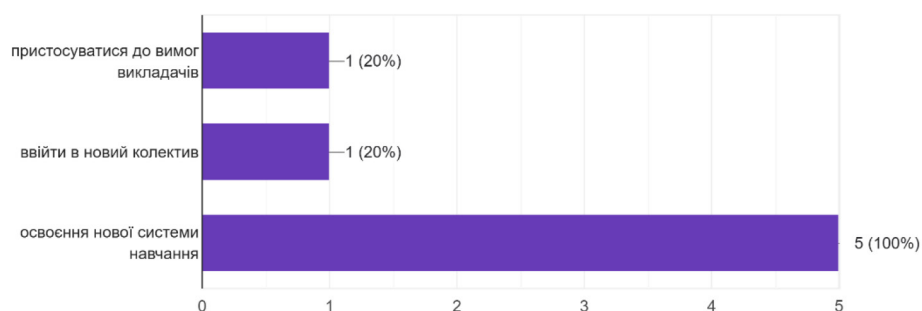


Рис. 3. Найважче в процесі адаптації

У рамках цього питання в респондентів був вибір декількох варіантів відповіді. І, аналізуючи отримані результати, можемо дійти висновку, що після здобуття середньої освіти важче відбувається перехід до нової системи навчання – кредитно-модульної системи організації навчального процесу, яка базується на Європейській кредитно-трансферній системі (ECTS – European Credit Transfer and Accumulation System). Для цього куратору слід забезпечити детальне пояснення всіх аспектів цієї системи навчання, щоб студенти могли розуміти, що від них очікують.

4. Які причини, на Вашу думку, заважають процесу адаптації до умов навчання в університеті (рис. 4)?

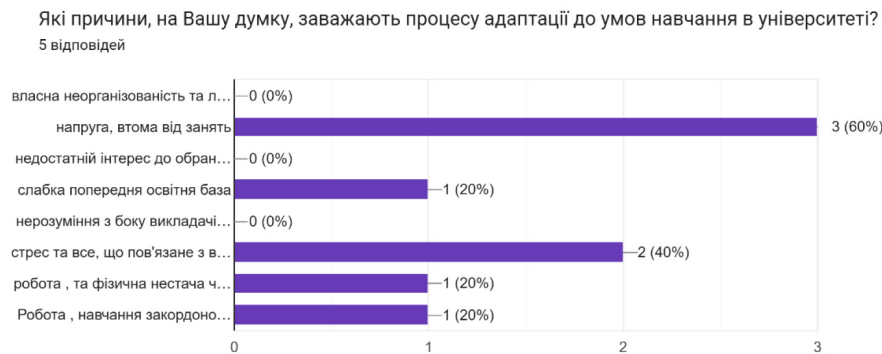


Рис. 4. Умови, які заважають процесу адаптації

У рамках цього питання респонденти також могли вибрати декілька варіантів відповіді. 60 % (3 відповіді) було надано причині «напруга, втома від занять», адже багато нової інформації, яку треба опанувати та підготуватися, складніші теми та ін.; 20 % (1 відповідь) було зазначено, що слабка попередня освітня база; 40 % (2 відповіді) – через причину стресу та все, що пов'язане з війною, адже ми живемо в такі часи, коли людина може спати лише декілька годин на добу й дуже важко потім зосереджуватися та продовжувати продуктивно працювати; серед зазначення «іншого» респонденти вписали ще свої причини: 20 % (1 відповідь) – «робота та фізична нестача часу» і ще 20 % (1 відповідь) – «робота та навчання за кордоном».

5. Якої інформації Вам не вистачає (рис. 5)?



Рис. 5. Брак інформації в процесі адаптації

По 40 % (по 2 відповіді) було зазначено серед інформації, якої не вистачає студентам, – це щодо їх прав та обов'язків і щодо студентських гуртків, студентські активності – студрада і т. ін. У перші тижні зазвичай відбувається знайомство перших курсів зі студентською радою факультету й університету, а також куратори розповідають своїм студентам більш детально про права й обов'язки для кращої адаптації та розуміння аспектів і засад навчання.

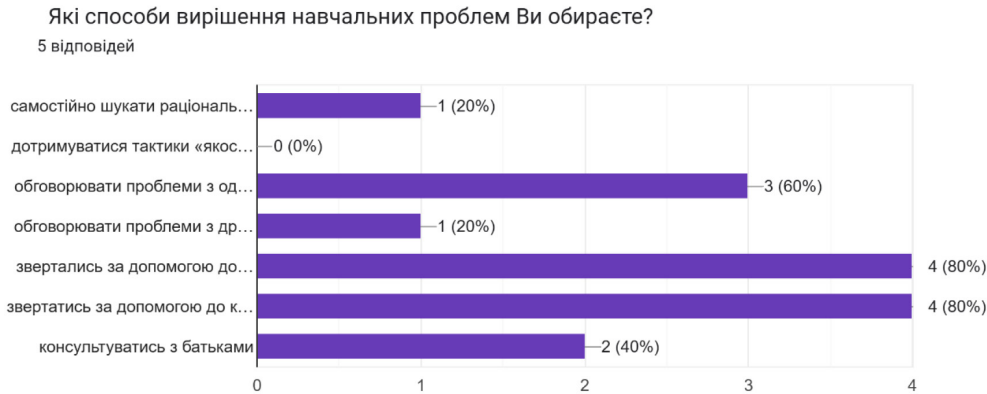


Рис. 6. Способи вирішення навчальних проблем

### 6. Які способи вирішення навчальних проблем Ви обираєте (рис. 6)?

80 % опитаних (4 відповіді) вибрали «звертатися по допомогу до викладачів» та «звертатися по допомогу до куратора»; 60 % (3 відповіді) – «обговорювати проблеми з одногрупниками», тож можемо дійти висновку, що відносини в групі складаються добре; по 20 % (по 1 відповіді) вибрали «обговорення проблем із друзями» та «самостійно шукати раціональні способи вирішення проблемних ситуацій». Важливою деталлю є те, що жоден респондент не вибрав варіант «дотримуватися тактики «якось все владнається», нічого не робити».

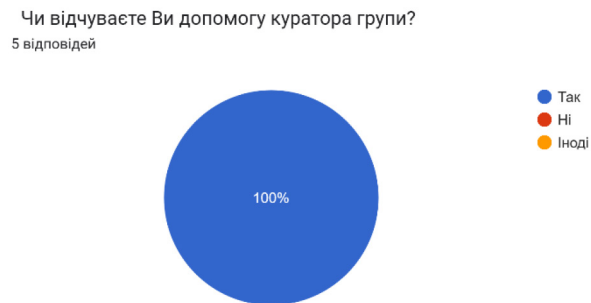


Рис. 7. Допомога куратора

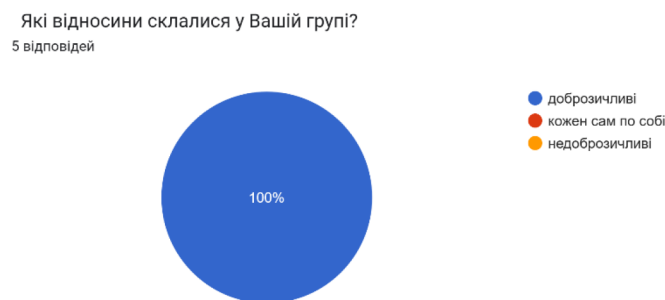


Рис. 8. Відносини в групі

7 і 8. Питання стосувалися відносин у групі та допомоги куратора (рис. 7, рис. 8).

Одноголосно респонденти відзначили, що куратор групи допомагає та підтримує їх у процесі адаптації і відносини в групі склалися доброзичливі. Від себе додам, що важливою складовою є те, що в чаті групи відбувся процес знайомства, де кожен декількома реченнями описав себе та представився групі, що послугувало налагодженню зв'язків і знайомству одногрупників один з одним.

*Висновки.* У рамках цього дослідження було зібрано відгуки щодо адаптації до навчального процесу студентами першого курсу спеціальності «Комп'ютерні науки», щоб виявити та про-



аналізувати вектор навчання на кураторських годинах, а також на залучення додаткових активностей, які сприятимуть розвитку студентів для того, щоб вони стали висококваліфікованими фахівцями у вибраній галузі. Проаналізувавши відповіді респондентів, ми дійшли висновків, які дадуть нам можливість у майбутньому запланувати наступні кроки для подальшого розвитку наших студентів. Залежно від отриманих відповідей студентів куратор групи може краще розуміти контингент: наскільки вони вже орієнтуються у вибраній галузі (за наявності попередньої підготовки) та наскільки складно їм адаптуватися до нового для них середовища.

Перспективою подальших досліджень цієї теми є розширення вибірки, вдосконалення самої анкети, а також аналіз причин відсутності залученості з боку студентів до проходження такого виду активності.

#### *Список використаних джерел*

1. Тернопільський кооперативний фаховий коледж. Моніторингове дослідження адаптації студентів-першокурсників. Звіт за 2023 р. Тернопіль, 2023. 40 с. URL: <https://www.tkfk.te.ua/wpcontent/uploads/2023/10/%D0%90%D0%BD%D0%BA%D0%B5%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F.pdf> (дата звернення: 01.10.2025).

2. Іваненко І. І., Петрова О. О. Адаптація студентів-першокурсників у дистанційному навчанні із застосуванням цифрових технологій. *Вісник СумДУ*. 2023. № 5. С. 45–54. URL: <https://journals.spu.sumy.ua/index.php/sport/article/view/128> (дата звернення: 01.10.2025).

3. Коваленко М. М. Вплив адаптивного навчання на розвиток життєстійкості студентів. *Освіта і суспільство*. 2024. № 3. С. 30–40. URL: <https://ess.npu.edu.ua/index.php/ess/article/view/140> (дата звернення: 01.10.2025).

6. Савченко С. С. Особистісні чинники психологічної адаптації студентів-першокурсників. *Вісник КНУ*. 2025. № 8. С. 18–27. URL: <https://elibrary.kubg.edu.ua/id/eprint/52999> (дата звернення: 01.10.2025).

7. Мельник О. О. Соціально-психологічні аспекти адаптації студентів до навчального середовища. *Габітус*. 2022. № 33. С. 5–15. URL: <http://habitus.od.ua/journals/2022/33-2022/21.pdf> (дата звернення: 01.10.2025).

*Стаття надійшла до редакції 23.10.2025*

*Стаття прийнята 15.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**H. Heshva**

**Dmytro Motornyi Tavia State Agrotechnological University**

## **ANALYTICAL REVIEW OF MONITORING STUDY RESULTS ON THE ADAPTATION OF FIRST-YEAR COMPUTER SCIENCE STUDENTS**

### *Summary*

The process of adapting first-year students to the requirements of higher education is a key factor in ensuring their academic success and professional development. This article presents an analytical review of the results of a monitoring study conducted among students majoring in Computer Science. The study focuses on identifying the main challenges faced by first-year students during their initial year of study, including psychological adjustment, integration into the academic environment, motivation for learning, and social interaction within the student community. Special attention is paid to the role of educational support systems, teaching methods, and the use of information technologies in facilitating successful adaptation. The results of the monitoring provide valuable insights into the dynamics of first-year students' adjustment, enabling the formulation of practical recommendations to improve institutional strategies for supporting these students. The findings contribute to a deeper understanding of the adaptation process in technical specialities and may serve as a basis for further research in the field of higher education.

**Keywords:** academic performance, student socialization, learning environment, learning motivation, career guidance, educational adaptation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-29>

УДК 537.311.33

А. Ф. Дяденчук, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6625-9985

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: [alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua](mailto:alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua)

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ CUO/POROUS-SI/SI

*Анотація.* У статті проведено чисельне моделювання в середовищі Matlab електричних характеристик гетероструктур CuO/porous-Si/Si та CuO/Si на основі рівняння Пуассона. Проаналізовано розподіл електростатичного потенціалу й електричного поля, визначено вплив поруватого шару та діелектричних властивостей матеріалів на ефективність переносу носіїв заряду. Встановлено, що включення поруватого шару сприяє більш плавному спаду потенціалу, покращує поділ носіїв заряду та мінімізує рекомбінаційні втрати. Досліджено залежність електричних параметрів від товщини шару CuO та діелектричної проникності поруватого кремнію. Оптимальна товщина CuO визначається в межах 200–300 нм для балансу між поглинанням світла і транспортом носіїв заряду. Практична цінність роботи полягає в обґрунтуванні оптимальних параметрів для створення ефективних сонячних елементів.

*Ключові слова:* гетероструктури CuO/Si, поруватий шар, електричне поле, Matlab, фотоелектричне перетворення, діелектрична проникність.

*Постановка проблеми.* Гетероструктури CuO/Si мають унікальні електричні й фізичні властивості, які можуть суттєво підвищити ефективність фотоелектричного перетворення [1; 2]. Однак включення проміжного поруватого шару в структуру впливатиме на рівень функціональності структури. Зважаючи на важливість детального аналізу впливу проміжного поруватого шару на електричні властивості структури, доцільно дослідити взаємозв'язок між фізичними параметрами шару та його впливом на ефективність фотоелектричного перетворення. Одним із перших етапів цього дослідження, який є економічно вигідним і дає змогу отримати базові висновки, є чисельне моделювання. Воно забезпечує можливість детального аналізу та сприяє оптимізації параметрів структури.

Порівняння структур CuO/porous-Si/Si і CuO/Si допомагає встановити їх переваги й обмеження, а отримані результати можуть бути використані для створення нових поколінь пристроїв відновлюваної енергетики, які відповідають сучасним екологічним і промисловим викликам. Актуальність дослідження визначається зростаючим попитом на високоефективні фотовольтаїчні пристрої у зв'язку з глобальним переходом до відновлюваних джерел енергії.

*Аналіз останніх досліджень.* У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється вивченню гетероструктур CuO/Si завдяки їх унікальним електричним і фізичним властивостям, які відкривають нові можливості для підвищення ефективності фотоелектричного перетворення. CuO має моноклінну елементарну комірку та непряму заборонену зону в діапазоні 1,2–1,6 eV [3–5]. Оскільки це включає в себе оптимальну заборонену зону 1,4 eV для фотоелектричного пристрою з одним р–п-переходом, вона більше підходить для збору видимого світла та застосування відновлюваної енергії. У роботах [6–8] досліджено вплив різних методів формування гетероструктур на їх електричні характеристики, а також вивчено механізми взаємодії між шарами CuO і Si.

Окремо розглядається роль поруватого шару в структурі, що може суттєво впливати на функціональність пристроїв. Наприклад, у дослідженнях [9; 10] було показано, що включення поруватого шару дає змогу оптимізувати параметри структури, однак потребує детального аналізу для уникнення негативного впливу на електричні властивості.

Перед процесом виготовлення структур важливо провести чисельне моделювання, яке дає можливість попередньо оцінити вплив фізичних параметрів поруватого шару на електричні характеристики гетероструктур [11]. Чисельне моделювання, як зазначено в роботах [12–14], дає змогу не лише оцінити вплив поруватого шару, але й визначити оптимальні параметри для створення високоефективних фотовольтаїчних пристроїв.

Актуальним залишається питання оптимізації параметрів гетероструктур для забезпечення максимальної ефективності фотоелектричних пристроїв.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою статті є чисельне моделювання електричних характеристик гетероструктур CuO/porous-Si/Si та CuO/Si для оптимізації параметрів сучасних фотовольтаїчних систем.

*Основна частина.* У напівпровідникових гетероструктурах, у тому числі і в CuO/porous-Si/Si та CuO/Si, розподіл електричного потенціалу й електричного поля відіграє ключову роль у визначенні механізмів переносу заряду. Для опису просторового розподілу електростатичного потенціалу  $V(x)$  у структурі CuO/Si з поруватим і без поруватого шару кремнію використовуємо рівняння Пуассона [15]:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0\epsilon_r(x)}, \quad (1)$$

де  $V(x)$  – електростатичний потенціал,  $\rho(x)$  – об’ємна густина заряду, яка визначається концентрацією акцепторних і донорних домішок,  $\epsilon_0$  – діелектрична стала вакууму,  $\epsilon_r(x)$  – відносна діелектрична проникність матеріалу, яка може змінюватися залежно від шару,  $x$  – координата в напрямку росту гетероструктури. Моделювання проводилось у середовищі Matlab. Параметри структур і сталі наведено в таблиці 1.

Графік, представлений на рис. 1, демонструє результати розв’язання рівняння Пуассона. Для гетероструктури CuO/porous-Si/Si пік потенціалу  $\sim 9$  В спостерігається на глибині 50 нм, що відповідає шару CuO, на відміну від піка потенціалу для гетероструктури CuO/Si ( $\sim 4$  В). Після піка потенціал швидко спадає через шар porous-Si і стабілізується в кремнії. Однак за відсутності поруватого шару наявний різкий спад потенціалу після шару CuO. Більш плавним спадом потенціалу у porous-Si структура забезпечує додаткове управління рухом електронів і дірок, а стабілізація потенціалу в Si забезпечує більш ефективне транспортування носіїв заряду до електродів.

Таблиця 1

Фізичні параметри шарів і домішок у структурі

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Концентрація домішок, $\text{cm}^{-3}$ донори в Si акцептори в CuO акцептори в porous Si	$1 \cdot 10^{16}$ $5 \cdot 10^{18}$ $1 \cdot 10^{18}$	Діелектричні проникності CuO porous Si Si	18 7 11,7
Товщина шарів, нм CuO porous Si Si	50 100 2000	Діелектрична стала вакууму, Ф/м Заряд електрона, Кл	$8,85 \cdot 10^{12}$  $1,6 \cdot 10^{19}$

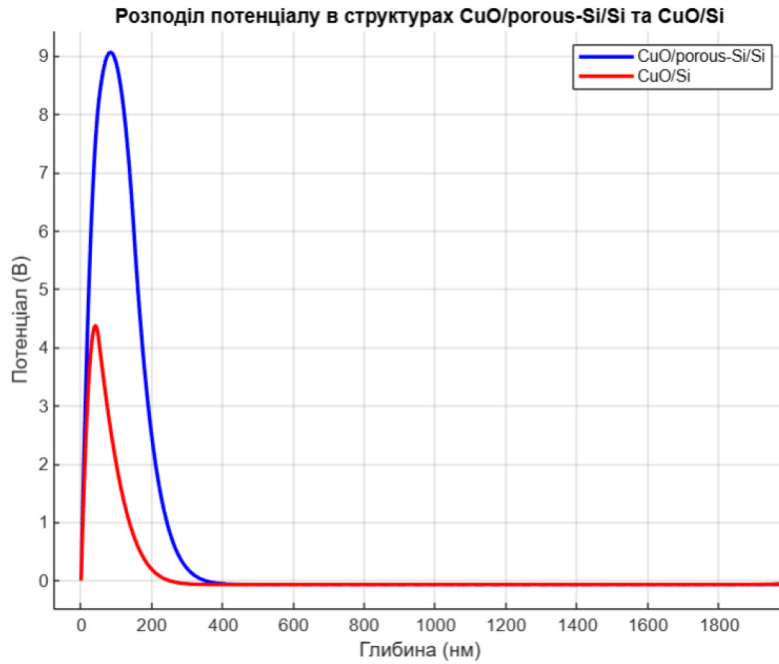


Рис. 1. Розподіл потенціалу в структурах CuO/porous-Si/Si та CuO/Si

Важливу інформацію про поведінку електричного поля в різних частинах гетероструктури надає розподіл електричного поля, який отримано як градієнт потенціалу  $V(x)$ :

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}. \quad (2)$$

Крива CuO/porous-Si/Si показує значні зміни електричного поля на межах між шарами CuO, porous-Si і Si, електричне поле стабілізується ближче до кремнію. Крива CuO/Si має менші



Рис. 2. Розподіл електричного поля в структурах CuO/porous-Si/Si та CuO/Si

зміни електричного поля і більш простий спад через відсутність додаткового бар'єра, який створює porous-Si. У структурі CuO/porous-Si/Si електричне поле має вищий пік, що забезпечує кращий поділ електронів і дірок, генерованих світлом, з іншого боку простий профіль поля у CuO/Si може бути менш ефективним для поділу носіїв. Шар CuO створює високий пік електричного поля через значну концентрацію акцепторів і низьку товщину, що сприяє поділу носіїв заряду. Проміжний шар porous-Si створює ширший градієнт.

Таким чином, включення поруватого шару в структуру CuO/Si значно покращує її характеристики, роблячи цю гетероструктуру оптимальнішою для застосування в сонячних елементах, тоді як структура без поруватого шару підходить для менш складних пристроїв.

Далі проведено дослідження впливу товщини шару CuO на електричний бар'єр і поділ носіїв заряду у структурі CuO/porous-Si/Si. Товщина шару CuO вибиралася в межах 100–500 нм, з кроком 100 нм, при цьому товщина шару porous-Si фіксувалася на значенні 100 нм. Представлені на рис. 3 графіки відображають розподіл потенціалу у структурі CuO/porous-Si/Si залежно від товщини шару CuO.

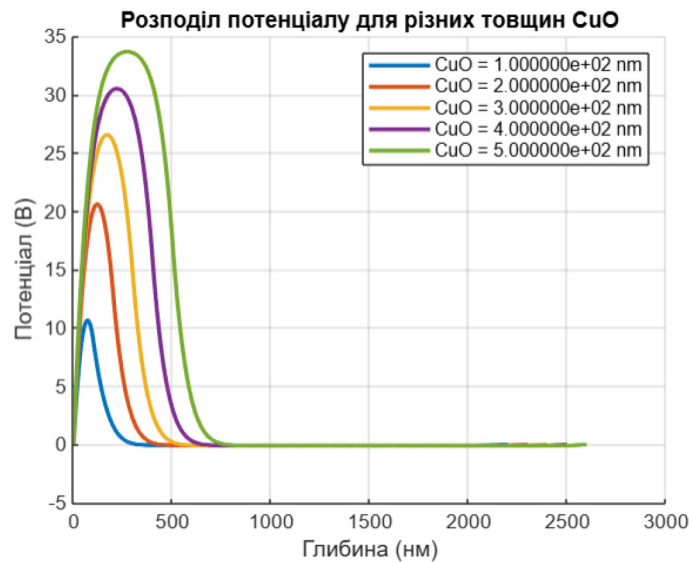


Рис. 3. Розподіл потенціалу в гетероструктурі CuO/porous-Si/Si для різних товщин CuO

Відповідно до моделювання потенціал має пік на поверхні CuO, який зростає зі збільшенням товщини цього шару. Високий початковий потенціал створює достатнє електричне поле для ефективного поділу електронів і дірок. Шари porous-Si і Si забезпечують транспорт носіїв до електродів. Спад потенціалу через porous-Si створює зону збору й направлення носіїв, а стабілізація у кремнії сприяє ефективному транспорту. Оптимальна товщина CuO для балансу між поглинанням світла і транспортом носіїв становить ~200–300 нм. Енергетичні бар'єри, які формуються в структурі, допомагають мінімізувати втрати через рекомбінацію. Водночас дефекти porous-Si можуть підвищити ризик рекомбінації носіїв і потребують врахування під час виготовлення структур.

Оскільки діелектрична проникність поруватого кремнію змінюється зі зміною поруватості, це суттєво впливає на розподіл електричного поля та потенціалу, що може змінювати ефективність структури. У випадку поруватого Si діелектрична проникність залежить від поруватості  $P$ . Значення  $\epsilon_{\text{porous-Si}}$  може бути виражено через суміш діелектричних властивостей кремнію та поруватого середовища й описано приблизною моделлю Максвелла – Гарнетта [16]:

$$\epsilon_{\text{porous-Si}} = \epsilon_{\text{Si}}(1 - P) + \epsilon_{\text{air}}P, \quad (3)$$

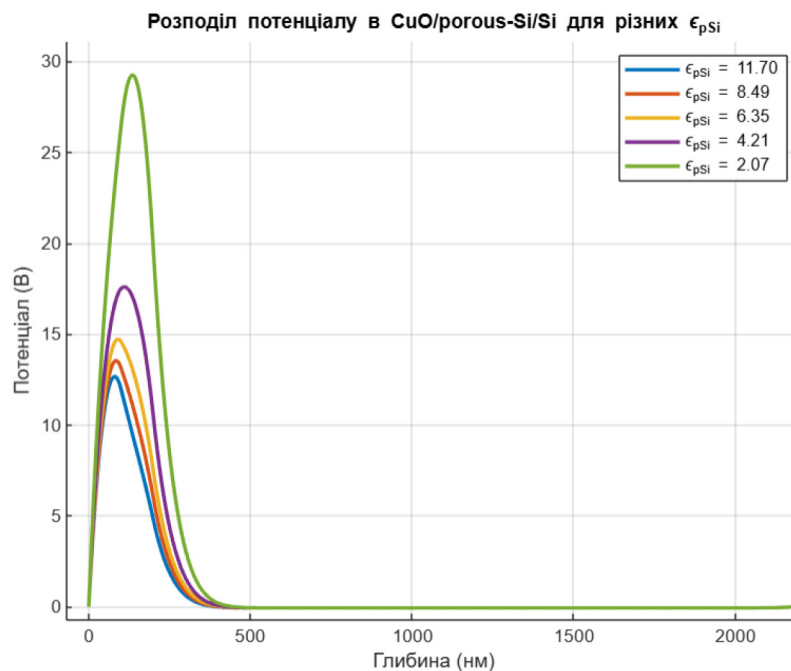
де  $\epsilon_{Si}$  – діелектрична проникність кремнію (близько  $11.7\epsilon_0$ ),  $\epsilon_{air}$  – діелектрична проникність повітря ( $\epsilon_0 = 1$ ),  $P$  – поруватість (від 0 до 1). В таблиці 2 наведено значення діелектричної проникності поруватого Si для різних значень поруватості.

Таблиця 2

алежність діелектричної проникності від поруватості в шарі porous-Si

Поруватість, $P$ (%)	Діелектрична проникність, $\epsilon_{porous-Si}$
0	11,7
30	8,49
50	6,35
70	4,21
90	2,17

Результати, представлені на рис. 4, демонструють залежність розподілу потенціалу в структурі CuO/porous-Si/Si від діелектричної проникності поруватого кремнію ( $\epsilon_{porous-Si}$ ). Найвищий піковий потенціал спостерігається для найбільшої діелектричної проникності ( $\epsilon_{porous-Si} = 11,70$ ), що підтверджує її значний вплив на формування електричного бар'єра. Зменшення  $\epsilon_{porous-Si}$  призводить до суттєвого зниження пікового потенціалу, що свідчить про менший вплив на поділ носіїв заряду.

Рис. 4. Розподіл потенціалів у структурі CuO/porous-Si/Si для різних значень  $\epsilon_{porous-Si}$ 

Потенціал стрімко падає після досягнення піка, показуючи різкий градієнт у porous-Si, що зумовлено зміною діелектричних властивостей і товщини шару. На більших глибинах потенціал стабілізується у кремнії, що важливо для транспорту носіїв до електродів.

Таким чином, підвищення  $\epsilon_{porous-Si}$  забезпечує більш плавний перехід потенціалу, покращуючи поділ носіїв заряду завдяки ширшому електричному бар'єра. Низькі значення  $\epsilon_{porous-Si}$  створюють менший градієнт потенціалу, що може обмежувати ефективність структури.

**Висновки.** Таким чином, включення шару porous-Si у гетероструктуру CuO/Si забезпечує більш плавний спад електростатичного потенціалу, що сприяє ефективнішому транспортуванню носіїв заряду та зменшенню рекомбінаційних втрат. Розрахунки показують, що максимальний пік потенціалу в структурі CuO/porous-Si/Si ( $\sim 9$  В) спостерігається на межі CuO,



тоді як для CuO/Si він значно нижчий (~4 В). Дослідження залежності потенціалу від товщини шару CuO показало, що за товщини 200–300 нм забезпечується оптимальний баланс між ефективним поглинанням світла та поділом носіїв заряду. Досліджено залежність електричного поля від діелектричної проникності поруватого кремнію. Отримані результати підтверджують, що використання проміжного шару porous-Si є перспективним для покращення характеристик сонячних елементів, а оптимізація його параметрів дасть можливість підвищити ефективність фотоелектричних пристроїв.

#### Список використаних джерел

1. Yigit Gezgin S., Baturay Ş., Ozaydin C., & Kilic H.S. Experimental and Theoretical Investigation of Zr-Doped CuO/Si Solar Cell. *Physica Status Solidi (A)*. 2024. Vol. 221 (14). P. 2400112. <https://doi.org/10.1002/pssa.202400112>
2. Kotbi A., Lejeune M., Barroy P., Alaoui I.H., Zeinert A., & Jouiad, M. High photovoltaic performances of a p-CuO/n-Si heterojunction prepared by a simple fabrication method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2025. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10971-025-06699-4>
3. Song H. J., Seo M. H., Choi K. W., Jo M. S., Yoo J. Y., Yoon J. B. High-Performance Copper Oxide Visible-Light Photodetector via Grain-Structure Model. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9 (1). P. 7334. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43667-9>
4. Wong T. K. S., Zhuk S., Masudy-Panah S., Dalapati G. K. Current Status and Future Prospects of Copper Oxide Heterojunction Solar Cells. *Materials (Basel)*. 2016. Vol. 9 (4). P. 271. <https://doi.org/10.3390/ma9040271>
5. Wang Y., Lany S., Ghanbaja J., Fagot-Revurat Y., Chen Y. P., Soldera F., Horwat D., Mucklich F., & Pierson J. F. Electronic structures of Cu<sub>2</sub>O, Cu<sub>4</sub>O<sub>3</sub>, and CuO: A joint experimental and theoretical study. *Physical Review B*. 2016. Vol. 94 (24). P. 245418. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.245418>
6. Abdel-Wahab M. S., Hammad A. H., Jilani A., Alshahrie A., Melaibari A. A. Improvement the morphology, surface roughness, and some physical properties of sputtered CuO thin films by Si. *Optical and Quantum Electronics*. 2021. Vol. 53 (7). P. 374. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03039-y>
7. Hassan M. A., Mohsin M. H., & Ismail R. A. Preparation of high-responsivity strontium-doped CuO/Si heterojunction photodetector by spray pyrolysis. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023. Vol. 34 (10). P. 912. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10348-3>
8. Alkhayatt A. H. O., Jaafer M. D., Al Alak H. H. A., & Ali A. H. Characterization of CuO/n-Si pn junction synthesized by successive ionic layer adsorption and reaction method. *Optical and Quantum Electronics*. 2019. Vol. 51. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11082-019-1951-4>
9. Dyadenchuk A., Domina N., Oleksenko R. Simulation of Solar Element Characteristics Based on Porous Silicon. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine. 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005773>
10. Dzhaferov T., Bayramov A. Porous silicon and solar cells. *Handbook of Porous Silicon: Second Edition*. 2018. Vol. 2 (2). P. 1479–1492. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71381-6_95)
11. Дмитрук М. Л., Барлас Т. Р., Сердюк В. О. Пористі напівпровідники АЗВ5: технологія електрохімічного пороутворення, структура та оптичні властивості (Огляд). *Фізика і хімія твердого тіла*. 2010. Т. 11 (1). С. 13–33.
12. Dyadenchuk A. F., Oleksenko R. I. Simulation photoconverters of porous-Si/Si with different anti-reflective coatings. *International Journal of Mathematics and Physics*. 2023. Vol. 14 (2). P. 89–94. <https://doi.org/10.26577/ijmph.2023.v14.i2.010>
13. Faltakh H., Bourguiga R., Rabha M. B., Bessais B. Simulation and optimization of the performance of multicrystalline silicon solar cell using porous silicon antireflection coating layer. *Superlattices and Microstructures*. 2014. Vol. 72. P. 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.04.011>
14. Banerjee M., Dutta S.K., Gangopadhyay U., Majumdar D., & Saha H. Modeling and simulation of layer-transferred thin silicon solar cell with quasi monocrystalline porous silicon as active layer. *Solid-state electronics*. 2005. Vol. 49 (8). P. 1282–1291. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2005.06.019>
15. Монастирський Л. С., Оленич І. Б., Соколовський Б. С. Моделювання розподілу електростатичного потенціалу у поруватому кремнії. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2019. Т. 17 (3). С. 519–528.



16. Ушенін Ю. В., Христосенко Р. В., Самойлов А. В., Громовой Ю. С., Каганович Е. Б., Манойлов Е. Г.,... Снопко Б. А. Тонкі плівки пористого оксиду алюмінію, одержані імпульсним лазерним осадженням, для поверхневих плазмон-поляритонних сенсорних структур. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2012. Т. 13, № 1. С. 259–264.

*Стаття надійшла до редакції 17.10.2025*

*Стаття прийнята 03.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**A. Dyadenchuk**

**Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University**

## **NUMERICAL MODELING OF THE PHOTOCONVERTING HETEROSTRUCTURE CUO/POROUS-SI/SI**

### *Summary*

This paper presents a numerical simulation in the Matlab environment of the electrical characteristics of CuO/porous-Si/Si and CuO/Si heterostructures based on Poisson's equation. The spatial distribution of electrostatic potential and electric field was analyzed, and the influence of the porous layer and the dielectric properties of materials on charge carrier transport efficiency was determined. The results indicate that including a porous silicon layer ensures a smoother potential drop, improves charge carrier separation, and minimizes recombination losses. The dependence of the electrical parameters on the CuO layer thickness and the dielectric permittivity of porous silicon was investigated. The simulation showed that the potential peak in the CuO/porous-Si/Si structure (~9 V) is significantly higher than in CuO/Si (~4 V), highlighting the role of the porous layer in forming the electric barrier. The analysis of CuO layer thickness (ranging from 100 nm to 500 nm) demonstrated that an optimal thickness of 200–300 nm provides a balance between light absorption and charge carrier transport. Additionally, the dielectric permittivity of porous silicon was found to significantly impact the electric field distribution, with lower values leading to a reduced potential barrier, which may limit carrier separation efficiency. The study confirms that the presence of a porous-Si intermediate layer enhances the overall efficiency of the heterostructure by forming a wider electric barrier and facilitating charge transport. The practical significance of this work lies in substantiating optimal design parameters for the development of efficient solar cell structures.

**Keywords:** CuO/Si heterostructures, porous layer, electric field, Matlab, photoelectric conversion, dielectric constant

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-30>

УДК 004.825

О. Г. Зінов'єва, ст. викл.

ORCID: 0000-0003-760-8952

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: olha.zinovieva@tsatu.edu.ua

## ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЗРОШЕННЯ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

*Анотація.* Сучасне сільське господарство стикається із численними викликами, серед яких – зміна клімату, дефіцит води та потреба в підвищенні врожайності. У зв'язку із цим системи зрошення стають ключовим фактором для забезпечення стійкого агровиробництва. У статті досліджується застосування алгоритму нечіткого логічного висновку Мамдані для оптимізації систем автоматизованого зрошення сільськогосподарських культур. Запропоновано нечітку модель керування процесом поливу з використанням експертних знань агрономів. Наведено приклади побудови функцій належності для основних лінгвістичних змінних, продемонстровано процес фазифікації та формування правил типу «ЯКЩО – ТО». Модель дає змогу визначити оптимальний обсяг поливу з урахуванням вологості ґрунту, температури повітря та ймовірності опадів. Розглянуто приклад практичного обчислення інтенсивності зрошення й описано переваги використання алгоритму Мамдані порівняно з традиційними методами. Використання цього алгоритму дає змогу поліпшити управління водними ресурсами, скоротити затрати й підвищити ефективність руйнування.

*Ключові слова:* нечітка логіка, оптимізація зрошення, алгоритм Мамдані, автоматизація сільського господарства, інтелектуальні системи.

*Постановка проблеми.* Раціональне використання водних ресурсів у сільському господарстві є однією з ключових проблем сучасного землеробства. В Україні, де площі зрошуваних земель становлять понад 500 тисяч гектарів, проблема ефективного водокористування набуває особливої актуальності, особливо в контексті кліматичних змін та підвищення посушливості південних регіонів. Традиційні системи зрошення базуються на фіксованих графіках подачі води або простих порогових значеннях вологості ґрунту, що не враховують комплексний вплив метеорологічних умов, стадії розвитку рослин та інші фактори.

Процес прийняття рішень щодо зрошення характеризується високим рівнем невизначеності та нечіткості вхідних даних. Показники вологості ґрунту можуть варіюватися в межах поля, метеорологічні прогнози мають імовірнісний характер, а потреби рослин змінюються залежно від фази вегетації. Класичні детерміновані підходи не завжди здатні ефективно обробляти таку інформацію та приймати оптимальні рішення в реальному часі.

Виникає потреба в розробці інтелектуальних систем управління зрошенням, здатних імітувати експертні знання агрономів, обробляти нечіткі та неповні дані, а також адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища. Саме такі можливості надає апарат нечіткої логіки, зокрема алгоритм Мамдані, завдяки якому можна формалізувати експертні знання у вигляді лінгвістичних правил і приймати рішення в умовах невизначеності.

*Аналіз останніх досліджень.* Нечітка логіка як математичний апарат для опису невизначеності була вперше представлена Л. А. Заде в 1965 р. У своїй фундаментальній роботі він показав, що багато природних понять не можна описати чіткими межами, а ступінь належності може бути виражений у діапазоні  $[0; 1]$ . Ця концепція стала підґрунтям для побудови сучасних систем нечіткого керування.



У багатьох роботах доведено ефективність нечіткої логіки в керуванні поливом сільськогосподарських культур. Зокрема, в дослідженнях Souza Gilberto et al. [8] та Neugebauer Maciejs et al. [9] показано, що використання нечіткої системи керування дозволяє знизити споживання води на 20–35 % порівняно з традиційними методами. Аналогічні результати отримано й у роботах з інтеграції нечітких систем з IoT-платформами.

В українських дослідженнях також активно розвивається напрям застосування нечіткої логіки у сфері аграрної автоматизації. Так, Леві Л. І. [4] розробив концепцію автоматизованої системи управління зрошенням на основі алгоритму Мамдані, де як вхідні змінні використовуються вологість ґрунту, температура повітря та прогноз опадів. Роботи вітчизняних авторів щодо моніторингу й керування мікрокліматом теплиць (Лактіонов І. С., Вовна О. В., Бережний М. О. та ін.) демонструють перенесення підходів із регулювання мікроклімату до задач поливу, зокрема щодо архітектури системи та практичних аспектів налаштування функцій належності [5].

У публікаціях Домаскіної М. А. [1] та Мартинової О. В. [6] розглянуто теоретичні основи застосування теорії нечітких множин у прийнятті рішень у сільському господарстві й економіці природокористування. Дослідження Чепіля Г. В. [7] та Кузьменко О. І. [3] зосереджені на впровадженні технологій 4.0 в агропромисловому комплексі, де нечітка логіка розглядається як складова «розумного сільського господарства».

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують, що алгоритм Мамдані є ефективним засобом адаптивного керування процесами зрошення, який поєднує експертні знання агронома з автоматизованою обробкою сенсорних даних. Проте в більшості робіт зазначається необхідність подальшої стандартизації методів валідації та адаптації функцій належності до конкретних ґрунтово-кліматичних умов.

*Формулювання мети статті.* Метою цієї статті є теоретичне обґрунтування та розробка концептуальної моделі інтелектуальної системи керування зрошенням на основі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані, спрямованої на оптимізацію водоспоживання та забезпечення оптимальних умов зволоження ґрунту для сільськогосподарських культур.

*Основна частина.* Останнім часом активного розвитку набули методи штучного інтелекту для управління сільськогосподарськими процесами, зокрема зрошенням. Серед них особливе місце посідає нечітка логіка (Fuzzy Logic), яка ефективно моделює невизначеність та нечіткі людські знання й експертні оцінки. Численні дослідження підтверджують ефективність застосування нечітких систем виводу для оптимізації зрошення. Зокрема, алгоритм нечіткого логічного виводу Мамдані (Mamdani Fuzzy Inference System – MFIS) часто використовується завдяки його інтуїтивно зрозумілій структурі та здатності оперувати лінгвістичними правилами типу «ЯКЩО – ТО».

Алгоритм Мамдані – це метод нечіткої логіки, запропонований у 1975 році. Його основне призначення полягає в обробці нечітких множин і нечітких правил, що дає можливість моделювати системи, де традиційні методи не працюють ефективно. Алгоритм заснований на правилах використання, які представляють логічне підтвердження про стан системи. Застосування алгоритму Мамдані в системах зрошення потребує розробки правил, які будуть враховувати кілька факторів, як-от рівень вологості ґрунту, температура, вид культури та кліматичні умови. На основі цих правил робиться висновок про необхідний об'єм води для зрошення. Застосування алгоритму Мамдані дає змогу адаптувати системи зрошення до поточних умов. Одним із прикладів є використання датчиків для виміру рівня вологості в ґрунті. На основі зібраних даних алгоритм автоматично обчислює необхідну кількість води, виходячи з правил, заданих спеціалістами. Крім того, алгоритм дає можливість інтегрувати знання та досвід агрономів у систему управління зрошенням, що підвищує її ефективність. Також використання алгоритму Мамдані сприяє більш широкому розумінню всіх факторів, що впливають на ефективність зрошення, завдяки можливості моделювання різних сценаріїв.



Застосування нечіткої логіки в системах управління зрошенням може бути організовано в декілька етапів, включно зі створенням моделі, формулюванням правил, процесом логічного виведення та дефазифікацією.

Фазифікатор перетворює чіткі значення вхідних параметрів у нечіткі множини з відповідними ступенями належності. Для системи управління зрошенням було вибрано вхідні змінні: вологість ґрунту ( $W$ ), температура повітря ( $T$ ), вологість повітря ( $H$ ) та прогноз опадів ( $P$ ) – очікувана кількість опадів протягом наступних 24 годин. Вихідною змінною є інтенсивність опадів ( $I$ ), що визначає тривалість роботи системи зрошення й вимірюється у відсотках від максимальної продуктивності (табл. 1).

Таблиця 1

Вхідні та вихідні змінні для керування зрошенням

Тип змінної	Лінгвістична змінна	Фізичний діапазон
Вхідна	Вологість ґрунту ( $W$ ),	[0,100] %
Вхідна	Температура повітря ( $T$ )	[0,45] °C
Вхідна	Вологість повітря ( $H$ )	[0,100] %
Вхідна	Прогноз опадів ( $P$ )	[0,50] мм
Вихідна	Інтенсивність зрошення ( $I$ )	[0,100] %

Для кожної вхідної змінної було визначено лінгвістичні терми з відповідними функціями належності. Використовувалися трикутні та трапецієподібні функції належності через їхню простоту й обчислювальну ефективність (рис. 1):

$$T(W) = \{\text{дуже низька, низька, нормальна, висока, дуже висока}\};$$

$$T(T) = \{\text{низька, помірна, висока, дуже висока}\};$$

$$T(H) = \{\text{низька, помірна, висока}\};$$

$$T(P) = \{\text{відсутні, слабкі, помірні, сильні}\};$$

$$T(I) = \{\text{відсутнє, мінімальне, помірне, інтенсивне, максимальне}\}.$$

Параметри функцій належності були визначені на основі агротехнічних нормативів для основних сільськогосподарських культур і скориговані з урахуванням експертних оцінок спеціалістів.

Ядром системи Мамдані є база правил «ЯКЩО – ТО» (IF-THEN), які кодують знання агронома або експерта. Ці правила пов'язують нечіткі вхідні терміни з нечіткими вихідними термінами. База правил системи містить 48 нечітких правил типу «ЯКЩО – ТО», що описують стратегії прийняття рішень щодо зрошення. Правила формулюються в лінгвістичній формі та відображають експертні знання про оптимальні режими зрошення.

Приклади основних правил бази знань:

Правило 1. ЯКЩО ( $W = ДН$ ) І ( $T = В$ ) І ( $H = Н$ ) І ( $P = Від$ ) ТО ( $I = Макс$ ): за критично низької вологості ґрунту, високої температури, низької вологості повітря та відсутності прогнозу опадів потрібне максимальне зрошення.

Правило 2. ЯКЩО ( $W = Н$ ) І ( $T = ДВ$ ) І ( $H = Н$ ) І ( $P = Від \vee P = Сл$ ) ТО ( $I = Інт$ ): за низької вологості ґрунту, дуже високої температури та низької вологості повітря потрібне інтенсивне зрошення, навіть якщо очікуються слабкі опади.

Правило 3. ЯКЩО ( $W = Норм$ ) І ( $T = П$ ) І ( $H = П$ ) І ( $P = Від$ ) ТО ( $I = Мін$ ): за нормальної вологості ґрунту та помірних температури й вологості повітря достатньо мінімального підтримувального зрошення.

Правило 4. ЯКЩО ( $W = В \vee W = ДВ$ ) І ( $P = Пом \vee P = Сил$ ) ТО ( $I = Від$ ): за високої вологості ґрунту та прогнозу значних опадів зрошення не потрібне.

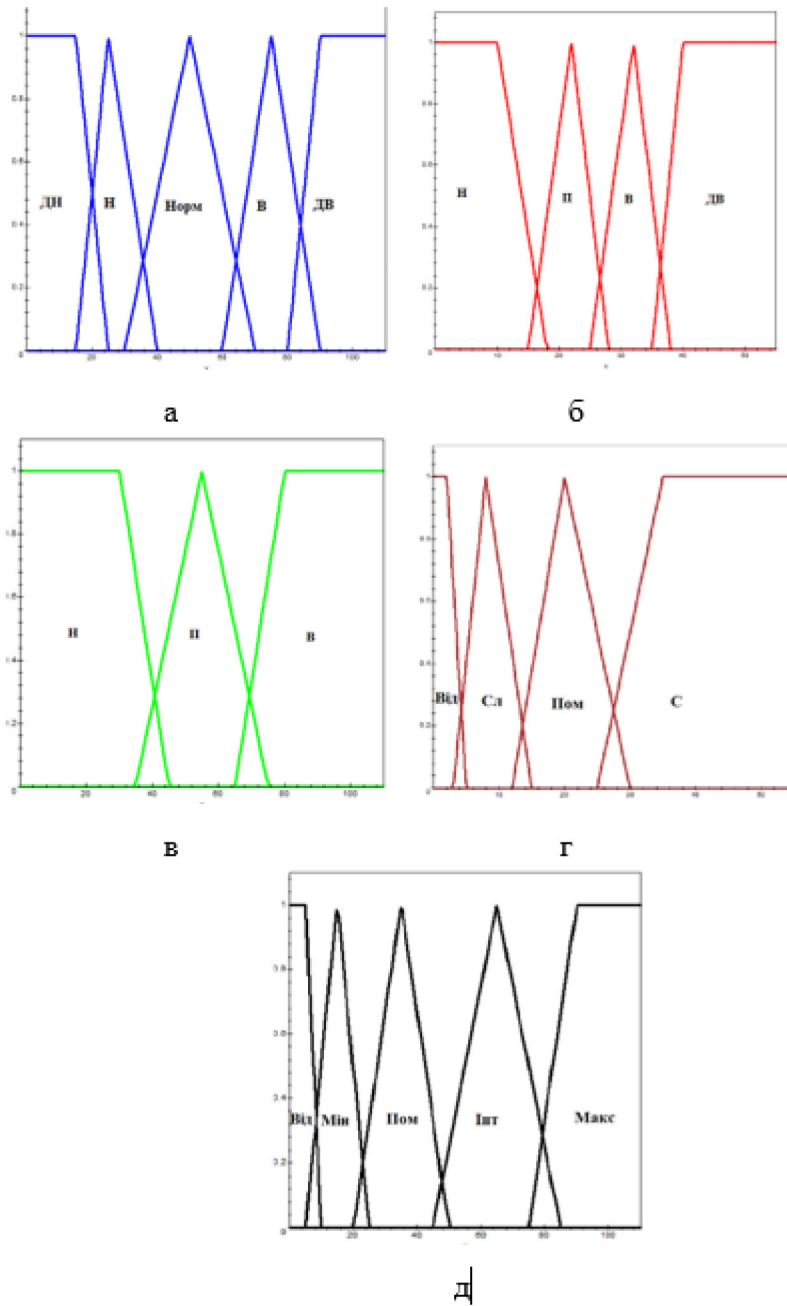


Рис. 1. Функції належності лінгвістичних змінних:

*а* – вологість ґрунту; *б* – температура повітря; *в* – вологість повітря; *г* – прогноз опадів; *д* – інтенсивність поливу

Правило 5. ЯКЩО ( $W = \text{Норм}$ ) І ( $T = \text{В}$ ) І ( $H = \text{Н}$ ) І ( $P = \text{Від}$ ) ТО ( $I = \text{Пом}$ ): за нормальної вологості ґрунту, високої температури та низької вологості повітря потрібне помірне зрошення.

Повна база правил охоплює всі значущі комбінації вхідних параметрів і враховує їхній взаємний вплив на потребу в зрошенні. Правила організовані ієрархічно, де вологість ґрунту має найвищий пріоритет, оскільки є найбільш прямим індикатором потреби рослин у воді.

Застосування нечіткої логіки вимагає застосування процесів логічного висновку, щоб обробляти дані, що виконуються від датчиків. Логічний висновок у нечіткій логіці дає можливість зробити висновок про те, яку дію необхідно передбачити, на основі встановлених правил.



Алгоритм Мамдані використовує мінімакс-композицію для агрегації нечітких правил.

Крок 1. Агрегація анцедентів. Для кожного правила обчислюється ступінь істинності його умовної частини шляхом застосування операції мінімуму до ступенів належності всіх вхідних змінних.

Крок 2. Імплікація. Для кожного активованого правила виконується операція мінімуму. Між ступенем активації правила та функцією належного висновку.

Крок 3. Акумуляція. Результати всіх активованих правил об'єднуються в єдину нечітку вихідну множину шляхом знаходження максимуму об'єднаних функцій належності.

Крок 4. Дефазифікація перетворює об'єднану вихідну множину назад у чітке значення вихідної змінної – Інтенсивність поливу (I). Найпоширенішим методом дефазифікації для алгоритму Мамдані є метод центроїда, який обчислює центр площі під інтегрованою функцією належності.

Отримане чітке значення I (наприклад, 75 %) безпосередньо використовується системою керування для встановлення режиму поливу (відкриття клапана на 75 % або тривалість поливу).

Практичні дослідження підтверджують, що використання алгоритму Мамдані в системах зрошення дає змогу скоротити витрати водних ресурсів на 20–30 % без зниження рівня врожайності. Перевагою підходу є простота інтеграції у вже існуючі агротехнологічні системи, а також можливість адаптації до регіональних особливостей.

Інтеграція алгоритму Мамдані із сенсорними мережами та IoT-платформами забезпечує формування повністю автоматизованих систем управління зрошенням, здатних працювати в реальному часі. Це відкриває перспективи впровадження «розумних» фермерських господарств, орієнтованих на концепцію точного землеробства.

*Висновки.* Алгоритм Мамдані дає можливість ефективно керувати системою зрошення на основі нечітких правил, що враховують експертні знання агрономів. Запропонована концептуальна модель, що має вхідні параметри (вологість ґрунту, температура повітря, вологість повітря, прогноз опадів випаровування) та вихідну змінну (інтенсивність поливу), забезпечує гнучке й адаптивне керування процесом зрошення. Практична реалізація моделі показує її високу гнучкість, стабільність та економічну ефективність. Використання алгоритму Мамдані сприяє раціональному використанню водних ресурсів і зниженню енергоспоживання завдяки уникненню надмірного поливу.

#### *Список використаних джерел*

1. Домаскіна М. А. Теоретичні аспекти застосування теорії нечітких множин в економіці. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. № 2. С. 29–34.
2. Зінов'єва О. Г. Використання нечіткої логіки в системах прийняття рішень. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. № 1 (92). Ч. 2. С. 71–75.
3. Кузьменко О., Віткін, Л. Розроблення системи нечіткого логічного висновку прийняття управлінських рішень у випробувальних лабораторіях. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2025. № 2 (78). С. 275–285.
4. Леві Л. І. Використання нечіткої логіки для автоматизації функціонування зрошувальних систем. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. № 2. С. 153–157.
5. Лактіонов І. С., Вовна О. В., Бережний М. О., Лебедев В. А. Комп'ютеризована система комплексного моніторингу й керування мікрокліматом промислових теплиць на базі нечіткої логіки. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013. № 3. С. 120–129.
6. Мартинова О. В. Використання теорії нечітких множин та багатокритерійного вибору альтернатив для опису діяльності підприємства в умовах невизначеності. *Інфраструктура ринку*. 2022. № 64. С. 89–94.
7. Чепіль Г. В., Панченко А. В. Класифікація та тренди застосування технології 4.0 аграрними підприємствами. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. 2024. № 1 (11). С. 153–163.



8. Souza Gilberto, Aquino Junior Plinio, Maia Rodrigo, Kamienski Carlos, Soininen Juha-Pekka. A fuzzy irrigation control system. *GHTC*. 2020.
9. Neugebauer Maciej, Akdeniz Cengiz, Demir Vedat & Yurdem Huseyin. Fuzzy logic control for watering system. *Scientific Reports*. 2023. No. 13.
10. González-Briones A., Castellanos-Garzón J.A., Mezquita Martín Y., Prieto J., Corchado J.M. A framework for knowledge discovery from wireless sensor networks in rural environments: A crop irrigation systems case study. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018.
11. Lavanya G., Rani C., Ganeshkumar P. An automated low cost IoT based Fertilizer Intimation System for smart agriculture. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2020. Vol. 28.

*Стаття надійшла до редакції 10.10.2025*

*Стаття прийнята 01.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**O. Zinovieva**

**Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University**

## **APPLICATION OF FUZZY LOGIC APPARATUS FOR OPTIMIZATION OF IRRIGATION SYSTEMS IN AGRICULTURE**

### *Summary*

This paper investigates the application of the Mamdani fuzzy inference algorithm for optimizing automated irrigation systems in agricultural crop production. The study addresses the critical problem of inefficient water resource utilization and the necessity for adaptive irrigation management that accounts for multiple variable factors. Modern agriculture faces unprecedented water scarcity challenges, with irrigation consuming approximately 70% of global freshwater resources, much of which is wasted due to inadequate control systems.

The study presents a conceptual model of an irrigation management system based on Mamdani-type fuzzy inference. The system uses linguistic input variables – soil moisture (very low, low, medium, high, very high), air temperature (low, moderate, high, very high), air humidity (low, moderate, high), and precipitation forecast (none, weak, moderate, strong) – to determine the output variable, irrigation intensity (none, minimum, moderate, heavy, maximum). Triangular and trapezoidal membership functions are defined for fuzzification, while the centroid method is used for defuzzification. A practical example of rule formation and inference is given to illustrate the adaptive nature of the approach

Simulation and field-level studies referenced in this paper demonstrate that fuzzy-based irrigation control can reduce water consumption by up to 30 % without compromising crop yield. The Mamdani model's main advantage lies in its interpretability: rules are easily constructed using expert agronomic knowledge, allowing transparent system behavior and easier calibration for local conditions.

The proposed methodology contributes to the broader field of precision agriculture and smart farming, supporting efficient use of water resources and environmental sustainability. Future work should focus on integrating fuzzy logic with machine learning algorithms for automatic tuning of membership functions and rules, and on validating such systems under diverse agro-climatic conditions in Ukraine and beyond.

**Keywords:** fuzzy logic, irrigation optimization, Mamdani algorithm, agricultural automation, intelligent systems.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-31>

УДК 004.021:005.8:005.334

А. Ю. Коляда, аспірант  
Державний торговельно-економічний університет  
a.koliada@knute.edu.ua

ORCID: 0009-0001-4625-4976

## ПЕРЕВАГИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ В ПРОЄКТНОМУ МЕНЕДЖМЕНТІ

*Анотація.* У статті розглянуто основні переваги використання методів системного аналізу в проєктному менеджменті. Установлено, що системний підхід допомагає комплексно оцінити взаємозв'язки між складниками проєкту, врахувати вплив зовнішнього оточення та внутрішнього середовища. Доведено, що використання системного аналізу в проєктному менеджменті сприяє оптимізації ресурсного забезпечення, більш ефективному плануванню та моніторингу ухвалення управлінських рішень. Інтеграція системного аналізу в практику проєктного менеджменту покликана реалізовувати складні ініціативи, зокрема в інфраструктурних проєктах. Виділено ключові переваги використання системного аналізу та надано рекомендації з його використання.

*Ключові слова:* ризик-менеджмент, системний аналіз, модель, невизначеність, складні системи, проєктний менеджмент, синергія.

*Постановка проблеми.* Нині ведення проєктної діяльності відзначається високим ризиком та невизначеністю, викликами зовнішнього середовища. При цьому виклики підвищили свою актуальність в необхідності повоєнного відновлення України, для якого потрібно ефективно планувати, координувати та управляти масштабними інфраструктурними проєктами. Невикористання чи недостатня інтеграція системного аналізу в практику проєктного менеджменту може призвести до нераціонального використання ресурсів, неузгодженості між учасниками процесу відбудови, дублювання функцій чи навіть втрати зовнішніх інвесторів.

Сучасна практика проєктної діяльності в Україні відзначає фрагментарний підхід до управління та відсутність цілісного бачення масштабних проєктів. Беручи до уваги масштаб та критичність завдань, які стають перед Україною в процесі її повоєнного відновлення, питання впровадження системного аналізу в проєктний менеджмент, особливо під час реалізації інфраструктурних проєктів, є нагальним та потребує дослідження. Системний аналіз слугує інструментом, який допомагає моделювати взаємозв'язки між усіма складниками проєкту, оцінювати ризики, встановлювати пріоритети та, відповідно, ухвалювати ефективні управлінські рішення.

В Україні використання системного аналізу в проєктному менеджменті має значний потенціал, проте його використання досить обмежене, що зумовлює необхідність обґрунтування його переваг та надання рекомендацій щодо інтеграції в інфраструктурні проєкти повоєнної відбудови.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Питання системного аналізу та проєктного менеджменту вивчали багато вітчизняних та зарубіжних науковців, проте майже відсутні дослідження їх взаємозв'язку. Науковці публікації у сфері управління проєктами показують тенденцію до інтеграції системного, поведінкового та гібридного підходів. Ю. Гусева та І. Чумаченко розглядають концептуальну модель управління проєктами [1]. С. Захарчишин і О. Зачко виокремили футурологічні засади управління проєктами, насамперед інфраструктурними в умовах воєнного стану, вважаючи їх найбільш гнучкими та адаптивними [2]. І. Мартиняк і І. Бакушевич досліджували гібридні моделі, які враховують вимоги сталого розвитку та системного підходу [3]. У роботах В. Молоканової, І. Гордєєвої наголошується на необхідності системно мислити для ефективного планування і реалізації складних проєктів [4].



*Мета статті* – встановити переваги поєднання системного аналізу та систем управління інформацією в управлінні проектами повоєнного відновлення.

*Основна частина.* Термін системний підхід з'явився в 1950-х роках для опису цілісного та аналітичного підходу до вирішення складних проблем, що передбачає використання системної філософії, системного аналізу та системного управління. Системи є набори взаємоактивних компонентів, які працюють у середовищі для виконання певної мети. Організації також є системами, у яких люди в різних ролях працюють разом, щоб проєктувати, розробляти, постачати й продавати різні продукти та послуги. Системна філософія становить загальну модель для мислення про речі як про системи.

Системний аналіз – це підхід до вирішення проблем, який вимагає визначення сфери дії системи, її поділу на компоненти, а потім виявлення та оцінки її проблем, можливостей, обмежень і потреб. Після цього системний аналітик вивчає альтернативні рішення щодо покращення поточної ситуації, визначає оптимальне або принаймні задовільне рішення чи план дій та вивчає цей план щодо всієї системи. Управління системами вирішує ділові, технологічні та організаційні питання, пов'язані зі створенням, обслуговуванням та зміною системи.

Використання системного підходу має вирішальне значення для успішного управління проектами. Якщо вище керівництво та менеджери проєктів хочуть зрозуміти, як проєкти пов'язані з усією організацією, вони повинні дотримуватися системної філософії, використовувати системний аналіз для задоволення потреб за допомогою системного підходу до вирішення проблем. Вони повинні використовувати системний менеджмент для виявлення ключових проблем у діловій, технологічній та організаційній сферах, пов'язаних з кожним проєктом, щоб визначити та задовольнити ключових зацікавлених осіб і зробити те, що найкраще підходить для всієї організації [5].

Системний аналіз використовують для створення моментального знімку поточної системи та її оточення, який описує їх структурні, функціональні та поведінкові аспекти без винесення оцінних суджень (табл. 1).

Таблиця 1

## Системний аналіз

Структура (вхід)	Учасники	Зацікавлені особи
Основні дійові особи, їх інтереси та зміни, які вони контролюють та на які впливають	Основні компоненти та їх взаємозв'язок	Клієнти, споживачі, постачальники, кредитори, уряд, органи регулювання
Функція (вихід)	Продукти / ринки	Потенціал ринку
Що виробляється, для кого та чому? Явні, неявні та потенційні вимоги	Основа для диференціації Основа для конкуренції Доступ до ринку	Надійність попиту Інтенсивність конкуренції Конкурентний аналіз
Процес (знання)	Основна технологія	Промисловий стандарт
Як вони роблять те, що роблять	Пропускна здатність процесу Організаційні процеси	Мінімальний розмір для гравця Вартість продажу, собівартість та вартість накладних витрат

*Джерело: складено автором на основі [5–7]*

Основними особливостями системного аналізу є такі:

- розглядає структуру та поведінку всієї системи;
- виявляє ключові проблеми та ризики;
- розробляє стратегії покращення;
- забезпечує відповідність системи бізнес-цілям.

Системний аналіз покликаний визначити проблему, яку організація намагатиметься вирішити за допомогою інформаційної системи. Він складається з визначення проблеми, визначення її причин, уточнення рішення та визначення інформаційних вимог, яким має відповідати системне рішення.

Системний аналітик створює дорожню карту організації та систем, визначаючи основних власників і користувачів даних разом з апаратним та програмним забезпеченням. Потім він детально описує проблеми систем. Вивчаючи робочі документи та процедури, спостерігаючи за роботою системи та опитуючи ключових користувачів систем, аналітик може визначити проблемні сфери та цілі, яких досягне певне рішення. Часто рішення вимагає створення нової інформаційної системи або вдосконалення дійсної [7].

Системний аналіз міститиме техніко-економічне обґрунтування, щоб визначити, чи було це рішення доцільним або досяжним з фінансового, технічного та організаційного боку. Техніко-економічне обґрунтування визначатиме, чи є запропонована система гарною інвестицією, чи доступна технологія, необхідна для системи, і чи можуть нею керувати фахівці підприємства з інформаційних систем, а також чи зможе організація впоратися зі змінами, внесеними системою. Зазвичай процес системного аналізу визначає кілька альтернативних рішень, які організація може розглянути. Потім у процесі оцінюється доцільність кожного варіанта. У письмовому звіті про системну пропозицію описують витрати та вигоди, переваги і недоліки кожної альтернативи. Керівництво має визначити, яке поєднання витрат, вигід, технічних характеристик та організаційного впливу є найбажанішим варіантом. Переваги системного аналізу в управлінні підприємством представлені на рис. 1.



Рис. 1. Переваги системного аналізу в управлінні підприємством

Джерело: складено автором на основі [8]

Поліпшення задоволеності зацікавлених сторін: розуміючи системні вимоги та узгоджуючи їх із бізнес-цілями, системний аналіз гарантує, що кінцева система відповідає потребам та очікуванням зацікавлених сторін. Це призводить до підвищення задоволеності й зміцнення відносин із зацікавленими сторонами.



У плануванні проєктів методи системного аналізу дають змогу глибше зрозуміти різні чинники, які сприяють успіху чи невдачі проєкту. Вивчаючи проєкт загалом, а не зосереджуючись на окремих компонентах, системний аналіз допомагає виявити приховані залежності, визначити критичні шляхи та передбачити потенційні перешкоди.

Статистика показує, що компанії, які впроваджують методи системного аналізу, послідовно досягають вищих показників успішності своїх проєктів. Опитування, проведене Standish Group, показало, що лише 34 % традиційних проєктів вважають успішними, тоді як проєкти з комплексним системним аналізом мають показник успішності 71 %. Ці цифри демонструють значний вплив системного аналізу на результати проєкту [5].

Основні принципи системного підходу передбачають: цілісність, ієрархічність, взаємозв'язок елементів, орієнтацію на досягнення системних цілей, динамічність та адаптивність. Використання їх у проєктному менеджменті дасть змогу врахувати всі аспекти реалізації проєкту (соціальні, економічні, політичні тощо).

Розглянемо приклади використання системного аналізу в управлінні проєктами в табл. 2.

Таблиця 2

Використання системного аналізу для оцінки розгортання проєкту великомасштабних систем сонячної енергетики

Проблема клієнта	Використовуючи фотоелектричної системи з мережевим живленням, ми очікуємо, що зміни в її вихідній потужності призведуть до коливань напруги
Природа системного аналізу	Оцініть коливання напруги під час використання мережного живлення та короткочасне падіння напруги. Оцініть контроль за зменшенням напруги за допомогою стабілізатора напруги
Пропозиція	Фотоелектрична система, яка запобігає очікуваним ризикам
Відгук	Створіть фотоелектричну систему, яка забезпечує стабільну напругу

*Джерело: складено автором на основі [8]*

Використання системного аналізу під час планування проєктів має багато переваг. Основною є визначення масштабу проєкту. Системний підхід системного аналізу допомагає визначити межі та масштаб проєкту. Ретельно вивчаючи цілі проєкту, зацікавлених осіб та обмеження, методи системного аналізу гарантують, що процес планування буде всеохопним та всеохопним.

Окрім того, системний аналіз дає змогу менеджерам проєктів виявляти потенційні ризики та передбачати проблеми, які можуть виникнути протягом життєвого циклу проєкту. Ці ризики можна аналізувати та пом'якшувати на етапі планування, що знижує імовірність виникнення несподіваних перешкод, які можуть зірвати проєкт надалі. Використання системного аналізу в проєктному менеджменті сприяє оптимізації розподілу ресурсів, оскільки системний аналіз, розуміючи взаємозалежність та вимоги різних компонентів проєкту, допомагає менеджерам проєктів ефективно розподіляти ресурси. Це гарантує, що всі необхідні ресурси будуть доступні в потрібний час, мінімізуючи вузькі місця та максимізуючи ефективність [3].

Методи системного аналізу сприяють покращенню комунікації та співпраці між учасниками проєкту. Надаючи комплексне уявлення про проєкт, він сприяє чіткому обміну ідеями, очікуваннями та вимогами, сприяючи спільному розумінню серед членів команди.

Системний аналіз надає менеджерам проєктів цінні ідеї та інформацію на основі даних, що дає змогу ухвалювати більш обґрунтовані рішення. Розглядаючи кілька сценаріїв та аналізуючи їх потенційні результати, менеджери проєктів можуть робити обґрунтований вибір, який відповідає цілям та обмеженням проєкту.

Використання методів системного аналізу ефективного планування проєктів дає численні переваги. Визначаючи обсяг проєкту, прогнозуючи ризики, оптимізуючи розподіл ресурсів,

покращуючи комунікацію та співпрацю, а також покращуючи процес ухвалення рішень, проекти можуть досягати кращих результатів та вищих показників успіху. Менеджери проектів, які містять системний аналіз у свої процеси планування, можуть значно пом'якшити невизначеності та сприяти більш проактивному та структурованому підходу до управління проектами.

Успішне планування проекту залежить не тільки від методів системного аналізу, а й від включення комбінації таких факторів, як управління зацікавленими сторонами, оцінка ризиків і моніторинг прогресу. Системний аналіз слід розглядати як цінний інструмент, що допомагає в комплексному розумінні та плануванні проектів, що сприяє підвищенню шансів на успіх та досягненню бажаних результатів.

Системний аналіз та управління проектами є взаємозалежними, які взаємно виграють від співпраці. Тоді як системний аналіз фокусується на розумінні та покращенні дійсних процесів, управління проектами забезпечує успішну реалізацію проектів у строк та в межах бюджету. Представимо основні переваги, де співпраця необхідна (рис. 1).

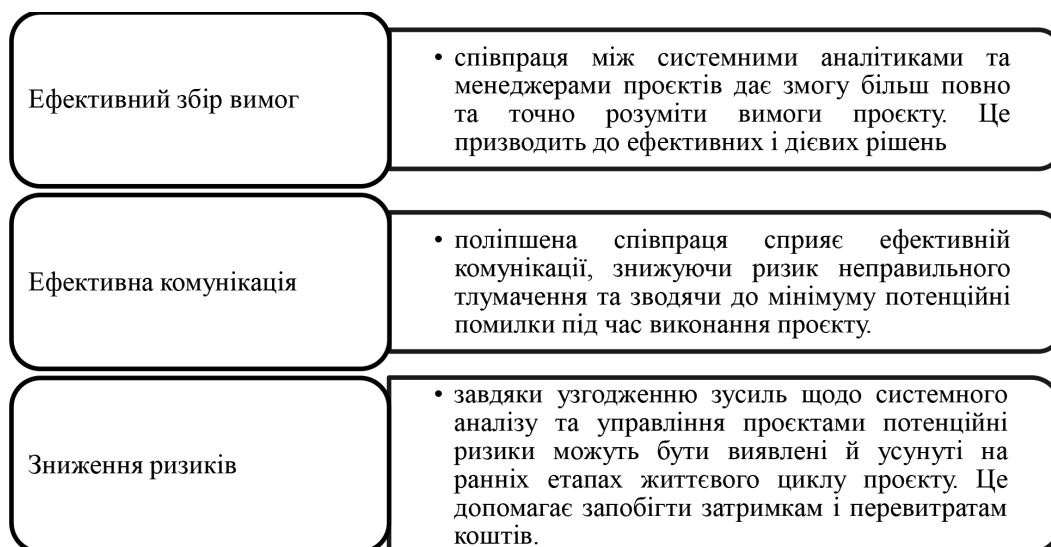


Рис. 2. Основні переваги поєднання проектного менеджменту та системного аналізу

Джерело: складено автором на основі [2; 3; 5]

В умовах повоєнної відбудови України виникає необхідність реалізувати масштабні проекти (інфраструктурні, соціальні, екологічні та інші). Вищенаведене вимагає адаптації системного підходу до роботи з масштабними проектами. Упровадження системного аналізу дасть змогу враховувати локальний контекст та пріоритетність об'єктів, що особливо важливо для України, оскільки вплив війни на регіони різний, необхідність їх відбудови теж.

З метою впровадження системного аналізу в проектний менеджмент в Україні необхідно активізувати навчання управлінців у напрямі системного аналізу, розробити методичні рекомендації та стандарти, алгоритм упровадження системного аналізу в державні проекти.

**Висновки.** Системний аналіз є дієвим інструментом в управлінні складними проектами, особливо інфраструктурними, який буде ефективним у процесі повоєнної відбудови України. Його впровадження в проектний менеджмент сприятиме оптимізації ресурсів, зниженню ризиків, покращенню координації між учасниками проекту. Системний підхід в управлінні проектами дасть змогу ідентифікувати ризики на ранніх етапах, моделювати різні сценарії та заходи реагування на них. У межах повоєнної відбудови системний підхід сприятиме максимальному досягненню проектних цілей.

*Список використаних джерел*

1. Гусева Ю. Ю., Чумаченко І. В. Концептуальний підхід до підтримки прийняття рішень з управління вимогами та вартістю в проєктах. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 4. С. 21–27. DOI: [org/10.32347/2412-9933.2020.41.21-27](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.41.21-27)
2. Захарчишин С. В., Зачко О. Б. Футурологічні засади управління інфраструктурними проєктами в умовах воєнного стану. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 30. С. 220–228. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/2784/2670> (дата звернення 12.05.2025).
3. Мартиняк І., Бакушевич І. Гібридні моделі управління проєктами в умовах сталого розвитку та цифрової економіки. Сталый розвиток економіки. 2024. № (3(50), 21–26. URL: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-50-4> (дата звернення 12.05.2025).
4. Молоканова В., Гордєєва І. Системний підхід до управління проєктами в умовах поведінкової економіки. *Управління розвитком складних систем*. 2021. 45. С. 43–49. DOI: [org/10.32347/2412-9933.2021.45.43-49](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.43-49)
5. Системний аналіз та його роль в проєктуванні. URL: <https://uk.nure.info/blog/183-systemnyj-analiz-ta-yoho-rol-v-proektuvanni.html> (дата звернення 12.05.2025).
6. Convention Center Management: A Systems Analysis & Design Course Project URL: <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1177&context=jise> (date of access 12.05.2025).
7. Desmond L. Cook. Use of systems analysis and management systems in project planning and evaluation. *Socio-Economic Planning Sciences* Volume 2, Issues 2–4, April 1969, Pages 389–397 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038012169900342> (date of access 12.05.2025).
8. Project Management Tools for Systems Development URL: <https://study.com/academy/lesson/project-management-tools-for-systems-development.html> (date of access 12.05.2025).

*Стаття надійшла до редакції 10.10.2025*

*Стаття прийнята 01.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**A. Koliada**

**State University of Trade and Economics**

## **ADVANTAGES OF SYSTEMS ANALYSIS IN PROJECT MANAGEMENT**

### *Summary*

The article considers the main advantages of using systems analysis methods in project management. It is established that a systems approach helps to comprehensively assess the relationships between project components, take into account the influence of the external and internal environment. It is proven that the use of systems analysis in project management contributes to the optimization of resource provision, more effective planning and monitoring of management decision-making.

The integration of systems analysis into project management practice is designed to implement complex initiatives, including in infrastructure projects. The key advantages of using systems analysis are highlighted and recommendations for its use are provided.

**Keywords:** risk management, systems analysis, model, uncertainty, complex systems, project management, synergy.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-32>

УДК 514.18

О. Є. Мацулевич, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

О. Ю. Михайленко, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-8836-3222

М. В. Супрун, асистент

ORCID: 0009-0000-5903-1336

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: [oleksandr.matsulevych.tsatu.edu.ua](mailto:oleksandr.matsulevych.tsatu.edu.ua)

## ДИСКРЕТНА ІНТЕРПОЛЯЦІЯ СПІРАЛЕПОДІБНИХ ДИСКРЕТНО ПРЕДСТАВЛЕНИХ КРИВИХ НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНОГО ЗАКОНУ ЗМІНИ КУТІВ СУМІЖНОСТІ

*Анотація.* Дослідження зосереджено на проблемі інтерполяції дискретно представлених кривих (далі – ДПК), зокрема спіралей та замкнених контурів. Представлено нелінійну формулу для зміни кутів суміжності під час згущення спіралеподібних ДПК, яка впливає з підтвердженою тотожності, що пов’язує кути до й після процесу ущільнення. Шляхом накладання додаткових умов на співвідношення кутів розроблено різноманітні різницеві алгоритми. Вони гарантують відмінну розрахункову точність і повністю виключають осциляції згущеного контуру. Крім того, розроблено й теоретично підтверджено спосіб згущення, що базується на геометричних залежностях між кутами суміжності. Перевага цього способу полягає в його рівномірній ефективності як на опуклих сегментах, так і на перехідних зонах з можливістю відстежувати точки перетину.

*Ключові слова:* супроводжувальна ламана лінія, кут суміжності, кінцева різниця, спіралеподібна дискретно подана крива.

*Постановка проблеми.* Раніше було розглянуто згущення ДПК на основі основної тотожності шляхом накладання додаткових співвідношень між кутами суміжності ланок СЛЛ згущеної ДПК. Одержувані при цьому різницеві схеми дали змогу побудувати прості й ефективні розрахункові алгоритми, що гарантують відсутність осциляції при згущенні ДПК. Недоліком пропонувананих при цьому способів є те, що закон зміни кутів суміжності після згущення має злами у вузлах або точках згущення. Тільки спосіб дискретної інтерполяції різницевих схем дає змогу одержати лінійний закон зміни кутів суміжності. Тут важливим є те, що побудова лінійного закону зміни кутів суміжності можлива лише тоді, коли цією властивістю лінійності володіють кути суміжності вихідної ДПК. За недотримання цієї умови можна побудувати згущення тільки з кусково-лінійним законом зміни кутів суміжності.

*Аналіз останніх досліджень.* Згущена ДПК в точках зламу графіка кутів суміжності матиме перегини кривини. Це варто враховувати при формуванні динамічних обводів, зокрема при профілюванні кулачків. Відзначимо, що, як указувалося раніше, з кожним кроком згущення кутів суміжності зменшуються приблизно вдвічі порівняно з попередніми значеннями. Крім того, процес згущення дає змогу одержати значення кутів суміжності як завгодно близько (на певному кроці) до точки зламу графіка. Так, що описаний процес зменшення кутів суміжності в точках зламу графіка з одночасним наближенням точок згущення до розглянутого вузла дає змогу одержати як завгодно мале (по абсолютній величині) значення стрибка кривини ДПК у вузлах зламу, хоча наявність такого стрибка жадає від дослідника контролю його величини й порівняння зі значеннями, що допускають при цьому.

*Основна частина.* Розглянемо можливості побудови згущення ДПК із нелінійним законом зміни кутів суміжності. За основу візьмемо поліноміальний закон, коли точки, що відповіда-



ють на графіку значенням кутів суміжності після згущення, розташовуються на параболі заданого ступеня.

Для початку розглянемо дискретні подання поліноміальних кривих, найбільшою мірою задовольняльному поставленому завданню. Такі подання вперше розглянуті в роботах акад. В. М. Найдиша й розвинені в роботах його учнів стосовно до рішення розглянутих ними завдань. Продовжимо ці дослідження стосовно до наших завдань. Дискретне подання прямої лінії, тобто залежність між ординатами її точок на рівномірній сітці з довільним кроком, має вигляд:

$$y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1} = 0, \quad i = \overline{1; n}. \quad (1)$$

Звідси маємо

$$y_i - y_{i-1} = y_{i+1} - y_i = \Delta_1, \quad (2)$$

де  $\Delta_1$  – перша кінцева різниця, постійна для всіх точок прямолінійного ряду. Для спрощення подальшого розгляду віднесемо її значення до нульового (початкової) точкового ряду, тобто:

$$y_1 - y_0 = \Delta_1.$$

Тоді ординати інших точок ряду виражаються через значення  $y_0$   $\Delta_1$  у такий спосіб:

$$\begin{aligned} y_1 &= y_0 + \Delta_1 \\ y_2 &= y_1 + \Delta_1 = y_0 + 2\Delta_1 \\ y_3 &= y_0 + 3\Delta_1 \\ \dots & \\ y_k &= y_0 + k\Delta_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Отриману (останню) рівність будемо використовувати надалі для розрахунку ординати довільної точки прямолінійного ряду.

Розглянемо 2-параболу. Її дискретне подання має вигляд

$$y_{i-1} - 3y_i + 3y_{i+1} - y_{i+2} = 0, \quad i = \overline{1; n}. \quad (4)$$

Звідси для  $i = 1$  маємо

$$(y_0 - 2y_1 + y_2) = (y_1 - 2y_2 + y_3) = \Delta_2, \quad (5)$$

де  $\Delta_2$  – друга кінцева різниця для ординат  $y_0, y_1, y_2$ , віднесена до нульової точки.

Тоді

$$y_2 = y_0 + 2\Delta_1 + \Delta_2 \quad (6)$$

і далі, підставляючи (6) в (5) з огляду на (4), маємо:

$$\begin{aligned} y_3 &= y_0 + 3\Delta_1 + 3\Delta_2 \\ y_4 &= y_0 + 4\Delta_1 + 6\Delta_2 \\ \dots & \\ y_k &= y_0 + k\Delta_1 + C_k^2 \Delta_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Для параболи 3-го порядку маємо:

$$y_{i-2} - 4y_{i-1} + 6y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2} = 0, \quad i = \overline{2; n-2}. \quad (8)$$

Провівши аналогічні підстановки раніше розглянутим викладенням, маємо:

$$\begin{aligned} y_3 &= y_0 + 3\Delta_1 + 3\Delta_2 + \Delta_3 \\ y_4 &= y_0 + 4\Delta_1 + 6\Delta_2 + 4\Delta_3 \\ y_5 &= y_0 + 5\Delta_1 + 10\Delta_2 + 10\Delta_3 \\ \dots & \\ y_6 &= y_0 + 6\Delta_1 + 15\Delta_2 + 20\Delta_3 \\ \dots & \\ y_k &= y_0 + C_k^1 \Delta_1 + C_k^2 \Delta_2 + C_k^3 \Delta_3 \end{aligned} \quad (9)$$



Де  $\Delta_3$  – третя розділена різниця

$$\Delta_3 = -y_0 + 3y_1 - 3y_2 + y_3. \tag{10}$$

Аналогічно (9) для параболи 4-го порядку маємо

$$y_k = y_0 + C_k^1 \Delta_1 + C_k^2 \Delta_2 + C_k^3 \Delta_3 + C_k^4 \Delta_4, \tag{11}$$

де

$$\Delta_4 = y_0 - 4y_1 + 6y_2 - 4y_3 + y_4. \tag{12}$$

По суті, ми одержали дискретний аналог інтерполяційної формули Ньютона для обчислень ординат точок  $m$ -параболи на рівномірній сітці. Її достоїнство полягає в тому, що підвищення ступеня параболи не приводить до перерахунку точок на початку таблиці ( $y_0, y_1, \dots$ ), тобто значення  $\Delta_1, \Delta_2, \dots$ , знайдені для параболи попереднього ступеня, залишаються незмінними.

Скористаємося формулами (2), (7) і (9) для формування згущеного графіка  $\gamma^0$  кутів суміжності заданої ДПК, коли кути  $\gamma_i^1, i = 1; n$  отримані з вихідних даних.

Розглянемо випадок прямолінійного розташування графіку  $\gamma_i^1$  від  $N$ .

Запишемо основну тотожність для послідовного ряду точок

$$\begin{aligned} \gamma_{0,5}^1 + 2\gamma_1^1 + \gamma_{1,5}^1 &= \gamma_1^0, \\ \gamma_{1,5}^1 + 2\gamma_2^1 + \gamma_{2,5}^1 &= \gamma_2^0, \\ \gamma_{2,5}^1 + 2\gamma_3^1 + \gamma_{3,5}^1 &= \gamma_3^0, \\ \dots & \dots \\ \gamma_{i-0,5}^1 + 2\gamma_i^1 + \gamma_{i+0,5}^1 &= \gamma_i^0. \end{aligned} \tag{15}$$

Умова прямолінійного розташування точок  $\gamma_{i-0,5}^1, i = \overline{1; n}$  на підставі (3) має вигляд:

$$\begin{aligned} \gamma_1^1 &= \gamma_{0,5}^1 + \Delta_1, \\ \gamma_{1,5}^1 &= \gamma_{0,5}^1 + 2\Delta_1, \\ \gamma_2^1 &= \gamma_{0,5}^1 + 3\Delta_1, \end{aligned} \tag{16}$$

Підставляючи (16) в (15), маємо:

$$\begin{aligned} \gamma_{0,5}^1 + \Delta_1 &= \frac{1}{2} \gamma_1^0, \\ \gamma_{0,5}^1 + 3\Delta_1 &= \frac{1}{2} \gamma_2^0, \\ \gamma_{0,5}^1 + 5\Delta_1 &= \frac{1}{2} \gamma_3^0, \\ \dots & \dots \\ \gamma_{0,5}^1 + (2k-1)\Delta_1 &= \frac{1}{2} \gamma_k^0 \end{aligned} \tag{17}$$

Крім  $\gamma_{0,5}^1$  із кожної послідовної пари рівнянь (17) одержуємо значення  $\Delta_1$ , що дає змогу побудувати прямолінійний ряд  $\gamma_{i-0,5}^1$ .

Воно дорівнює:

$$\gamma_{0,5}^1 \Delta_1 = \frac{1}{4} (\gamma_2^0 - \gamma_1^0) = \frac{1}{4} (\gamma_3^0 - \gamma_2^0) = \frac{1}{4} (\gamma_4^0 - \gamma_3^0) \dots \tag{18}$$

При цьому  $\gamma_{0,5}^1$  може бути визначене з кожного з рівнянь (17).

Очевидно, що  $\Delta_1 = 0$  при рівності всіх кутів суміжності вихідної ДПК, тобто:

$$\gamma_1^0 = \gamma_2^0 = \gamma_3^0 = \dots = \gamma_{n-1}^0. \tag{19}$$



На основі послідовної пари рівнянь (17) одержуємо умову для вихідних  $\gamma^0$ , що дасть змогу побудувати прямолінійний ряд точок кутів суміжності  $\gamma^1$  згущеної ДПК.

Маємо:

$$\gamma_{i-1}^0 - 2\gamma_i^0 + \gamma_{i+1}^0 = 0, \quad i = \overline{2; n-1}. \quad (20)$$

У такий спосіб ми одержали підтвердження раніше отриманого виводу про те, що умовою прямолінійного розташування значень кутів суміжності згущеної ДПК є прямолінійність розташування значень кутів суміжності вихідної ДПК.

Розглянемо можливість побудови точкового ряду значень  $\gamma_{0,5}^1, i = \overline{1; n}$  для параболи другого порядку.

На підставі (7) маємо:

$$\begin{aligned} \gamma_1^1 &= \gamma_{0,5}^1 + \Delta_1, & \gamma_{1,5}^1 &= \gamma_{0,5}^1 + 2\Delta_1 + \Delta_2, \\ \gamma_2^1 &= \gamma_{0,5}^1 + 3\Delta_1 + 3\Delta_2, & \gamma_{2,5}^1 &= \gamma_{0,5}^1 + 4\Delta_1 + 6\Delta_2, \\ \gamma_3^1 &= \gamma_{0,5}^1 + 5\Delta_1 + 10\Delta_2, & \gamma_{3,5}^1 &= \gamma_{0,5}^1 + 6\Delta_1 + 15\Delta_2, \end{aligned} \quad (21)$$

Підставляючи (21) в (15), маємо

$$\begin{aligned} \gamma_{0,5}^1 + \Delta_1 + \frac{1}{4}\Delta_2 &= \frac{1}{2}\gamma_1^0, & \gamma_{0,5}^1 + 3\Delta_1 + \frac{13}{4}\Delta_2 &= \frac{1}{2}\gamma_2^0, \\ \gamma_{0,5}^1 + 5\Delta_1 + \frac{41}{4}\Delta_2 &= \frac{1}{2}\gamma_3^0, & \gamma_{0,5}^1 + 7\Delta_1 + \frac{85}{4}\Delta_2 &= \frac{1}{2}\gamma_4^0, \end{aligned} \quad (22)$$

Шуканий параболічний ряд значень кутів суміжності згущеної ДПК визначається трьома параметрами  $\gamma_{0,5}^1, \Delta_1$  і  $\Delta_2$ . Їхні значення можна визначити з будь-якої трійки рівнянь (22). З першої трійки рівнянь маємо

$$\begin{aligned} \gamma_{0,5}^1 &= \frac{1}{32}(29\gamma_1^0 - 18\gamma_2^0 + 5\gamma_3^0), \\ \Delta_1 &= \frac{1}{16}(7\gamma_1^0 - 10\gamma_2^0 + 3\gamma_3^0), \\ \Delta_2 &= \frac{1}{32}(\gamma_1^0 - 2\gamma_2^0 + \gamma_3^0), \end{aligned} \quad (23)$$

З останньої рівності з (23) для послідовних трійок точок маємо:

$$\Delta_2 = \frac{1}{8}(\gamma_1^0 - 2\gamma_2^0 + \gamma_3^0) = \frac{1}{8}(\gamma_2^0 - 2\gamma_3^0 + \gamma_4^0),$$

Звідки:

$$\gamma_1^0 - 3\gamma_2^0 + 3\gamma_3^0 - \gamma_4^0 = 0, \quad (24)$$

Очевидно, що це співвідношення справедливо для будь-якої послідовної четвірки точок вихідної ДПК, тобто дійдемо висновку, що для побудови графіка кутів суміжності згущеної ДПК у вигляді параболи 2-го порядку необхідно, щоб значення кутів суміжності вихідної ДПК розташовувалися також на параболі 2-го порядку. Зворотне також справедливо.

*Висновки.* Майже нереально, щоб множина значень кутів суміжності  $\gamma_i^0$  вихідної ДПК задовольняла співвідношенню 2-параболи:

$$\gamma_{i-1}^0 - 3\gamma_i^0 + 3\gamma_{i+1}^0 - \gamma_{i+2}^0 = 0, \quad i = \overline{2; n-3}. \quad (25)$$

Однак отримані вище співвідношення між параметрами дають змогу здійснити кускове моделювання, коли значення кутів суміжності задовольняють співвідношення (25) для трьох

послідовних вузлів (і точок згущення між ними) вихідної ДПК, остання вузлова точка є точкою стику (зламу графіка) і початковою точкою наступної трійки вузлових точок. Інакше кажучи, здійснюється кусково-параболічне моделювання графіка кутів суміжності  $\gamma^1$ .

#### Список використаних джерел

1. Щербина В. М. Особливості визначення початкових умов при згущенні спіралеподібних дискретно поданих кривих. Прикл. геом. та інж. графіка. Праці ТДАТА. Вип. 4, Т15 Мелітополь : ТДАТА, 2002. С. 97–105.
2. Михайленко О. Ю., Антонова Г. В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. Науковий вісник ТДАТУ. 2022. Вип. 12, том 2. № 26.
3. Мацулевич О. Є. Апроксимація дискретно представлених кривих у полярній системі координат за критерієм найменших граничних відхилень : автореф. дис... канд. техн. наук. Мелітополь, ТДАТУ, 2003. 21 с.
4. Мацулевич О. Є., Найдіш А. В. Моделювання спіралеподібних ДПК у полярній системі координат на основі кутів нахилу ланок СЛЛ. Прикл. геом. та інж. графіка: Праці ТДАТА. Вип. 4. Т. 16. Мелітополь : ТДАТА, 2002. С. 31–35.
5. Найдіш В. М., Щербина В. М. Неперервна інтерполяція спіралеподібних ДПК спеціальною функцією. Праці Таврійська державна агротехнічна академія. Мелітополь, 2003. Вип. 4, т. 19. С. 3–6.
6. Найдіш В. М., Щербина В. М. Згущення однозначних дискретно представлених кривих. Прикладна геометрія та інженерна графіка. Київ, 2003. Вип. 27. С. 22–27.
7. Найдіш В. М., Щербина В. М. Формування обводів другого порядку гладкості на основі спеціальної функції. Сучасні проблеми геометричного моделювання: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Львів, 2003. С. 83–85.
8. Alrefo I. F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun, O., Miroshnyk, O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023. 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
9. Y. Havrylenko J. I. Cortez Y. Kholodniak G. T. Garcia. Modelling of surfaces of engineering products on the basis of array of points Tehnički vjesnik 27, 6(2020), 2034–2043. <https://doi.org/10.17559/TV-20190720081227>
10. Havrylenko Y. Kholodniak Y. Formation of geometric model of the impeller of the turbocharger. Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University, 2014. 14, 48–53.
11. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Miroshnyk O., Suprun O., Dereza O., Shshur T., Šrutek M. Representation of a monotone curve by a contour with regular change in curvature. Entropy, 2021. 23(7), 923, 1–14. <https://doi.org/10.3390/e23070923> Праці ТДАТУ Випуск 25. Том 2 110 Proceedings TSATU. 2025. 25.
12. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Bondarenko L., Suprun, O., Miroshnyk, O., Shshur, T., Šrutek, M., & Gackowska M. (2021). Interpolation with specified error of a point series belonging to a monotone curve. Entropy, 23(5), 493, 1–13. <https://doi.org/10.3390/e23050493>
13. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. Сучасні проблеми моделювання. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
14. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Моделирование каркаса динамических поверхностей. Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 21–24.
15. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Моделювання кривих ліній із заданою точністю. Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 28–31.
16. Мацулевич О. Є., Щербина В. М. Використання пакету прикладних програм NETCRACKER. Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях : матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конференції з міжнар. участю, м. Мелітополь, присвяченої 85-річчю кафедри вищої математики і фізики ТДАТУ, 11–13 вересня 2017 р. Мелітополь, 2017. С. 107–108.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2025

Стаття прийнята 05.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**O. Matsulevych, O. Mykhaylenko, M. Suprun**  
**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **DISCRETE INTERPOLATION OF SPIRAL-LIKE DISCREETLY REPRESENTED CURVES BASED ON A NONLINEAR LAW OF CHANGE OF ADJACENCY ANGLES**

### *Summary*

Experimental scientific research, as well as solving practical problems of modeling various types of channel surfaces of internal combustion engines and their flat cross-sections, pose many requirements. The geometric model and calculation algorithms must be simple, taking into account an arbitrary number of specified conditions, and ensuring the possibility of local changes in the shape of a curved line or surface without oscillation.

Existing and known methods are not able to fully meet these requirements. The problem can be solved within the framework of discrete geometric modeling (DGM). Solving these problems using discrete geometric modeling, one of the directions of which is discrete interpolation (condensation). Known DGM methods allow all of the above problems to be solved, with the exception of ambiguous curves, for which the appropriate methods have not yet been developed.

The research focuses on the problem of interpolation of discretely represented curves (DRC), in particular spirals and closed contours. A key element of the proposed approach is the analysis of the dynamics of angle changes between adjacent segments of a broken DPC line, which serves as the basis for forming the necessary set of angles for curve condensation.

A nonlinear formula is presented for changing the angles of adjacency during the condensation of spiral-shaped DPCs, which follows from the confirmed identity linking the angles before and after the condensation process. Various difference algorithms have been developed by imposing additional conditions on the ratio of angles. These algorithms guarantee excellent calculation accuracy and completely eliminate oscillations of the condensed contour. In addition, a condensation method based on geometric dependencies between contiguity angles has been developed and theoretically confirmed. The advantage of this method is its uniform efficiency on both convex segments and transition zones with the ability to track intersection points.

The practical significance of the results obtained in this work lies in improving the accuracy of modeling and reducing time and material costs by obtaining more sophisticated models. The proposed methods are intuitive and allow designers to achieve the desired result more quickly by correcting the shape.

Condensation based on the proposed nonlinear law of change in adjacency angles when solving difference schemes obtained by imposing certain relationships between adjacency angles allows for a wide variety of solutions, among which the optimal one can be selected or constructed according to a specific criterion.

**Keywords:** accompanying broken line, angle of adjacency, terminal difference, spiral-shaped discretely represented curve.



---

## ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

---

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-33>

UDC 664.68:634.36(477.62)

Iu. A. Goriainova, PhD in Tech. Sci., As. Prof.

ORCID: 0000-0003-1228-7793

O. O. Simakova, PhD in Tech. Sci., As. Prof.

ORCID: 0000-0002-4432-8337

*Kryvyi Rih National University, Mykhailo Tugan-Baranovsky Educational and Scientific Institute of Economics and Trade*

e-mail: goryaynova@donnuet.edu.ua

### **STUDY OF THE INFLUENCE OF WHITE AND BLACK MULBERRY ADDITIVES ON THE STATE OF THE PROTEIN-PROTEINASE COMPLEX OF WHEAT FLOUR**

*Summary.* The work is devoted to the study of the chemical composition of black and white mulberry fruits of the Donetsk region, as well as the study of the influence of fruit powder additives on the state of the protein-proteinase complex of wheat flour. The ash content, moisture content, simple and complex carbohydrates, ascorbic acid, carotene, fiber, and the content of ions of some important metals were determined in these samples. The indicators of the quantity and quality of wheat flour gluten in the presence of additives were established. The properties of gluten were determined by its spreading and the strength of wheat flour by the structural and mechanical properties of the dough in the presence of additives. It was established that black and white mulberry additives in concentrations of 1...1.5 % do not reduce the quality of wheat flour in terms of its technological properties.

*Keywords:* ash content, moisture, carbohydrates, ascorbic acid, carotene, fiber, gluten, dough spreading.

*Statement of the problem.* Complex processing of plant raw materials, especially local ones, remains always relevant. It is this raw material that is able to enrich the mineral and vitamin composition of food products, improve their organoleptic properties.

Recently, many products have been created using various food additives that improve their quality, biological, nutritional and consumer value. Powders from plant fruits are of particular importance in this direction – this is a concentrate of fruit pulp containing a large number of biologically active substances. The advantage of powders is their good regenerability when adding water, ease of mixing with other recipe components, low moisture content, which slows down microbiological processes in their mass, powders are easily transported and stored in airtight containers for quite a long time. This makes them very technological for enriching various culinary products with vitamins, organic acids, antioxidants, pectins in order to give them special functional properties.

At the same time, preference is given to substances of natural origin, which are contained, in particular, in plant raw materials and do not cause side effects on the human body. Therefore, the use of wild fruits, which are widely distributed in different regions and have a valuable chemical composition, is quite promising. Also, the introduction of additives obtained from wild raw materials into traditional food formulations allows not only to fully use the valuable chemical composition of plants, but also to obtain cheap, accessible raw materials and, thus, to expand the raw material base for the food technology industry [1; 2].



*Analysis of recent research.* The most promising direction for expanding the range of flour products is currently considered to be the integrated use of non-traditional raw materials – various products, mainly of plant origin with a complete chemical composition, containing biologically active substances.

The Kharkiv State Biotechnological University is working on the issue of using non-traditional plant raw materials in cracker technology, namely, powder of medicinal plants: licorice, yarrow, and St. John's wort. The concentrations of medicinal plant raw materials for the production of crackers have been scientifically substantiated, quantitative changes in physiological and functional ingredients in crackers with the addition of infusions of these plants have been established, and the feasibility of using this plant raw material to give crackers functional properties has been proven [3].

The Department of Hotel and Restaurant Business of the Kyiv National University of Culture and Arts is studying the possibility of using carrot puree and pumpkin seed oil in the preparation of flour confectionery products [4]. Scientists have developed a technology for the production of such products, studied their nutritional value and developed regulatory documentation for flour confectionery products. It has been established that the introduction of carrot puree and pumpkin seed oil into the technology for the preparation of flour confectionery products improves the nutritional value of the products.

Teachers of the Kyiv State University of Trade and Economics are conducting scientific research on the use of a mixture of dietary fiber and pumpkin seed meal in the technology of flour confectionery production to expand the range of confectionery products with increased biological value and products with a reduced calorie level [5]. Scientists have proven that adding a mixture of dietary fiber and pumpkin seed meal to the composition of cookies positively affected the chemical composition of the finished product, saturating it with useful and necessary mineral elements, vitamins, and dietary fiber for the human body.

The influence of herbal additives on the quality indicators of gingerbread is the subject of scientific research by the teachers of the Department of Technology and Organization of Restaurant Management of the Kyiv State University of Trade and Economics [6]. They substantiate the feasibility of using cedar meal, sesame flour, and phyt powder from snake gourd in gingerbread technologies. In finished products with additives, moisture, alkalinity, dependence of ultimate shear stress, and dependence of wetting of gingerbread on the content of herbal additives were determined, and a sensory evaluation of the organoleptic indicators of finished products was carried out.

Drobot V. I. and colleagues are studying the effect of flax seed meal on the quality of bread when it is included in the recipe [7]. A group of researchers led by Kalakura M. M. substantiated and developed a technology for using apple powder for the production of fruit biscuits, gingerbread and decorative semi-finished products [8].

At the Mykhailo Tugan-Baranovsky Educational and Scientific Institute of Economics and Trade of Kryvyi Rih National University, the Department of Technologies in Restaurant Management, Hotel and Restaurant Business and Tourism is conducting research on the use of purple amaranth, chokeberry and common mountain ash, and beer grains additives in the technology of flour confectionery products [9; 10; 11]. It has been proven that these additives have a positive effect on the baking properties of wheat flour and the quality of fat in these products, and improve the mineral composition of finished products.

One of the types of plant raw materials, which, in our opinion, can be used for the production of products with specified properties, are mulberry fruits of different varieties and different regions of Ukraine.

Analysis of literary sources shows that mulberry fruits contain vitamins B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C, PP, carotene, flavonoids, organic acids, pectin, coloring, tannins, iron ions, a large number of carbohydrates, including glucose, fructose, sucrose [12].

*Formulation of the purpose of the article (task statement).* The task of this article is to study the chemical composition of black and white mulberry fruits of the Donetsk region, comparative analysis, and also to identify the influence of powders from dried fruits on the state of the protein-proteinase complex of wheat flour.

*Main part.* In order to use mulberry as a food additive for the production of products with specified properties, we obtained the corresponding powders from dried black and white mulberry fruits. The ash content, moisture content, simple and complex carbohydrates, ascorbic acid, carotene, and fiber were determined in these samples by standard methods (Table 1).

Table 1

Chemical composition of mulberry fruit powders

Sample	Total moisture, %	Ash content, %	Ascorbic acid, mg/100g	Carotene, mcg/g	Simple carbohydrates %	Complex carbohydrates %	Fiber, %
Black mulberry	13.56 ± 5.42	7.18 ± 0.29	170.33 ± 6.81	0.39 ± 0.02	36.15 ± 1.45	37.53 ± 1.50	9.82 ± 0.39
White mulberry	12.75 ± 0.51	6.28 ± 0.25	80.08 ± 3.20	0.39 ± 0.02	36.33 ± 1.45	36.68 ± 1.47	8.42 ± 0.34

According to Table 1, black mulberry prevails in terms of mineral content (ash content), ascorbic acid, complex carbohydrates and fiber; the carotene content in white and black mulberry coincides and is equal to 0.39 mcg/g. In addition, in the analyzed samples of black and white mulberry, we determined the content of ions of some important metals by atomic absorption method (Table 2).

Table 2

The content of ions of some metals in the fruits of white and black mulberry

Sample	Content, mg/100 g of dry raw material						
	K	Na	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
Black mulberry	4,045.7 ± 121.4	173.2 ± 5.2	291.3 ± 8.7	395.8 ± 11.9	107.1 ± 3.2	1.2 ± 0.03	2.6 ± 0.1
White mulberry	2179.1 ± 65.4	156.7 ± 4.7	262.5 ± 7.9	356.8 ± 10.7	79.7 ± 2.4	0.9 ± 0.03	2.2 ± 0.01

Comparative analysis of different varieties of mulberry in the Donetsk region shows that black fruits prevail over white ones in terms of the content of all metal ions that have been identified. The rich mineral composition of the research objects allows us to conclude that white and black mulberries can be used as food additives in the production of products with specified properties, namely products for medical and prophylactic purposes.

The next stage of our research was to study the effect of white and black mulberry additives on the properties of wheat flour, which is the main recipe component of flour confectionery products. After all, the effect of new additives on wheat flour affects both the quality of the semi-finished product and the quality of the final product.

It is known that the formation of structural and mechanical properties of dough depends on gluten proteins – gliadin and glutenin. Considering the features of the chemical composition of white and black mulberry powders, which was determined by us earlier, we can assume their influence on the state of the protein-proteinase complex of wheat flour. This influence was judged by the properties of flour gluten, namely its quality and quantity, its ability and the dough ball to spread.

In this series of experiments, wheat flour was used, the gluten of which was characterized as good, of the 1st quality group. We selected a research interval of concentrations of powders from white and black mulberry fruits from 1 to 5 % by weight of wheat flour. The indicators of the quantity and quality of gluten of wheat flour of the same batch without additives were used as controls (Table 3).

The results of experimental studies showed that the introduction of powder from white and black mulberry fruits in an amount of 1...1.5 % does not significantly affect the amount of raw and dry gluten and the ability of gluten to stretch compared to the control sample.

Table 3

Evaluation of the quantity and quality of wheat flour gluten

Sample	Gluten content, %		Gluten quality indicators		
	raw	dry	color	elasticity	extensibility, cm
Control	26.0 ± 1.0	13.6 ± 0.5	light cream	good	12.0 ± 1.0 (average)
1% black mulberry	24.0 ± 1.0	12.0 ± 0.5	gray-blue	good	14.0 ± 1.0 (average)
1% white mulberry	25.4 ± 1.0	11.4 ± 0.5	cream	good	13.5 ± 1.0 (average)
1.5% black mulberry	25.2 ± 1.0	15.4 ± 0.5	dark gray	good	12.5 ± 1.0 (average)
1.5% white mulberry	25.4 ± 1.0	11.9 ± 0.5	dark cream	good	14.0 ± 1.0 (average)

Increasing the concentration of the additive to 3...5 % led to the fact that the dough frame was not formed at all, the gluten in this case could not be washed. Therefore, at this stage of the research it was determined that to preserve the quality of wheat flour gluten, it is advisable to use additives of powders from mulberry fruits in concentrations from 1 to 1.5 %.

Next, the properties of gluten were determined by its spreading using a method based on observing the change in the diameter of two gluten balls weighing 5 g each during 60 min of aging at a temperature of 30 °C. Spreading is characterized either by the value of the ball diameter  $D_{60}$ , or by the change in diameter compared to the initial  $\Delta D = D_{60} - D_0$ . The results of the studies are given in Table 4.

Table 4

Determining gluten properties by its spreading

Sample	Average ball diameter of two gluten samples, mm			
	initial, $D_0$	in 60 minutes, $D_{60}$	$\Delta D = D_{60} - D_0$	Conclusion on gluten quality
Control	24.3 ± 0.9	28.0 ± 1.1	3.7 ± 0.2	Strong
1% black mulberry	24.3 ± 0.9	30.0 ± 1.2	5.7 ± 0.2	Strong
1% white mulberry	23.8 ± 0.9	26.8 ± 1.1	3.0 ± 0.1	Strong
1.5% black mulberry	26.5 ± 1.1	28.8 ± 1.1	3.3 ± 0.1	Strong
1.5% white mulberry	23.5 ± 0.9	29.3 ± 1.2	5.8 ± 0.2	Strong

The experimental data obtained indicate that the sample with 1 % white mulberry addition is characterized by the least spreading of the gluten ball. It should also be noted that the gluten of all the samples studied is characterized as strong.

The strength of wheat flour was also determined by the structural and mechanical properties of the dough in the presence of black and white mulberry powders using a method based on observing the change in the diameter of a dough ball  $D_{180}$  weighing 100 g during its aging at a temperature of 30 °C for 180 min. The results obtained are presented in Table 5.

It was found that the dough balls with white mulberry powder additives changed their diameter almost as much as the control sample within 180 min, while the dough balls with black mulberry additives changed their diameter by approximately 13.8–20.8 % more than the control. All samples with additives according to the strength of wheat flour are considered strong.

*Conclusions.* The results of the conducted studies to determine the influence of white and black mulberry fruit powders on the state of the protein-proteinase complex of wheat flour indicate that additives in concentrations of 1...1.5 % do not reduce the quality of wheat flour in terms of its

Table 5

## Determining the strength of wheat flour by spreading a ball of dough

Sample	Average ball diameter of two dough samples, mm					Conclusion on gluten quality
	initial, $D_0$	in 60 minutes, $D_{60}$	in 120 minutes, $D_{120}$	in 180 minutes, $D_{180}$	$\Delta D = D_{180} - D_0$	
Control	$59.5 \pm 2.4$	$63.4 \pm 2.5$	$69.5 \pm 2.8$	$74.0 \pm 3.0$	$14.5 \pm 0.6$	Strong
1 % black mulberry	$55.8 \pm 2.2$	$63.5 \pm 2.5$	$69.3 \pm 2.8$	$73.3 \pm 2.9$	$17.5 \pm 0.7$	Strong
1 % white mulberry	$58.3 \pm 2.3$	$63.8 \pm 2.5$	$68.8 \pm 2.7$	$73.3 \pm 2.9$	$15.0 \pm 0.6$	Strong
1.5 % black mulberry	$56.0 \pm 2.3$	$65.5 \pm 2.6$	$68.8 \pm 2.7$	$72.5 \pm 2.9$	$16.5 \pm 0.7$	Strong
1.5 % white mulberry	$59.3 \pm 2.4$	$68.3 \pm 2.7$	$69.8 \pm 2.8$	$73.8 \pm 2.9$	$14.5 \pm 0.6$	Strong

technological properties. This gives grounds to use them in the technologies of confectionery flour products in order to increase the biological value of the latter.

Prospects for further research in this direction are to study the influence of additives of black and white mulberry powders of the Donetsk region on the state of the carbohydrate-amylase complex of wheat flour, as well as on the state of fat – the second recipe component of flour confectionery products.

### Bibliography

1. Лозова Т. М., Сирохман І. В. Наукове обґрунтування поліпшення споживних властивостей борошняних кондитерських виробів з використанням природної нетрадиційної сировини : монографія. Львів : ЛТЕУ, 2017. 328 с.
2. Lozova T. Modern approaches improve consumer properties and quality of confectionery products with consideration of their security / Lozova T., Syrohman I., Reshetylo L. Sciences of Europe (Prague, Czech Republic). *Technical sciences*. 2020. No. 47. Vol. 1. P. 50–56.
3. Черевична Н. І., Скирда О. Є., Симоненко В. І. Розробка нових видів крекерів з нетрадиційною рослинною сировиною. *Молодий вчений*. 2017. № 2 (42). С. 220–224.
4. Завадинська О. Ю. Технологія борошняних кондитерських виробів оздоровчого призначення. Траекторія науки [www.pathofscience.org](http://www.pathofscience.org). *Міжнародний електронний науковий журнал*. 2016. № 4 (9). Розділ «Виробництво та технології». С. 3.1–3.5. ISSN 2413-9009.
5. Бачинська Я. Використання нетрадиційної сировини при виробництві борошняних кондитерських виробів як прогресивний напрямок створення продуктів підвищеної біологічної цінності. Траекторія Науки. [www.pathofscience.org](http://www.pathofscience.org). *International Electronic Scientific Journal*. 2017. Т. 3, № 2. Section “Technics”. С. 7.1–7.10. DOI: 10.22178/pos.19-11
6. Кравченко М. Ф., Ярошенко Н. Ю. Дослідження впливу вмісту рослинних добавок на показники якості пряників. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2017. № 5/11 (89). С. 45–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.110168
7. Дробот В., Іжевська О., Бондаренко Ю. Шрот насіння льону в технології хлібобулочних виробів. *Харчова наука і технологія*. 2016. № 10 (3). С. 76–81. doi.org/10.15673/fst.v10i3.183
8. Калакура М. М., Ратушенко А. Т., Бублик Г. А. Оптимізація якості кондитерських виробів із використанням яблучного порошку. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 3/3 (29). С. 12–17. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.70976
9. Simakova O., Korenets Yu., Yudina T., Nazarenko I., Goriainova Iu. Examining a possibility of using purple amaranth in the technology for products made of yeast dough. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2. Issue 11 (92). P. 57–64. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.127173
10. Korenets Y., Goriainova I., Nykyforov R., Nazarenko I., Simakova O. Substantiation of feasibility of using black chokeberry in the technology of products from shortcake dough. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2. Issue 10 (86). P. 25–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.98409



11. Назаренко І. А., Горяйнова Ю. А., Боднарук О. А., Світлична О. О. Дослідження якості бубликів ванільних із використанням борошна з пивної дробини. *Праці ТДАТУ*. 2020. Вип. 20. Т. 2. С. 175–185. DOI: 10.31388/2078-0877-20-2-175-185

12. Олексійченко Н. О. Генотипи шовковиці в Україні та перспективи його використання : монографія / Н. О. Олексійченко, О. В. Галанова. Київ : ННЦ «Ін-т аграр. Економіки», 2008. 140 с.

*Стаття надійшла до редакції 2.10.2025*

*Стаття прийнята 10.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**Ю. Горяйнова, О. Сімакова**  
**Криворізький національний університет**  
**ННІ економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського**

## **ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ДОБАВОК БІЛОЇ ТА ЧОРНОЇ ШОВКОВИЦІ НА СТАН БІЛКОВО-ПРОТЕЇНАЗНОГО КОМПЛЕКСУ ПШЕНИЧНОГО БОРОШНА**

### *Анотація*

Роботу присвячено дослідженню хімічного складу плодів чорної та білої шовковиці Донецького регіону, його порівняльному аналізу, а також вивченню впливу добавок порошку з плодів на стан білково-протеїназного комплексу пшеничного борошна. Було встановлено в цих зразках зольність, вміст вологи, простих і складних вуглеводів, аскорбінової кислоти, каротину, клітковини стандартними методиками. Атомно-абсорбційним методом визначено вміст іонів деяких важливих металів у зразках білої та чорної шовковиці. Встановлені показники кількості (вміст сухої та сирої клейковини) та якості (колір, еластичність, розтяжність) клейковини пшеничного борошна в присутності добавок. Визначено властивості клейковини за її розпливанням та силу пшеничного борошна за структурно-механічними властивостями тіста в присутності порошоків із висушених плодів білої та чорної шовковиці. Результати досліджень свідчать, що добавки чорної та білої шовковиці у концентраціях 1...1,5 % не знижують якості пшеничного борошна щодо його технологічних властивостей. Збільшення концентрації добавок білої та чорної шовковиці до 3...5 % призводить до того, що зовсім не формується каркас тіста, клейковину в цьому випадку неможливо було відмити. Встановлено, що найменшим розпливанням кульки клейковини характеризується зразок з 1 % добавки білої шовковиці. Кульки тіста з добавками порошку білої шовковиці протягом 180 хв змінили діаметр, практично як і контрольний зразок, тоді як кульки тіста з добавками чорної шовковиці – приблизно на 13,8–20,8 % більше за контрольний. Клейковина всіх зразків, що досліджувалися, характеризується як сильна.

**Ключові слова:** зольність, вологість, вуглеводи, аскорбінова кислота, каротин, клітковина, клейковина, розпливання тіста.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-34>

УДК 664.8:664.69

А. В. Антоненко, к.т.н., доцент

ORCID: 0000-0001-9397-1209

Л. В. Баль-Прилипка, д.т.н., професор

ORCID: 0000-0002-9489-8610

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

e-mail: artem.v.antonenko@gmail.com

## ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ПОРОШКІВ З БАКЛАЖАНІВ

*Анотація.* У роботі науково обґрунтовано актуальність і практичну доцільність виробництва функціональних харчових порошків з баклажанів як ефективного способу збагачення раціону біологічно активними сполуками, зниження сезонних втрат сировини та раціонального використання некондиційної продукції. Баклажан є низькокалорійним овочем (вміст води  $\approx 91\%$ ), з глікемічним індексом 20 та збалансованим складом: білки – 1,2 г, жири – 0,1 г, вуглеводи – 4,8 г, вітаміни РР – 0,6–0,8 мг, В<sub>1</sub> – 0,04 мг, В<sub>2</sub> – 0,05 мг, макроелементи К – 235–245 мг, Са – 15–16 мг, Р – 34–35 мг, мікроелементи Fe – 0,4 мг, Mn – 0,21 мг (на 100 г свіжої маси), полісахариди (крохмаль 0,8–0,9 г, клітковина 2,5–3,5 г, пектини 0,8–1,4 г/100 г). Розроблено енерго- та ресурсозберігаючу технологію виробництва порошків, яка включає: миття, нарізання скибками 3–5 мм, бланшування в 1 %-му розчині NaCl з додаванням лимонної кислоти (5–10 хв), інфрачервоне сушіння при 50–60 °С до залишкової вологості  $\leq 10\%$ , подрібнення та фракціонування. Порівняно з конвективним методом тривалість зневоднення скорочено вдвічі, забезпечено інактивацію окиснювальних ферментів, збереження світлого кольору та отримання високоякісного продукту. У готових порошках концентрація мінеральних елементів зросла у 2,5–3,2 раза (Са –  $48,5 \pm 2,0$ ; К –  $740,4 \pm 2,0$ ; Р –  $98,8 \pm 1,5$ ; Mg –  $26,2 \pm 2,0$ ; Fe –  $1,7 \pm 0,5$  мг/100 г), вміст водорозчинних вітамінів – більш ніж у 10 разів (В<sub>1</sub> –  $0,40 \pm 0,01$ ; В<sub>2</sub> –  $0,50 \pm 0,06$ ; РР –  $5,22 \pm 0,10$  мг/100 г). За безпековими характеристиками відповідає нормативним вимогам: токсичні елементи (Pb  $\leq 0,1$  мг/кг, Cd і As не виявлено), мікробіологічні показники (КУО < 10<sup>1</sup> КУО/г, патогенна мікрофлора відсутня). Дослідження регідратаційних властивостей показало, що максимальна в'язкість і коефіцієнт набрякання (до 4,7) досягаються при температурі води 45–60 °С, тривалості 10–15 хв та гідромодулі 1:3–1:4. За цих умов відновлене пюре за реологічними та органолептичними властивостями практично не відрізняється від свіжого. Отримані порошки є концентрованим джерелом калію, магнію, заліза, вітамінів групи В і РР, мають термін зберігання 12 місяців при звичайних умовах, легко транспортуються та дозуються. Їх використання як функціональної добавки дозволяє цілеспрямовано формувати консистенцію, колір, аромат і смак готових страв, скорочувати час технологічного циклу та розширювати асортимент продуктів здорового харчування. Результати роботи створюють науково-практичну основу для промислового впровадження виробництва функціональних порошків з баклажанів.

*Ключові слова:* порошок з баклажанів, харчові порошки, технологія, функціональний продукт, оздоровчий продукт, дієтичні добавки, технологія, органолептичні показники, харчова цінність, безпечність продукції

*Постановка проблеми.* Світова наука одноставно визначає харчування як основний фактор, що забезпечує організм людини енергією, пластичним матеріалом для відновлення тканин і біологічно активними речовинами, які регулюють метаболічні процеси. У сучасному світі однією з найбільш актуальних проблем залишається дефіцит високоякісних продуктів харчування, здатних повноцінно задовольняти фізіологічні потреби населення в макро- й мікронутрієнтах. З огляду на погіршення екологічної ситуації та зростання техногенного навантаження на організм, щоденне харчування обов'язково має містити фізіологічно значущі кількості сполук із вираженою біологічною активністю: розчинні й нерозчинні харчові волокна, пектинові речовини, поліфенольні антиоксиданти, аскорбінову кислоту, каротиноїди та інші вітаміноподібні



компоненти. Це стимулює розвиток технологій збагачення харчових продуктів натуральними функціональними інгредієнтами рослинного походження, які дозволяють не лише усунути дефіцит окремих нутрієнтів, але й суттєво підвищити адаптаційні можливості організму до дії стресових факторів довкілля. Найбагатшим і найбільш доступним природним джерелом біологічно активних речовин є плоди, овочі та ягідні культури. На сьогодні особливого значення набуває цілеспрямований пошук і наукове обґрунтування використання рослинної сировини, що володіє оптимальним комплексом технологічних і функціональних характеристик. Такий підхід створює реальні передумови для розширення номенклатури продуктів харчування, цілеспрямованого покращення їх смако-ароматичного профілю, реологічних властивостей, стабільності структури, а також підвищення рівня мікробіологічної безпеки та загальної біологічної цінності готової продукції.

*Аналіз останніх досліджень.* Створення енерго- та ресурсоефективних технологій виробництва харчових порошків із плодово-овочевої та ягідної сировини на сьогодні є одним із пріоритетних напрямів харчової науки й промисловості, оскільки такі продукти дають змогу забезпечувати населення повноцінним і фізіологічно збалансованим харчуванням протягом усього року. Основна технологічна цінність порошкоподібних концентратів полягає в їхній високій швидкості регідратації: відновлені з порошків пюре, соки чи напої за органолептичними, реологічними та поживними характеристиками лише незначно поступаються свіжоприготовленим аналогам із необробленої сировини.

У низці досліджень уже запропоновано перспективні режими сушіння. Зокрема, встановлено, що комбіноване конвективно-контактне сушіння капусти за температур 50–70 °С забезпечує вищу збереженість біологічно активних речовин і кращі структурно-механічні властивості сухого продукту порівняно з традиційними промисловими зразками. Окремі роботи присвячено оптимізації сушіння яблучної сировини з акцентом на максимальне збереження аскорбінової кислоти, поліфенолів і пектину. Розроблено також промислові лінії для отримання широкого асортименту сушених овочевих, плодових і ягідних порошків із гарантовано високими споживчими характеристиками. Проте більшість існуючих технологій мають спільні суттєві недоліки: значні габаритні розміри сушильних установок, високу енергоємність процесів і тривалість циклів зневоднення, що суттєво обмежує їхню економічну ефективність.

Залежно від фізичного механізму передачі тепла до матеріалу розрізняють конвективний, контактний (кондуктивний), радіаційний (інфрачервоний), сублімаційний і діелектричний (НВЧ- та СВЧ-) способи сушіння. У сучасному промисловому виробництві сушеної рослинної сировини домінують конвективні й контактні сушарки завдяки їхній універсальності та можливості точного регулювання температурно-часових параметрів під конкретний вид сировини, що дозволяє отримувати продукцію стабільно високої якості. Водночас саме ці методи характеризуються найбільшим енергоспоживанням, значними тепловими втратами, громіздкістю обладнання та тривалістю процесу, що в умовах зростання вартості енергоносіїв робить пошук альтернативних, більш ефективних технологій зневоднення надзвичайно актуальним завданням.

Контактне (кондуктивне) сушіння реалізується шляхом передачі тепла від гарячої поверхні через теплопровідну стінку безпосередньо до шару матеріалу. Такий спосіб добре зарекомендував себе при зневодненні пюреподібних, пастоподібних або рідких продуктів, однак для цільних шматочків овочів чи фруктів його ефективність суттєво знижується через низьку теплопровідність самої сировини та обмежену площу контакту. Саме тому контактні сушарки практично не застосовують для отримання порошків із більшості видів неподрібненої рослинної сировини.

Значно перспективнішим вважається інфрачервоне (радіаційне) сушіння, яке завдяки проникненню електромагнітних хвиль середнього діапазону в товщу матеріалу забезпечує інтенсивний і рівномірний нагрів по всьому об'єму. Це дозволяє скоротити тривалість процесу



в 2–4 рази порівняно з конвективними методами, мінімізувати термічну деструкцію термолабільних сполук (вітаміну С, поліфенолів, антоціанів) і сформувати високопористу структуру сухого продукту, що позитивно позначається на швидкості та повноті подальшої регідратації.

Центральним науково-практичним завданням залишається обґрунтований вибір методу зневоднення для кожного конкретного виду сировини з урахуванням її морфологічних, хімічного складу та фізико-хімічних особливостей. Баклажан, як об'єкт дослідження, вирізняється високим початковим вмістом вологи (до 92–94 %), значною часткою м'якуша з низькою щільністю, присутністю фенольних сполук, схильних до ферментативного та неферментативного окиснення, а також специфічним комплексом розчинних і протопектинових речовин. Усе це зумовлює необхідність детального вивчення поведінки сировини під час сушіння та визначення раціональних технологічних режимів, які забезпечать максимальне збереження біологічно активних компонентів і формування бажаних споживчих властивостей порошку. Тому надзвичайно актуальним є комплексний аналіз товарознавчих і фізико-хімічних характеристик свіжих баклажанів, дослідження динаміки фізико-хімічних перетворень у процесі різних способів зневоднення та встановлення оптимальних параметрів отримання порошків із високими функціонально-технологічними й органолептичними показниками. Лише на основі таких даних можна науково обґрунтувати доцільність і економічну ефективність впровадження промислового виробництва сушених порошків із баклажанів як цінного функціонального інгредієнта або самостійного продукту здорового харчування.

*Формулювання мети статті.* Метою проведеного дослідження було наукове обґрунтування ресурсоефективної технології отримання високоякісних харчових порошків із баклажанів, а також всебічна характеристика їхніх функціонально-технологічних, поживних і безпекових властивостей.

Для досягнення мети було сформульовано та послідовно вирішено такі дослідницькі завдання:

- провести детальний аналіз товарознавчих, морфологічних і фізико-хімічних характеристик свіжих баклажанів як сировини;
- обґрунтувати оптимальну схему підготовчих і основних технологічних операцій перед і під час зневоднення;
- встановити особливості протікання процесів сушіння баклажанів залежно від обраного способу та режимів;
- визначити харчову та біологічну цінність отриманих порошків;
- дати комплексну оцінку органолептичних, фізико-хімічних, реологічних показників і мікробіологічної безпеки готової продукції.

Усі аналізи проводилися із застосуванням стандартизованих і загально визнаних методик, що забезпечило достовірність і відтворюваність результатів. Хімічний склад сировини та порошків визначали за чинними державними стандартами (ГОСТ 8756.1-2017, ГОСТ 26183-84, ГОСТ 26313-84 та ГОСТ 33320-2015):

- масову частку вологи встановлювали термогравіметричним методом при 105 °С до постійної маси;
- вміст сирого жиру визначали екстракційно-ваговим методом у апараті Сокслета з використанням петролейного ефіру;
- вміст сирого протеїну розраховували за К'ельдалем з коефіцієнтом перерахунку загального азоту 6,25;
- зольність визначали ваговим методом після спалювання наважки в муфельній печі при 550 °С.



Вміст макро- та мікроелементів досліджували методом атомно-абсорбційної спектроскопії на спектрофотометрі С-115М1 («НПП Академприбор», Україна) в полум'ї ацетилен-повітря; додаткову верифікацію проводили рентгенофлуоресцентним методом на приладі ElvaX (Elvatech, Україна). Кальцій і фосфор кількісно визначали колориметричними методами, йод – інверсійною вольтамперометрією на аналізаторі АВА-3 (Україна). Мікробіологічну безпечність контролювали за показниками БГКП (коліформи), кМАФАНМ, наявності патогенної мікрофлори (зокрема *Salmonella*, *L. monocytogenes*, *S. aureus*), пліснявих грибів і дріжджів згідно з ДСТУ 7038:2009 та ДСТУ 7357:2013. Вміст соланіну в сировині та порошках визначали гравіметричним методом після екстракції та осадження.

Усі вимірювання виконували в трьох-п'ятиразовій біологічній і аналітичній повторності, результати обробляли методами математичної статистики з використанням стандартного програмного забезпечення. Для забезпечення високої статистичної надійності всі аналізи виконували в п'ятикратній біологічній та аналітичній повторності. Обробку результатів проводили стандартними методами варіаційної статистики з обчисленням середнього арифметичного значення та середньоквадратичного відхилення. Усі числові дані наведено в одиницях СІ. Вміст сухих розчинних речовин, загальних цукрів, інвертного цукру та сахарози визначали рефрактометричним і фотоколориметричним методами відповідно до ДСТУ 4954:2008 та ДСТУ 5063:2008 після відповідної підготовки проб.

Баклажан (*Solanum melongena* L.) належить до цінних овочевих культур завдяки збалансованому хімічному складу, низькій енергетичній цінності та вираженій фізіологічній дії. Регулярне вживання плодів сприяє нормалізації водно-сольового обміну, виявляє м'яку сечогінну дію, знижує рівень холестерину в крові, поліпшує функціональний стан серцево-судинної системи та опорно-рухового апарату. Плоди містять легкозасвоювані вуглеводи, рослинні білки, мінімальну кількість жирів, а також комплекс біологічно активних речовин: вітаміни групи В (тіамін, рибофлавін), нікотинову кислоту, каротиноїди та аскорбінову кислоту. Вуглеводний склад представлений моно- та дисахаридами (глюкоза, фруктоза, сахароза), полісахаридами (крохмаль, геміцелюлози), пектиновими речовинами та харчовими волокнами. Особливо багатий мінеральний комплекс плодів: калій (до 240 мг/100 г), фосфор, кальцій, магній, залізо, марганець, цинк, мідь і алюміній. Вміст аскорбінової кислоти коливається в широких межах (3–18 мг/100 г) залежно від сорту, агротехніки та кліматичних умов вирощування.

Об'єктом дослідження був баклажан сорту «Алмаз», вирощений у 2016–2018 роках у трьох районах Херсонської області (Білозерський, Олешківський, Бериславський), яка є одним із провідних регіонів України з виробництва теплолюбних пасльонових і баштанних культур завдяки сприятливому помірно-континентальному клімату, великій кількості сонячних днів і розвиненій системі зрошення. Хімічний склад сировини досліджували з урахуванням ґрунтово-кліматичних особливостей регіону (табл. 1). Отримані дані стали основою для оцінки технологічної придатності баклажанів до виробництва функціональних порошоків і дозволили врахувати можливі коливання складу сировини при розробці універсальних режимів сушіння.

Незалежно від відмінностей у гранулометричному та хімічному складі ґрунтів трьох досліджуваних районів, хімічний склад плодів сорту «Алмаз» виявився статистично однорідним. Така стабільність пояснюється інтенсивною агротехнікою з обов'язковим внесенням комплексних мінеральних і органічних добрив, що нівелює регіональні відмінності. За даними моніторингу постачальників і оптових баз, основний обсяг товарних баклажанів на ринки Херсонської області надходить саме з Олешківського (колишнього Цюрупинського) району, тому для всіх подальших технологічних експериментів було відібрано сировину саме звідти.

Вуглеводний комплекс плодів представлено (г/100 г сирової маси): моносахаридами – глюкоза  $\approx 1,8\text{--}3,2$ ; фруктоза  $\approx 0,7\text{--}1,1$ ; дисахаридом сахарозою  $\approx 0,3\text{--}0,5$ ; полісахаридами – крох-

Таблиця 1

Хімічний склад свіжих баклажанів (Сорт «Алмаз», урожай 2024 р.)

Показник	Білозерський район	Цюрупинський район	Бериславський район
Вода, г	91	91	91
Білок, г	1,2	1,2	1,2
Жир, г	0,1	0,1	0,1
Вуглеводи, у т. ч:	4,5	4,8	5,1
– сахароза, г	0,4	0,4	0,4
– глюкоза, г	2,4	2,9	3
– фруктоза, г	0,8	0,7	0,8
– крохмаль, г	0,9	0,8	0,9
Харчові волокна, г	2,5	2,4	2,5
Вітаміни, мг/100 г			
Нікотинова кислота	0,6	0,6	0,7
Бета-каротин	0,01	0,01	0,01
Ацетилсаліцилова кислота	5	4,5	5,5
Токоферол	0,1	0,1	0,1
Тіамін	0,04	0,04	0,04
Рибофлавін	0,05	0,05	0,05
Ніацин	0,8	0,8	0,8
Макроелементи, мг/100 г			
Калій	238	235	245
Кальцій	15	15	16
Магній	9	9	10
Натрій	7	6	6
Фосфор	34	35	35
Хлор	47	46	46
Сіра	15	14	15
Мікроелементи, мг/100 г			
Залізо	0,4	0,4	0,4
Цинк	0,29	0,29	0,29
Мідь	0,14	0,14	0,14
Марганець	0,21	0,21	0,21

маль  $\approx 0,6-1,0$ ; клітковина  $\approx 2,5-3,5$ ; ектинові речовини  $\approx 0,8-1,4$  (у перерахунку на кальцієвий пектат); гетерополісахаридами слизового типу, що містять залишки галактуранової кислоти та аміноцукрів. Важливим фізіологічним показником є глікемічний індекс баклажанів, який становить 15–20 одиниць (залежно від способу кулінарної обробки), що дозволяє віднести їх до продуктів із низьким ГІ. Такі продукти рекомендовані для раціонів при метаболічному синдромі, цукровому діабеті II типу та програмах зниження маси тіла, оскільки забезпечують повільне та рівномірне надходження глюкози в кров. Значна частка баклажанів (до 25–30 % за сезон) не відповідає товарним стандартам через механічні пошкодження, неправильну форму, перестиглість або сонячні опіки й залишається нереалізованою. Така сировина зазвичай знищується на полях або полігонах, що призводить до суттєвих економічних і екологічних втрат. Розробка технологій переробки некондиційної, але фізіологічно безпечної сировини на функціональні порошки дає змогу суттєво знизити відходи, підвищити рентабельність виробництва та забезпечити населення доступним джерелом дієтичних волокон, калію й антиоксидантів.

Сушіння залишається одним із найбільш універсальних і економічно обґрунтованих методів консервування овочевої сировини. У світовій практиці для зневоднення овочів застосовують сублімаційне, конвективне, контактне, інфрачервоний, НВЧ-, СВЧ- та комбіновані способи. Аналіз літературних джерел показав, що існують розробки з сушіння баклажанів для



отримання чипсів і снєків із збереженням кольору та смаку, проте спеціалізованих технологій виробництва тонкодисперсних харчових порошків із заданими функціонально-технологічними властивостями не виявлено. З метою вибору оптимальної схеми підготовки сировини та режимів зневоднення було проведено порівняльний аналіз основних технологічних операцій і обладнання (табл. 2), що дозволило обґрунтувати вибір найбільш перспективного методу для подальших досліджень.

Таблиця 2

## Основні технологічні операції з сушіння баклажанів

№	Основні операції		
	Класична технологія	Технологія прототип	Розроблена технологія
1	Підготування сировини, нарізання баклажанів смужками товщиною 2–3 мм	Підготування сировини, нарізання баклажанів поздовжніми смужками довжиною 6–8 см, товщиною 2–3 мм	Підготування сировини, нарізання баклажанів смужками товщиною 3–5 мм
2	Соління і витримання 10–20 хв	Приготування 1 % розчину солі з аскорбіновою кислотою	Приготування 1 % розчину солі з цитриновою кислотою та доведення розчину до кипіння
3	Промивання	Витримання нарізаного баклажану впродовж 20 хв	Витримання нарізаного баклажану впродовж 5–10 хв. в гарячому розчині
4	Висушування в конвективних сушарках за температури від 40–70 °С до вологості 14 %	Видалення вологи та промивання	Видалення вологи
5	–	Витримання в купажних соках впродовж 30 хв	Сушіння в інфрачервоній сушарці при температурі 50–60 °С, до вологості 10 %
6	–	Висушування в конвективній сушарці за температури 70 °С протягом 10 хв, а потім за температури 55 °С протягом 5 год	Подрібнення сушеного баклажану на порошки
7	–	–	Просіювання

Розроблена технологія з використанням інфрачервоного сушіння дозволяє отримати з баклажанів високоякісний сушений напівфабрикат, за органолептичними та функціональними характеристиками не нижчий, а в багатьох випадках і кращий за аналоги, отримані традиційними методами. Це створює передумови для виробництва тонкодисперсних порошків стабільно високої якості, придатних як для прямого вживання, так і для використання як функціонального інгредієнта. Застосування інфрачервоного випромінювання забезпечує щадний тепловий режим, що мінімізує деструкцію термолабільних біологічно активних сполук і сприяє максимальному збереженню поживної цінності сировини.

У процесі зневоднення відбувається природна концентрація мінеральних речовин у 2,5–3,2 раза. Середній мінеральний профіль порошків (мг/100 г сухої речовини) характеризується високим вмістом фізіологічно важливих елементів: калій –  $740,4 \pm 2,0$ ; фосфор –  $98,80 \pm 1,5$ ; кальцій –  $48,5 \pm 2,0$ ; магній –  $26,18 \pm 2,0$ ; залізо –  $1,7 \pm 0,5$ . Цей комплекс відіграє ключову роль у підтриманні електролітного балансу, формуванні та регенерації кісткової тканини, профілактиці анемії, а також виявляє радіопротекторні властивості. Концентрація водорозчинних вітамінів групи В і ніацину в порошках зростає більш ніж у 10 разів порівняно зі свіжою сировиною: тіамін (В<sub>1</sub>) –  $0,40 \pm 0,01$  мг/100 г; рибофлавін (В<sub>2</sub>) –  $0,50 \pm 0,06$  мг/100 г; нікотинова кислота (РР) –  $5,22 \pm 0,10$  мг/100 г. Ці сполуки є коферментами основних метаболічних шляхів, беруть участь у вуглеводному, білковому та ліпідному обміні, сприяють підвищенню неспецифічної резистентності організму та нормалізації енергетичного обміну.



Порошки з баклажанів є цінним концентрованим джерелом калію, магнію, заліза, вітамінів групи В і РР, що робить їх перспективним функціональним інгредієнтом для збагачення продуктів здорового та лікувально-профілактичного харчування, особливо в умовах дефіциту цих нутрієнтів у раціоні населення. Включення таких порошоків у рецептури харчових виробів неминуче впливає на реологічні властивості, колір, ароматичний профіль і смакові характеристики готової продукції, тому необхідне детальне вивчення їхніх технологічних і споживчих властивостей. Основні органолептичні характеристики отриманих функціональних порошоків з баклажанів наведено в табл. 3.

Таблиця 3

## Органолептичні показники функціональних порошоків

Показник	Характеристика порошоків
Зовнішній вигляд	Порошкоподібна суміш, однорідна, без сторонніх домішок, допускається наявність легкорозчинних грудок
Консистенція	однорідна
Дисперсність	< 0,5 мм
Колір	Від світло коричневого до коричневого
Запах	Властивий цій сушеній сировині, без сторонніх запахів
Смак	Присмак сушеної сировини, отриманий порошок без сторонніх домішок

За вмістом токсичних елементів порошок з баклажанів повинен відповідати вимогам, зазначеним в табл. 4.

Таблиця 4

## Вміст токсичних елементів порошоків з баклажан

Найменування показника	Допустимий рівень, мг/кг, не більше	Порошки з баклажан	Метод контролю
Свинець	0,5	$0,1 \pm 0,02$	За ГОСТ 26932
Кадмій	0,03	Не виявлено	За ГОСТ 26933
Миш'як	0,2	Не виявлено	За ГОСТ 26930
Мідь	5,0	0,16	За ГОСТ 26931
Цинк	10,0	2,04	За ГОСТ 26934

За мікробіологічними показниками порошок з баклажанів повинен відповідати вимогам, зазначеним в табл. 5.

Таблиця 5

## Мікробіологічні показники порошоків з баклажанів

Показник	Норма	Порошки з баклажан	Метод контролю
Кількість мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів, КУО/г, не більше	$5,0 \times 10^4$	$< 1,0 \cdot 10^1$	За ГОСТ 10444,15
Бактерії групи кишкових паличок (коліформи), в 0,1 г продукту	Не допускаються	Не виявлено	За ГОСТ 26972
Патогенні мікроорганізми, в т.ч. бактерії роду Сальмонела, в 25 г продукту	Не допускаються	Не виявлено	ГОСТ 9958

Встановлено, що порошки з баклажанів можуть вводитися в рецептури як у сухому вигляді, так і у попередньо відновленому стані. Проте для забезпечення високих органолептичних і структурно-механічних характеристик готових виробів доцільно використовувати саме гідратовану форму. З метою визначення оптимальних умов регідратації досліджували зразки з фік-



сованою масою порошку (20 г) та варійованим об'ємом води при гідромодулях 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 і 1:6. Тривалість набрякання становила 5, 10, 15, 20 і 30 хв. Перед відновленням порошок обов'язково просівали через сито з розміром вічок 0,5 мм для видалення можливих агломератів і сторонніх включень.

Реологічні властивості відновлених систем (динамічна в'язкість, межа плинності, тиксотропні характеристики) оцінювали на ротаційному віскозиметрі Rheotest 2.1 з циліндричною системою вимірювання при  $20 \pm 1$  °С. Відновлене пюре розглядали як в'язкопластичну дисперсну систему з вираженою неньютонівською поведінкою. При гідромодулі 1:1 динамічна в'язкість відновленого пюре становила 18,4 Па · с, що на 26 % перевищувало відповідний показник свіжоприготовленого пюре-контролю. Зі збільшенням кількості води до співвідношення 1:3 в'язкість знижувалася і становила лише 94 % від контролю. При гідромодулях 1:5 і 1:6 спостерігалось подальше зменшення в'язкості до 64,2 % і 39,1 % відповідно. Аналогічна залежність простежувалася для динамічної межі плинності та тиксотропного гістерезису.

Максимальне значення коефіцієнта набрякання (4,6–4,8 г води/г сухого порошку) досягалося при гідромодулях 1:3–1:4 і практично не зростало при подальшому розведенні. Час досягнення рівноважного набрякання при кімнатній температурі становив 15–20 хв. Температура води для гідратації суттєво впливає на кінетику процесу. При 20 °С коефіцієнт набрякання за 20 хв змінювався від 2,7 (1:2) до 3,8 (1:5). Підвищення температури до 40–45 °С прискорювало процес і збільшувало кінцевий коефіцієнт до 3,5–4,1 відповідно. Оптимальний діапазон температур води 50–60 °С забезпечував максимальне набрякання (4,7–4,9) вже за 10–12 хв і формування відновленого пюре з реологічними характеристиками, найближчими до свіжого аналога. Отримані дані свідчать, що для практичного використання порошоків з баклажанів у складі харчових систем рекомендується попередня гідратація при гідромодулі 1:3–1:4, температурі води 50–60 °С і тривалості 10–15 хв. За таких умов відновлене пюре максимально наближається за структурно-механічними та органолептичними властивостями до свіжоприготовленого, що дозволяє ефективно застосовувати його як функціонально-технологічний напівфабрикат.

Температура гідратуєчої води є одним із визначальних факторів, що впливають на кінетику та повноту регідратації. Найвища швидкість і ступінь відновлення структури спостерігається в діапазоні 45–60 °С; при подальшому підвищенні температури додаткового приросту набрякання не відбувається. При 20 °С коефіцієнт набрякання за 20 хв змінюється від 2,7 (гідромодуль 1:2) до 3,8 (1:4–1:5). Підвищення температури до 40 °С і 60 °С збільшує ці значення до 3,5–3,8 і 4,1–4,7 відповідно. Важливим показником якості відновленого пюре є вміст сухих розчинних речовин у надосадовій рідині після центрифугування. Під дією підвищеної температури та вологи відбувається часткова деструкція протопектину і геміцелюлоз клітинних стінок з переходом розчинних фракцій пектину у вільний стан. Це сприяє формуванню гелетворюючих властивостей і бажаного рівня консистенції відновленого продукту. Водоутримуюча здатність (ВУЗ) відновленого пюре зростає зі збільшенням тривалості контакту з водою та її температури до 60 °С; при 80 °С спостерігається зниження ВУЗ через надмірну деструкцію полімерів. Плинність системи за перші 10 хв збільшується на 5,5 %, за 20 хв – на 7,8 %, за 30 хв – на 9,3 %. Найвищі значення пластичної в'язкості фіксуються в перші 10–15 хв, що пояснюється швидким вивільненням розчинного пектину.

Екстракція розчинних компонентів має дифузійний характер і досягає максимуму протягом перших 10–15 хв. Подальше подовження часу гідратації призводить до часткового зворотного зв'язування розчинених полімерів і зниження інтенсивності процесу. Динамічна в'язкість відновлених систем зростає з підвищенням температури води, досягаючи максимуму при 45–60 °С. При нижчих гідромодулях (1:2–1:3) для досягнення пікового значення в'язкості потрібна вища температура. При фіксованій температурі 50–55 °С і гідромодулях 1:3–1:6 мак-



симальне зростання в'язкості відбувається протягом перших 10–15 хв, після чого показник стабілізується.

Раціональними параметрами регідрації порошоків з баклажанів, що забезпечують найближчі до свіжого пюре реологічні та органолептичні властивості є температура води – 45–60 °С; тривалість набрякання – 10–15 хв; гідромодуль – 1:3–1:4. Саме за цих умов відновлений напівфабрикат демонструє оптимальне поєднання в'язкості, водоутримуючої здатності та стійкості структури, що робить його технологічно зручним для введення в різноманітні харчові композиції. Отримані порошки з баклажанів мають низку суттєвих технологічних і споживчих переваг порівняно зі свіжою сировиною:

- у процесі сушіння відбувається повна інактивація та значне зниження вмісту соланіну до безпечного рівня (< 10 мг/100 г), що робить продукт придатним навіть для дитячого та дієтичного харчування;

- біологічно активні речовини (калій, магній, вітаміни групи В, РР, пектинові речовини, харчові волокна) концентруються в 8–12 разів, що перетворює порошок на високоефективний функціональний інгредієнт;

- гарантований термін зберігання при кімнатній температурі становить не менше 12 місяців без втрати поживної цінності та органолептичних показників;

- значно скорочуються вимоги до складських приміщень (відсутність потреби в холодильному обладнанні), зменшуються транспортні витрати та логістичні втрати завдяки компактності й низькій масі упаковки;

- високі регідраційні характеристики (коефіцієнт набрякання до 4,8, швидке відновлення за 10–15 хв) дають змогу використовувати порошок як у сухому, так і у відновленому вигляді для швидкого введення в найрізноманітніші рецептури – від соусів, супів-пюре й овочевих котлет до хлібобулочних виробів, напівфабрикатів і функціональних напоїв.

Це суттєво скорочує технологічний цикл приготування страв, знижує енергозатрати й сезонну залежність виробництва, а також дозволяє розширити асортимент продуктів здорового, лікувально-профілактичного та спеціалізованого харчування з прогнозованими функціональними властивостями. Таким чином, впровадження порошоків з баклажанів відкриває нові можливості для раціонального використання сировинних ресурсів і створення інноваційної продукції з високою доданою вартістю.

*Висновки.* Проведені дослідження підтвердили, що баклажан є цінною низькокалорійною сировиною (енергетична цінність  $\approx 25$  ккал/100 г) з вмістом білків 1,2 г, жирів 0,1 г та вуглеводів 4,8 г на 100 г свіжої маси. Плоди вирізняються високим вмістом калію (235 мг/100 г), помірною кількістю фосфору, кальцію, магнію та мікроелементів, а також низьким глікемічним індексом ( $GI = 20$ ), що робить їх перспективними для функціонального та дієтичного харчування. Розроблено та науково обґрунтовано ресурсозберігаючу технологію виробництва харчових порошоків з баклажанів. Ключовою відмінністю від відомих аналогів є попередня обробка сировини: бланшування в 1%-му розчині NaCl з додаванням лимонної кислоти протягом 10 хв з подальшим інфрачервоним сушінням при 50–60 °С, що забезпечує: інактивацію окиснювальних ферментів і зниження вмісту соланіну до безпечного рівня; збереження природного світлого відтінку сушеного продукту; скорочення тривалості зневоднення на 50 % порівняно з конвективним методом; максимальне збереження біологічно активних речовин.

Отримані порошки характеризуються високою концентрацією мінеральних елементів (мг/100 г сухої речовини): калій –  $740,4 \pm 2,0$ ; фосфор –  $98,80 \pm 1,5$ ; кальцій –  $48,5 \pm 2,0$ ; магній –  $26,18 \pm 2,0$ ; залізо –  $1,7 \pm 0,5$ , а також водорозчинних вітамінів: тіамін ( $B_1$ ) –  $0,40 \pm 0,01$ ; рибофлавін ( $B_2$ ) –  $0,50 \pm 0,06$ ; нікотинова кислота (РР) –  $5,22 \pm 0,10$  мг/100 г. За органолептичними показниками порошок являє собою однорідну, сипучу масу світло-коричневого або коричне-



вого кольору з розміром частинок  $\leq 0,5$  мм і притаманним баклажану ароматом. За вмістом токсичних елементів, пестицидів і мікробіологічними показниками продукція повністю відповідає вимогам чинних нормативів для сушеної овочевої сировини.

Встановлено оптимальні параметри регідратації: температура води 45–60 °С, тривалість набрякання 10–15 хв, гідромодуль 1:3–1:4. За цих умов відновлене пюре за реологічними та органолептичними властивостями максимально наближається до свіжоприготовленого. Розроблена технологія дозволяє отримувати високоякісний, безпечний і біологічно цінний функціональний порошок з баклажанів, придатний для промислового виробництва та широкого використання як у відновленому вигляді, так і як збагачувальної добавки в різноманітних харчових системах.

#### *Список використаних джерел*

1. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О. Харчові порошки з рослинної сировини. Класифікація, методи отримання, аналіз ринку. *Biotechno-logia Acta*. 2010. Т. 3, № 5. С. 43–49.
2. Спосіб виробництва сушеної капусти: Пат. № 107146 UA. МПК: A23L 3/40 / Гавриш А. В., Новосад О. О., Погожих М. І., Неміріч О. В., Кардавар К. М., Євлаш В. В., Тарасенко Т. А. № а201308406; заявл. 04.07.2013; опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22.
3. Pyo J. G. Preparing method of apple chips: Pat. No. 1020140040963 Korean. 2014.
4. Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О. Нові харчові продукти в екології харчування. Львів, 2009. С. 75–76.
5. Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення : монографія / О. І. Черевко. Харків : ХДУХТ, 2017. С. 591.
6. Nutritional value of a dry soluble gerodietetic product for enteral nutrition / D. Antiushko, T. Bozhko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 5. 35–42
7. Поперечний А. М., Корнійчук В. Г., Шеїна А. В. Дослідження процесу сушіння картопляного пюре. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2010. Вип. 25.
8. Шеїна А. В., Мещанін Б. А. Експериментальні дослідження сушіння гарбузового пюре. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій”. Т. 3. Тернопіль : ТНТУ, 2017. С. 170–171.
9. Aydogdu A., Sumnu G., Sahin S. Effects of Microwave-Infrared Combination Drying on Quality of Eggplants. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. Vol. 8, Issue 6. P. 1198–1210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1484-1>
10. ДСТУ 8446:2015. Продукти харчові. Методи визначення кількості мезофільних аеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 16 с.
11. ДСТУ 8447:2015. Продукти харчові. Метод визначення дріжджів і плісневих грибів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 15 с.
12. Стратегії сталого розвитку в туризмі та готельно-ресторанному бізнесі: можливості і проблеми запровадження в Україні. / Чепурда Г.М. ЧДТУ, 2021. С. 189.
13. М. І. Пересічний, М. Ф. Кравченко. Технологія продукції громадського харчування з використанням біологічно активних добавок: монографія / Київ : КНТЕУ, 2003. С. 322.
14. Yatsenko V. M. Financial-economic and innovative support of entrepreneurship development in the spheres of economy, tourism and hotel-restaurant business. *Agenda Publishing House, Coventry, United Kingdom*. 2017.
15. Сирохман І. В., Завгородня В. М. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення: навч. пос. К. : Центр учбової літератури, 2009. 544 с.
16. Пилипчук Г. Баклажани – заслужено популярні. Медична газета України «Ваше здоров'я». 2010. № 13. С. 2–3.
17. Polyphenols content and antioxidant capacity of eggplant pulp / Singh A. P., Luthria D., Wilson T., Vorsa N., Singh V., Banuelos G. S., Pasakdee S. *Food Chemistry*. 2009. Vol. 114, Issue 3. P. 955–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.10.048>
18. Magioli C., Mansur E. Eggplant (*Solanum melongena* L.): tissue culture, genetic transformation and use as an alternative model plant. *Acta Botanica Brasiliica*. 2005. Vol. 19, Issue 1. P. 139–148. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-33062005000100013>



19. Boubekri C., Rebiai A., Lanez T. Study of antioxidant capacity of different parts of two south Algerian eggplant cultivars. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2015. Vol. 4, Issue 2. P. 164–174. DOI: <https://doi.org/10.4314/jfas.v4i2.6>
20. Antioxidant activity of different parts of eggplant / Jung E.-J., Bae M.-S., Jo E.-K., Jo Y.-H., Lee S.-C. *Journal of medicinal plants research*. 2011. Vol. 5, Issue 18. P. 4610–4615.
21. Глікемічний індекс продуктів – таблиця. URL: <http://medfond.com/static/glikemichnii-indeks-produktiv-tablicya.html>
22. Дьякова Ю., Орлова Н. С-вітамінність баклажанових снєків. Товари і ринки. 2014. № 1. С. 75–83.
23. Донченко Л. В., Карпович Н. С., Костенко Т. І. Властивості пектинових речовин. К.: Знання, 1992. 34 с.

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2025*

*Стаття прийнята 15.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**A. Antonenko, L. Bal-Prylko**  
**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine**

## TECHNOLOGICAL ASPECTS OF PRODUCTION OF EGGPLANTE POWDER

### *Summary*

The paper scientifically substantiates the relevance and practical feasibility of producing functional food powders from eggplants as an effective way to enrich the diet with biologically active compounds, reduce seasonal losses of raw materials, and rationally use substandard products. Eggplant is a low-calorie vegetable (water content  $\approx 91\%$ ), with a glycemic index of 20 and a balanced composition: proteins – 1.2 g, fats – 0.1 g, carbohydrates – 4.8 g, vitamins PP – 0.6–0.8 mg, B<sub>1</sub> – 0.04 mg, B<sub>2</sub> – 0.05 mg, macronutrients K – 235–245 mg, Ca – 15–16 mg, P – 34–35 mg, micronutrients Fe – 0.4 mg, Mn – 0.21 mg (per 100 g of fresh weight), polysaccharides (starch 0.8–0.9 g, fiber 2.5–3.5 g, pectins 0.8–1.4 g/100 g). An energy- and resource-saving technology for powder production has been developed, which includes: washing, cutting into 3–5 mm slices, blanching in a 1 % NaCl solution with the addition of citric acid (5–10 min), infrared drying at 50–60 °C to a residual moisture content of  $\leq 10\%$ , grinding and fractionation. Compared to the convective method, the duration of dehydration is halved, inactivation of oxidative enzymes, preservation of light color and obtaining a high-quality product are ensured. In the finished powders, the concentration of mineral elements increased by 2.5–3.2 times (Ca –  $48.5 \pm 2.0$ ; K –  $740.4 \pm 2.0$ ; P –  $98.8 \pm 1.5$ ; Mg –  $26.2 \pm 2.0$ ; Fe –  $1.7 \pm 0.5$  mg/100 g), the content of water-soluble vitamins – more than 10 times (B<sub>1</sub> –  $0.40 \pm 0.01$ ; B<sub>2</sub> –  $0.50 \pm 0.06$ ; PP –  $5.22 \pm 0.10$  mg/100 g). In terms of safety characteristics, it meets regulatory requirements: toxic elements (Pb  $\leq 0.1$  mg/kg, Cd and As were not detected), microbiological indicators (CFU  $< 10^1$  CFU/g, pathogenic microflora is absent). The study of rehydration properties showed that the maximum viscosity and swelling coefficient (up to 4.7) are achieved at a water temperature of 45–60 °C, a duration of 10–15 min and a hydromodulus of 1:3–1:4. Under these conditions, the reconstituted puree practically does not differ from the fresh one in terms of rheological and organoleptic properties. The resulting powders are a concentrated source of potassium, magnesium, iron, vitamins of group B and PP, have a shelf life of 12 months under normal conditions, are easily transported and dosed. Their use as a functional additive allows you to purposefully shape the consistency, color, aroma and taste of ready-made dishes, reduce the time of the technological cycle and expand the range of healthy food products. The results of the work create a scientific and practical basis for the industrial implementation of the production of functional eggplant powders.

**Keywords:** eggplant powder, food powders, technology, functional product, health product, dietary supplements, technology, organoleptic indicators, nutritional value, product safety.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-35>

УДК 664.8.032 : 634.23

О. В. Василюшина, д-р с.-г. наук, доцент  
А. Ю. Токар, д-р с.-г. наук, професор  
І. Л. Заморська, д-р техн. наук, професор  
І. В. Гайдай, канд. техн. наук, доцент  
К. В. Калайда, канд. с.-г. наук, доцент  
Л. М. Худік, канд. техн. наук, доцент  
Уманський національний університет  
e-mail: elenamila@i.ua

ORCID: 0000-0002-1066-4009  
ORCID: 0000-0003-0865-5725  
ORCID: 0000-0002-2767-1176  
ORCID: 0000-0002-9202-0062  
ORCID: 0000-0002-3590-5593  
ORCID: 0000-0002-2295-701X

## РОЗРОБЛЕННЯ І ОЦІНКА ЯКОСТІ ПЛОДОВИХ НАПОЇВ ІЗ ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН

*Анотація.* Статтю присвячено розробці соків функціонального спрямування з додаванням дигідрокверцетину як біологічної активної добавки. Для проведення досліджень відбирали плоди яблук сорту Амулет, вишні сорту Альфа та малини сорту Новокитаївська.

Встановлено, що для збагачення вітаміном С напоїв доцільно додавати дигідрокверцетин у кількості 20 мг/л. Напої з додаванням дигідрокверцетину відповідають вимогам стандарту, за кількістю сухих розчинних речовин їх вміст становив – 11 %, титрованих кислот – 0,8–0,9 %, загальних цукрів – 8,3 і 8,6 %, дубильних речовин – 0,6–0,7 %, аскорбінової кислоти – 30,8–31,6 мг/100 г. Отримані напої мають значний вміст біологічно активних речовин та антиоксидантної активності – 3,8–4,2 ммоль/дм<sup>3</sup>. За органолептичними показниками напої мали відмінну дегустаційну оцінку, тож їх можна віднести до продуктів функціонального харчування.

*Ключові слова:* напої, біологічно активні речовини, дигідрокверцетин, вітамін С, дубильні та барвні речовини.

*Постановка проблеми.* На сьогодні набула поширення концепція функціонального харчування, що сприяє появі нових функціональних продуктів [1].

Разом із тим фруктові соки – це напої, що виготовлені зі свіжих, стиглих плодів, мають біологічну цінність і виявляють дієтичні властивості. До складу соків за хімічним складом та енергетичною цінністю входять цукри, кислоти, пектинові речовини, дубильні й барвні речовини, вітаміни, мінеральні речовини [2].

*Аналіз останніх джерел.* Біологічна цінність соків обумовлена наявністю в них вітамінів та мінеральних речовин. Так, значний вміст калію та заліза мають соки кісточкових плодів вишні й абрикосів, винограду, малиновий, ожиновий.

Значний вміст вітаміну С, зокрема аскорбінової кислоти, містять соки із шипшини (до 450 мг/100 г), чорної та червоної смородини (до 150 мг/100 г), мандаринів, апельсинів (25–40 мг/%). Синергічну дію щодо аскорбінової кислоти проявляють Р-вітамінні речовини та поліфенольні речовини (антоціани, катехіни, флавоноли), які містяться в соках. Значну Р-вітамінну активність мають соки яблучний (200–900 мг/%), чорної смородини (400–800 мг/%). Соки, у яких міститься значний вміст Р-активних речовин, попереджують променеві ураження організму людини [3].

Нині існують різні технології виготовлення соків. За якістю відповідно до вимог стандартів соки поділяють на вищий і I товарний сорти.

Для зменшення тари для пакування соків виготовляють концентровані соки, які мають досить значний (70 %) вміст сухих розчинних речовин, у тому числі 1–2 % кислот. Концентровані соки відновлюють, і після цього вони надходять у роздрібну торгівлю [3; 4].

© О. В. Василюшина, А. Ю. Токар, І. Л. Заморська, І. В. Гайдай, К. В. Калайда, Л. М. Худік, 2025



Соки з м'якоттю випускають одним товарним сортом шляхом протирання, гомогенізування плодової маси та додавання цукрового сиропу від 16 до 50 %. Для покращення кольору до соків із м'якоттю додають лимонну кислоту. Отримання високоякісних соків залежить від багатьох факторів: якість сировини, технологія виробництва, умови зберігання, транспортування, особливості помологічного й товарного сорту, ступінь стиглості плодів, терміни збирання врожаю та ін. [5].

Для виготовлення високоякісних соків важливим є вибір оптимальної технології переробки сировини, технологічного обладнання. Застосування сучасних технологічних процесів дасть змогу підвищити продуктивність праці, рентабельність виробництва та конкурентоспроможність продукції [3; 6].

Отже, якість продукції на ринку є необхідною умовою її конкурентоспроможності. Під час виготовлення фруктових та овочевих соків до їх складу додають натуральні ароматичні речовини, цукор, оцет, сіль, мед, молочну кислоту, аскорбінову кислоту, лимонну кислоту та ін., які сприяють збереженню й покращенню смакових і органолептичних показників продукту.

Соки прямого віджиму консервують фізичним методом (іонізованим випромінюванням), не використовують консерванти, тому вони мають обмежений термін зберігання – не більше ніж один місяць. Основна причина псування соків – радикальне й перекисне окислення через активні форми кисню, який виділяється внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів та утворення значних концентрацій органічних кислот.

Вирішення проблеми полягає у додаванні природних антиоксидантів, зокрема дигідрокверцетину. Дигідрокверцетин (ДКВ) належить до класу відновних флавоноїдів і є представником групи флаван-3-олів ( $C_{15}H_{12}O_7$ ). За хімічним складом це поліфенол, його антирадикальна активність діє вже у концентрації 0,3 мкмоль/л [6].

Дигідрокверцетин – поліфенол, флавоноїд із групи кверцетину, антиоксидант натуральної дії, міститься в модрині та хвойних деревах, у насінні розторопші. Дигідрокверцетин міститься в продуктах харчування і є харчовою добавкою. До харчових продуктів, які мають у складі дигідрокверцетин (ДКВ), належать оливкова олія, виноград, цитрусові й цибуля.

Препарат ДКВ має Р-вітамінну активність і проявляє антиоксидантну дію, тому використовується як капіляропротекторний препарат. Рекомендований для лікування авітамінозу, ішемічної хвороби серця, атеросклерозу, позитивно впливає на стан печінки, сприяє роботі серця й органів дихання, зокрема бронхів. Використовується у фармацевтичній промисловості для лікування цукрового діабету, захворювань печінки та жовчного міхура, нирок і серцево-судинної системи. Має широкий спектр дії, регулює метаболічні процеси [7; 8].

За даними досліджень, додавання ДКВ до продуктів харчування в межах допустимих доз – 1–10 мкг/кг ваги тіла на добу протягом року – подовжує тривалість життя.

Допустимий рівень споживання дигідрокверцетину – від 25 до 100 мг на добу. Основною метою введення дигідрокверцетину в продукти харчування є сповільнення окисних реакцій, вітамінна активність. Тому дигідрокверцетин діє як антиоксидант – сповільнює окислення ліпідів і подовжує тривалість зберігання харчових продуктів, як провітамін вітаміну Р дає можливість отримати продукти оздоровчого спрямування.

Використання дигідрокверцетину (0,02 г/л) у квасі пригнічує функцію розмноження дріжджів, знижує їх життєздатність і дає змогу подовжити тривалість зберігання у 2,5 раза.

Також дигідрокверцетин додають під час виготовлення коктейлів, його рекомендовано в разі підвищених фізичних і розумових навантажень.

Поряд із дигідрокверцетином використовують й інші антиокислювальні препарати, зокрема аскорбінову та лимонну кислоти. Допустима норма аскорбінової кислоти – 30–50 мг/л. Також аскорбінову кислоту вносять як антиоксидант під час виготовлення сокових напоїв у концентрації 150 мг/л [7; 8].



*Формулювання мети статті (постановка завдання)* – розширення асортименту функціональних напоїв.

*Основна частина.* Для проведення досліджень було вибрано плоди яблук сорту Амулет (ДСТУ 8133:2015) [9; 10], вишні сорту Альфа (ДСТУ 8325:2015) [11; 12] та малини сорту Новокитаївська (ДСТУ 7179:2010) [13]. Виробник дигідрокверцетину – «БіоФлавід» (BioFlavid), Україна.

У сировині яблук, вишні та малини визначали: масову частку сухих розчинних речовин на рефрактометрі за ДСТУ ISO 2173:2007 [14]; титрованих кислот за ДСТУ 4957:2008 [15]; вміст цукрів – ферриціанідним методом [16]; аскорбінової кислоти (вітаміну С) – йодометричним методом (ДСТУ ISO 6557-1:2015) [17]; дубильних і барвних речовин методом Нейбауера та Левенталя [18]; рН на рН-метрі; антиоксидантну активність за методом FRAP [19; 20]. органолептичну оцінку продукції за п'ятибальною шкалою.

Для встановлення концентрації дигідрокверцетину для додавання в соки було визначено показник рН соків (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив дигідрокверцетину на величину рН соків

Сік		Концентрація дигідрокверцетину, мг/л				
		0	10	15	20	25
Яблучний	до зберігання	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	після зберігання	2,64	2,84	2,83	2,82	2,98
Вишневий	до зберігання	3,40	3,40	3,40	3,40	3,40
	після зберігання	2,98	3,30	3,00	2,90	3,30
Малиновий	до зберігання	3,10	3,10	3,10	3,10	3,10
	після зберігання	2,74	2,98	2,97	2,96	3,00

З таблиці видно вплив харчової добавки дигідрокверцетин у концентрації від 0 до 25 мг/л на показник рН яблучного, вишневого та малинового соків прямого віджиму після п'яти діб зберігання. Результати досліджень показують стабілізацію окислення та зниження рН соків за концентрації дигідрокверцетину 20–25 мг/л.

Для стабілізації вітаміну С у соках використовували препарат дигідрокверцетин. Дигідрокверцетин належить до антиоксидантів, біофлавоноїдів з Р-вітамінною активністю та має натуральне природне походження. Отримують дигідрокверцетин із деревини модрини канадської і модрини даурської. Дигідрокверцетин – антиоксидант, природний акцептор вільних радикалів кисню, капіляропротектор, кардіопротектор, має імуномодельючі властивості.

Для визначення кількості дигідрокверцетину, який потрібно додати для виготовлення соків, було проведено модельний дослід із додавання сухого порошку дигідрокверцетину до соків, нагрівання за температури 100 °С та визначення вмісту аскорбінової кислоти (рис. 1).

Як видно з отриманих даних, зниження вмісту вітаміну С через 20 хвилин обробки становить 13 %, через годину – 46 %, що показує збереження вітаміну С у соку з додаванням дигідрокверцетину.

Отримані дані показують доцільність використання дигідрокверцетину як стабілізатора вітаміну С в соках.

Для збереження вмісту аскорбінової кислоти у соках доцільно під час їх виготовлення додавати 20 мг/л дигідрокверцетину.

Як видно з даних таблиці 2, отримані соки та напої відповідають вимогам стандарту. Вміст сухих розчинних речовин у свіжовіджатих соках становить 5,8–14,2 %, цукрів – 4,0–8,4 %, титрованих кислот – 0,68–1,14 %, дубильних і барвних речовин – 0,21–0,91 %. Причому за

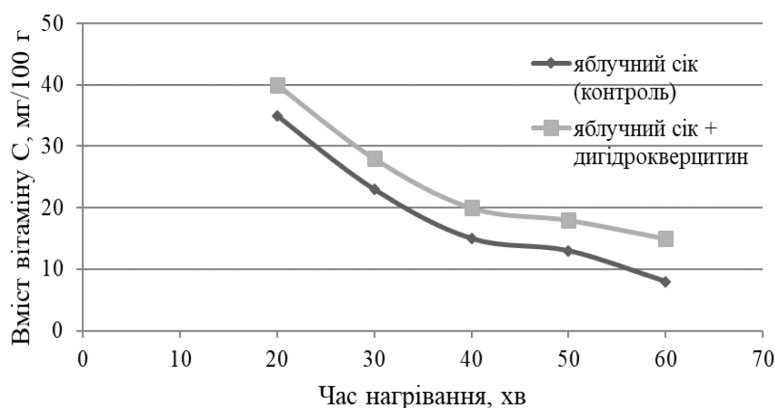


Рис. 1. Вплив температури нагрівання на вміст вітаміну С яблучного соку

вмістом деяких показників хімічного складу вишневий сік переважає яблучний, за винятком загального вмісту цукру.

Таблиця 2

Вміст деяких компонентів хімічного складу соків та напоїв

Сік (напій)	Масова частка, %				Цукрово-кислотний індекс	Вміст аскорбінової кислоти, мг/100 г
	сухих розчинних речовин	загальних цукрів	титрованих кислот	дубильних і барвних речовин		
Яблучний (контроль)	10,4	8,4	0,68	0,21	12,4	15,4
Вишневий	14,2	8,1	1,14	0,91	7,1	18,5
Малиновий	5,8	4,0	1,00	0,60	4,0	16,4
Яблучно-вишневий*	11,9	8,3	0,90	0,70	9,2	31,6
Яблучно-малиновий*	11,0	8,6	0,80	0,60	10,8	30,8
<i>НІР</i> <sub>05</sub>	0,5	0,2	0,03	0,02	0,5	0,7

Примітка: \* – за технологічною інструкцією вміст сухих розчинних речовин у напоях повинен становити не менше ніж 11 %, кислот – 0,2–0,9 %.

Для поліпшення органолептичних та фізико-хімічних показників якості соків та подовження терміну їх зберігання соки купажували з додаванням дигідрокверцетину й отримували новостворені напої.

Вміст сухих розчинних речовин у напоях перебуває на рівні 11 %, у тому числі титрованих кислот – 0,8–0,9 %. Вміст загальних цукрів – у межах 8,3 і 8,6 %. Цукрово-кислотний індекс становить 9,2–10,8. Вміст дубильних – на рівні 0,6–0,7 %. Кількість аскорбінової кислоти перебуває на значному рівні – 30,8–31,6 мг/100 г завдяки внесенню дигідрокверцетину.

Біологічна цінність соків і напоїв визначається їхньою антиоксидантною активністю (рис. 2). Як видно з рисунка, антиоксидантна активність отриманих напоїв перевищувала контроль на 12–23,5 %.

Було розроблено й апробовано рецептуру дослідних напоїв та визначено їхню органолептичну оцінку. Проведено дегустацію розроблених напоїв, яку показано на рис. 3.

За зовнішнім виглядом напої прозорі з опалесценцією. Колір однорідний із рожевим відтінком. Однорідної консистенції. Смак притаманний цьому виду плодів яблук із присмаком малини чи вишні, солодкувато-кислий, без стороннього присмаку.

За результатами досліджень зразки напоїв із додаванням вишневого та малинового соку до яблучного отримали відмінні показники порівняно з контрольним варіантом і були рекомендовані до впровадження у виробництво.

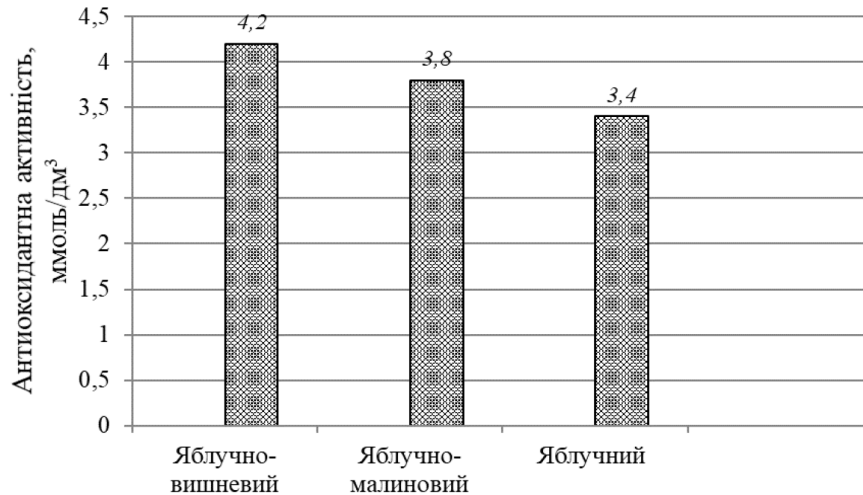


Рис. 2. Антиоксидантна активність напоїв

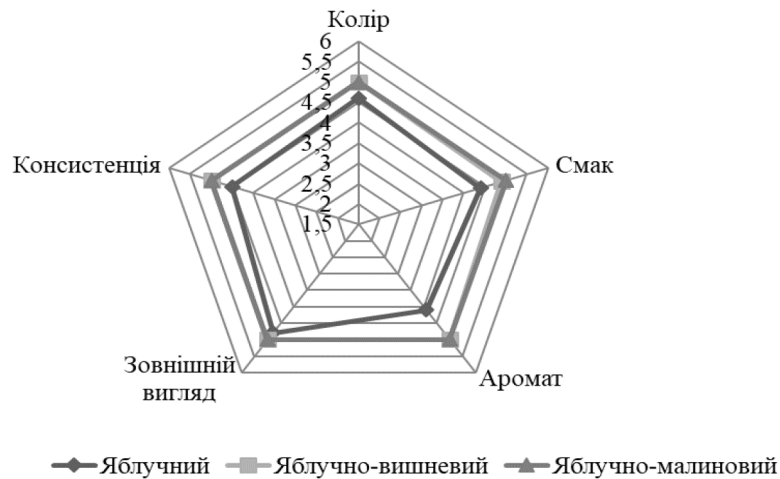


Рис. 3. Органолептична оцінка напоїв

**Висновки.** Для стабілізації вітаміну С в напоях доцільно додавати дигідрокверцетин у кількості 20 мг/л.

Отримані напої з додаванням дигідрокверцетину відповідають вимогам стандарту. Вміст сухих розчинних речовин у них становить 11 %, титрованих кислот – 0,8–0,9 %, загальних цукрів – 8,3 і 8,6 %. Вміст дубильних – на рівні 0,6–0,7 %, аскорбінової кислоти – 30,8–31,6 мг/100 г.

Напої мали високу біологічну цінність та антиоксидантну активність, яка перевищувала контроль на 12–23,5 % і становила 3,8–4,2 ммоль/дм³.

Розроблені напої мали відмінну дегустаційну оцінку.

Напої мають значний вміст біологічно активних речовин, вітаміну С, дубильних і барвних речовин, їх можна віднести до продуктів функціонального призначення.

#### Список використаних джерел

1. Капрельянц Л. Функціональні продукти і нутрицевтики – сучасні підходи харчової науки. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2016. Вип. 73. С. 441. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VLNU\\_biol\\_2016\\_73\\_122](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VLNU_biol_2016_73_122)

2. Сирохман І. В., Задорожний І. М., Пономарьов П. Х. *Товарознавство продовольчих товарів*. Київ : Лібра, 2007. 271 с.



3. Мороз І. А., Гулай О. І., Шемет В. Я. Харчова хімія : навчальний посібник. Луцьк : ІВВ ЛНТУ, 2022. 236 с.
4. ДСТУ 4150:2003. Соки, напої сокові, нектари плодово-ягідні, овочеві та з баштаних культур. Загальні технічні умови.
5. Аванесов В. М., Плаксін Ю. М., Стрелюхіна А. Н., Ларін В. А. Застосування рослинних екстрактів при виробництві напоїв функціонального призначення. Зберігання та переробка сільгоспсировини. *Харчова промисловість*. 2016. № 7. С. 28–32.
6. Бобокало С. В., Алмакаєва Л. Г. Перспективи створення дієтичних добавок антиоксидантної і капіляропротекторної дії на основі високочистого біофлавоноїда дигідрокверцетина. *Сучасні досягнення фармацевтичної технології та біотехнології* : зб. наук. пр. Харків, 2016. С. 90–93.
7. Turck D. Scientific Opinion on taxifolin-rich extract from Dahurian Larch (*Larix gmelinii*). *EFSA Journal*. 2017. Vol. 15, no. 2.
8. Fujimura S., Sato T., Hayakawa S., Kawamura M., Furukawa E., Watanabe A. Antimicrobial efficacy of combined clarithromycin plus daptomycin against biofilms-formed methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* on titanium medical devices. *J Infect Chemother*. 2015. Vol. 21. P. 756–9.
9. Яблуня. URL: <https://posadi-sad.jimdofree.com/>
10. ДСТУ 8133:2015. Яблука свіжі середніх та пізніх термінів достигання. Технічні умови [Чинний від 01.07.2015]. Київ : Держспоживстандарт України, 2015. 8 с.
11. Вишня Альфа. URL: <https://panski-sadu.com.ua/ua/p1950599871>
12. ДСТУ 8325:2015. Вишня свіжа. Технічні умови [Чинний від 01.07.2015]. Київ : Держспоживстандарт України, 2015. 8 с.
13. Малина Новокитаївська. URL: [sad-institut.com.ua/ua/licenzuvannja\\_sortiv/malina/malina\\_novokitaiivska.html](http://sad-institut.com.ua/ua/licenzuvannja_sortiv/malina/malina_novokitaiivska.html)
14. ДСТУ ISO 2173:2007. Продукти з фруктів та овочів. Визначення розчинних сухих речовин рефрактометричним методом (ISO 2173:2003, IDT) [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 33 с.
15. ДСТУ 4957:2008. Продукти перероблення фруктів та овочів. Методи визначення титрованої кислотності [Чинний від 2009-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 41 с.
16. ДСТУ 4954:2008. Продукти перероблення фруктів та овочів. Методи визначення цукрів [Чинний від 2009-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 23 с.
17. ДСТУ ISO 6557-1:2015. Фрукти, овочі та продукти їх перероблення. Визначення вмісту аскорбінової кислоти. Частина 1. Контрольний метод (ISO 6557-1:1986, IDT) [Чинний від 2017-07-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2017. 38 с.
18. Найченко В. М. Практикум з технології зберігання і переробки плодів та овочів з основами товарознавства : навчальний посібник. Київ : ФАДА ЛТД, 2001. 211 с.
19. Khasanov V. V., Ryzhova G. L., Maltseva E. V. Methods for the determination of antioxidants. *Chem. Plant Raw Mater*. 2004. No. 3. P. 63–75.
20. ДСТУ 7179:2010. Малина свіжа. Технічні умови [Чинний від 01.07.2010]. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 8 с.
21. Дигідрокверцетин. URL: <https://tabletki.ua>

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**O. Vasylyshyna, A. Tokar, I. Zamorska, I. Haidai, K. Kalayda, L. Khudik**  
Uman National University

## **DEVELOPMENT AND QUALITY ASSESSMENT OF FRUIT DRINKS WITH INCREASED CONTENT OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES**

### *Summary*

The article is devoted to the development of functional juices with the addition of dihydroquercetin as a biologically active supplement.

Fruit juices are beverages that have biological value and dietary properties, made from fresh, ripe fruits. The biological value of juices is due to the presence of vitamins and minerals in them. For example, cherry, apricot, grape, raspberry, and blackberry juices have a significant content of potassium and iron.

Directly pressed juices are preserved using a physical method (ionizing radiation) without the use of preservatives, so they have a limited shelf life of no more than one month. The main cause of juice spoilage is radical and peroxide oxidation due to active forms of oxygen released as a result of the vital activity of microorganisms and the formation of significant concentrations of organic acids.

The solution to the problem lies in the addition of natural antioxidants, in particular dihydroquercetin. Dihydroquercetin is a polyphenol, a flavonoid from the quercetin group, a natural antioxidant found in larch and coniferous trees and in milk thistle seeds.

Amulet apples, Alpha cherries, and Novokitaevskaya raspberries were selected for the study.

It was found that to enrich beverages with vitamin C, it is advisable to add 20mg/l of dihydroquercetin. Beverages with added dihydroquercetin meet the standard requirements for dry soluble substances, which was 11 %, titrated acids – 0.8–0.9 %, total sugars – 8.3 and 8.6 %, tannins – 0.6–0.7 %, and ascorbic acid – 30.8–31.6 mg/100 g. The resulting beverages have a significant content of biologically active substances and antioxidant activity – 3.8–4.2 mmol/dm<sup>3</sup>. According to organoleptic indicators, the beverages had an excellent taste rating and can be classified as functional foods.

**Keywords:** beverages, biologically active substances, dihydroquercetin, vitamin C, tannins, pigments.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-36>

УДК 004.942

Є. А. Гавриленко, д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0003-4501-445X

О. Ю Михайленко, старший викладач

ORCID: 0000-0002-8836-3222

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: olena.mykhailenko@tsatu.edu.ua

## РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ У САД-СИСТЕМІ SOLIDWORKS

*Анотація.* У роботі досліджуються можливості САД-системи SolidWorks з моделювання гладких обводів із регулярною зміною кривини. Запропоновано методику формування обводів дугами еліпсів і В-сплайнів, що забезпечує інтерполяцію будь-якого точкового ряду по частинах, які можна інтерполювати монотонною кривою лінією. Обвід формується всередині області можливого розташування опуклої кривої лінії, якою можна інтерполювати точковий ряд. Можливості розроблених способів підтверджено розв'язанням задач інтерполяції послідовності точок, які призначені на монотонних кривих лініях. Задачі розв'язані в САД-системі SolidWorks за допомогою програми, створеної на основі розроблених у роботі способів.

*Ключові слова:* інтерполяція, дотична пряма, кривина, область розташування кривої, обвід, похибка, САД-система, програмний додаток.

*Постановка проблеми.* Технологія виготовлення виробів на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК) дає можливість обробляти поверхні довільної форми. Керуюча програма для верстата із ЧПК створюється в автоматизованому режимі в САМ-системі. Вихідними даними для САМ-системи є тривимірні комп'ютерна модель виробу, що формується в САД-системі (SolidWorks, AutoCAD, NXCAD та інші).

Точність обробки визначається точністю формування тривимірної моделі, точністю визначення траєкторії ріжучого інструмента САМ-системою та точністю, з якою верстат виконує запрограмовані операції. Коректне формування тривимірної моделі – необхідна умова якісного виготовлення виробу [5; 6].

Однією з найскладніших завдань геометричного моделювання є створення моделей поверхонь, що обмежують вироби, функціональне призначення яких – взаємодія із середовищем (газом, рідиною або сипучими матеріалами). Прикладом таких виробів є корпуси автомобілів та літальних апаратів, робочі органи сільськогосподарських машин, лопатки робочих коліс турбін. Основною функціональною характеристикою поверхонь, що обмежують такі вироби, є ламінарний характер їх обтікання середовищем [1; 7; 8].

Технологія моделювання в САД-системі ґрунтується на формуванні поверхонь на основі лінійчастих каркасів, елементи яких можуть бути отримані шляхом інтерполяції великої кількості точок. Розв'язання такої задачі потребує створення спеціалізованих додатків до САД-системи для автоматизації моделювання. При цьому функціональні властивості поверхонь, що моделюються, визначаються геометричними характеристиками кривих ліній, які є елементами каркаса. Ламінарний характер взаємодії поверхні із середовищем забезпечується використанням як елементів каркаса ліній із регулярною зміною значень кривини та мінімальним, виходячи з умов завдання числом особливих точок. Для плоскої кривої лінії це точки стикування опуклих і увігнутих частин і точки, у яких кривина має екстремальні значення [2; 3].



Таким чином, розробка адаптованих до CAD-систем методів інтерполяції точкових рядів, які дають змогу із заданою точністю та із забезпеченням заданих характеристик подати вихідну криву лінію, а також засобів програмної реалізації зазначених методів є актуальним завданням.

*Аналіз останніх досліджень.* Гладку плоску криву лінію, яка не містить особливих точок, називатимемо кривою з монотонною зміною кривини або монотонною кривою. Завдання інтерполяції точкового ряду, що задає монотонну криву лінію, вирішується шляхом формування обводу – кривої лінії, що складається з ділянок аналітично заданих кривих, з'єднаних у вихідних точках. На цей час найбільш розроблені методи формування обводів кривими другого порядку, ділянками кривих Безьє та B-сплайнів [4; 9; 10; 11].

У разі формування гладкого обводу, що складається з дуг кривих другого порядку [9], гарантовано відсутність неконтрольованого виникнення точок перегину вздовж обводу, але немає можливості запобігти виникненню точок з екстремальними значеннями кривини. Коригування форми обводу можливе шляхом зміни положень дотичних прямих до обводу у вихідних точках. За фіксованих положень дотичних прямих у вихідних точках можливість локального коригування форми обводу існує в разі його формування дугами еліпсів. Метою коригування може бути забезпечення рівності значень радіусів кривини в точках стикування ділянок обводу.

Використання для формування обводу кривих Безьє [4; 10] і B-сплайнів [11] третього і вищих порядків забезпечує ширші можливості управління формою обводу. Сплайн визначається контрольними точками, кожній з яких відповідає функція сполучення. Він є складовою кривою лінією, кожен сегмент якої визначає окреме рівняння, ступінь якого дорівнює ступеню функцій сполучення ( $k$ ). При цьому в точках стикування сегментів автоматично забезпечується безперервність значень похідних до  $k - 1$  порядку включно. Крива апроксимує контрольний багатокутник – ламану лінію, що з'єднує контрольні точки. Коригування форми сплайна виконується шляхом зміни положення контрольних точок. Контроль за динамікою зміни кривини здійснюється за допомогою графіка, доступного в CAD-системі. Підвищення якості стикування ділянок обводу потребує збільшення ступеня рівняння сплайна, що призводить до збільшення числа контрольних точок. У підсумку локальне коригування конфігурації та характеристик сплайна ускладнюється. Забезпечити монотонну зміну кривини вздовж B-сплайна, який інтерполіює велику кількість вихідних точок, важко.

Сучасні CAD-системи дають можливість формувати обводи кубічним сплайном, який автоматично забезпечує регулярність значень кривини в точках обводу. Контроль за виникненням особливих точок усередині ділянок обводу може виконуватися в ручному режимі через переміщення курсором миші фантомів контрольних точок, що задають сплайн. Необхідність коригування в ручному режимі знижує можливості використання B-сплайна в разі формування обводів з монотонною зміною кривини.

У роботі [12] запропоновано спосіб формування обводу по ділянках, які із заданою точністю представляють монотонну криву лінію. Завдання вирішується згідно з такими етапами:

- проводиться аналіз вихідного точкового ряду, за результатами якого визначаються його частини, які можна інтерполювати монотонною кривою лінією;
- у вихідних точках призначаються положення дотичних і значення радіусів кривини, за яких завдання формування монотонної кривої лінії має рішення;
- визначається область можливого розташування монотонної кривої, що інтерполіює ділянки точкового ряду;
- усередині отриманої області формується обвід, який із заданою точністю представляє монотонну криву лінію.

Аналіз вихідного точкового ряду засновано на визначенні радіусів прилеглих кіл, кожне з яких проходить через три послідовні точки ряду. Частина точкового ряду, вздовж якого раді-

уси прилеглих кіл збільшуються або зменшуються, можна інтерполювати монотонною кривою лінією, вздовж якої радіуси кривизни збільшуються або зменшуються відповідно.

Критерієм коректного призначення дотичних прямих до монотонної кривої, що інтерполює точний ряд, уздовж якої значення радіусів кривизни зростають, є виконання співвідношення  $|i, T| < |T, i + 1|$  (рис. 1), де  $T$  – точка перетину дотичних до кривої у сусідніх вихідних точках ( $t_i$  та  $t_{i+1}$ ).

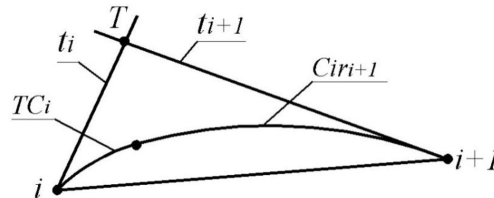


Рис. 1. Нижня межа області можливого розташування ділянки монотонної кривої

Із зазначеного критерію визначаються діапазони положень дотичних, у яких можливе формування кривої з монотонним зміною кривини. Остаточні положення дотичних у вихідних точках призначаються центром отриманих діапазонів.

Далі призначаються радіуси кривини, за яких завдання формування монотонної кривої має рішення. Спосіб визначення діапазонів можливих значень радіусів кривини монотонної кривої лінії, що інтерполює точковий ряд, за зафіксованих положень дотичних у вихідних точках запропоновано в роботі [4]. Для кривої лінії, вздовж якої радіуси кривини зростають, мінімально можливі значення радіусів кривини в кожній із точок визначаються, виходячи з умови призначення радіуса кривини в першій точці рівним нулю. Максимальні значення радіусів кривини визначаються аналогічно, виходячи з умови призначення в останній точці радіуса кривини, що дорівнює нескінченності. Остаточні значення радіусів кривини у вихідних точках призначаються по центрах отриманих діапазонів.

Призначені у вихідних точках положення дотичних прямих і дотичних кіл визначають область можливого розташування монотонної кривої лінії, яка інтерполює точковий ряд і має у його точках призначені характеристики. Нижня межа області складається з дуги стичного кола в точці  $i$  ( $TC_i$ ) і дуги кола, яке дотичне з  $TC_i$  та із прямою  $t_{i+1}$  в точці  $i + 1$  ( $Cir_{i+1}$ ) (рис. 1). Верхня межа визначається аналогічно, виходячи із значення радіуса кривини, призначеного в точці  $i + 1$  та положення прямої  $t_i$ .

Аналогічні області, які визначені вздовж всього точкового ряду, задають ділянку можливого розташування монотонної кривої, що інтерполює вихідний точковий ряд.

У роботі [12] запропоновано спосіб формування обводу дугами кіл, радіуси яких збільшуються в тому самому напрямку, що і радіуси кривини монотонної кривої, яка інтерполює точковий ряд. Недоліком цього способу є порушення регулярності значень кривини в точках стикування дуг кіл.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою цієї статті є дослідження можливостей САД-системи SolidWorks щодо формування обводів із регулярною зміною кривини, які із заданою точністю представляють монотонну криву лінію.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- розробити спосіб оцінки точності, з якою опуклий обвід представляє криву лінію з монотонною зміною кривини, якою можна інтерполювати вихідний точений ряд;
- розробити способи формування гладкого опуклого обводу з регулярною зміною кривини, який із заданою точністю інтерполює точковий ряд, дугами еліпсів та В-сплайна;
- порівняти можливості запропонованих способів під час вирішення задачі інтерполяції точкового ряду;

– розробити програмний додаток до CAD-системи для автоматизації запропонованих способів.

*Основна частина.* Для забезпечення регулярності зміни значень кривини вздовж обводу в точках стикування його ділянок потрібно забезпечити загальні дотичні та значення кривини. Таке завдання можна вирішити, використовуючи ділянки кривих, заданих алгебраїчним рівнянням, параметричне число яких (кількість фіксованих параметрів, які однозначно визначають геометричний образ) не менше ніж чотири. Завдання формування регулярного обводу, який із заданою точністю представляє монотонну криву лінію, досліджуємо, використовуючи криві лінії з відповідним параметричним числом, які використовує CAD-система SolidWorks. Це парабола, еліпс, В-сплайн.

Точність, з якою обвід представляє монотонну криву лінію, оцінюватимемо максимальною абсолютною похибкою інтерполяції – величиною, яку не може перевищувати відстань між обводом і монотонною кривою.

Використання перелічених вище кривих ліній не дає можливості забезпечити монотонну зміну значень кривини вздовж обводу, але дає змогу контролювати його опуклість. Оскільки монотонна крива лінія є опуклою кривою, то як абсолютну похибку інтерполяції на кожній із ділянок використовуватимемо більшу з відстаней між протилежними межами (верхньою та нижньою) області можливого розташування монотонної і опуклої кривих відповідно.

Якщо у вихідних точках призначені положення дотичних щодо обводу, то областю можливого розташування його ділянки є трикутник  $i, i + 1, T$ , обмежений відрізком  $[i, i + 1]$ , що з'єднує послідовні вихідні точки, і дотичними  $t_i$  та  $t_{i+1}$  (рис. 2).

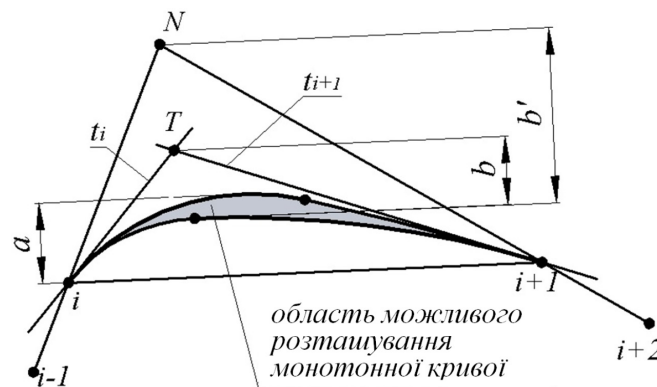


Рис. 2. Область можливого розташування ділянки обводу

У цьому випадку максимальна похибка інтерполяції ділянки  $i \dots i + 1$  оцінюється більшою з величин  $a$  або  $b$ , де:

$a$  – відстань від сторони трикутника  $[i, i + 1]$  до прямої, яка дотична до верхньої межі області розташування ділянки монотонної кривої та паралельна відріzkу  $[i, i + 1]$ ;

$b$  – відстань від вершини трикутника  $T$  до нижньої межі області розташування ділянки монотонної кривої.

Якщо положення дотичних щодо опуклого обводу невідомі, то область можливого розташування ділянки обводу  $i \dots i + 1$  можна визначити як трикутник  $i, i + 1, N$ , обмежений прямими  $[i - 1, i]$ ,  $[i, i + 1]$ ,  $[i + 1, i + 2]$  (рис. 2). У цьому випадку похибка інтерполяції ділянок оцінюється більшою з величин  $a$  або  $b'$ , де  $b'$  – відстань від нижньої межі області розташування монотонної кривої до точки перетину прямих  $[i - 1, i]$ ,  $[i + 1, i + 2]$  (точка  $N$ ). Величина  $b'$  перевищує величину  $b$  приблизно вдвічі і саме вона здебільшого визначатиме похибку інтерполяції обводом, у вихідних точках якого положення дотичних не визначені.



У разі формування обводу, що представляє монотонну криву лінію, доцільно призначити положення дотичних у вихідних точках, за яких точковий ряд можна інтерполювати монотонною кривою [12].

Гладке стикування ділянок може бути забезпечено в разі формування обводу кривою лінією, параметричне число якої не менше ніж чотири. Для ділянки  $i \dots i + 1$  двома умовами, що накладаються на криву лінію, є проходження через зафіксовані вихідні точки  $i$  та  $i + 1$ , а торкання з прямими  $t_i$  та  $t_{i+1}$  становить третю та четверту умови. Для забезпечення регулярності зміни кривини вздовж обводу параметричне число кривих ліній, що становлять його ділянки, має перевищувати чотири.

Параметричне число кривої лінії, яка задана алгебраїчним рівнянням, можна визначити кількістю коефіцієнтів його рівняння. Для параболи, загальне рівняння якої  $Ay^2 + Bxy + Cx + Dy + 1 = 0$  [13], параметричне число дорівнює чотирьом. Тому умови проходження через дві зафіксовані точки та торкання з двома зафіксованими прямими повністю визначають криву. Накладення додаткових умов на ділянку параболи для забезпечення рівності значень кривини в точках стикування ділянок обводу неможливе.

Загальне рівняння еліпса має вигляд

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0. \quad (1)$$

Кількість коефіцієнтів рівняння визначає параметричне число кривої, що дорівнює п'яти. Покажемо, як можливість накладання на ділянку обводу п'яти умов дає змогу забезпечити його регулярність.

Після призначення у вихідних точках дотичних до монотонної кривої лінії прямих чотири з п'яти умов, що визначають кожну з ділянок обводу, визначено. П'ятою умовою, що визначає дугу еліпса, яка становить першу ділянку обводу, призначимо його проходження через точку  $K$ , зафіксовану в межах області можливого розташування ділянки кривої монотонної лінії. Наприклад, точка  $K$  може бути призначена на медіані трикутника, який обмежує область можливого розташування ділянок опуклої кривої, на рівних відстанях від точок перетину медіани з межами області розташування монотонної кривої.

Умови проходження дуги еліпса через точки  $1(x_1, y_1)$  та  $2(x_2, y_2)$ , які обмежують ділянку, і точку  $K(x_K, y_K)$  визначають такі співвідношення:

$$Ax_1^2 + Bx_1y_1 + Cy_1^2 + Dx_1 + Ey_1 + 1 = 0, \quad (2)$$

$$Ax_2^2 + Bx_2y_2 + Cy_2^2 + Dx_2 + Ey_2 + 1 = 0, \quad (3)$$

$$Ax_K^2 + Bx_Ky_K + Cy_K^2 + Dx_K + Ey_K + 1 = 0. \quad (4)$$

Продиференціювавши рівняння (2) та (3) отримаємо:

$$2Ax_1 + B(y_1 + x_1y_1') + 2Cy_1y_1' + D + Ey_1' = 0, \quad (5)$$

$$2Ax_2 + B(y_2 + x_2y_2') + 2Cy_2y_2' + D + Ey_2' = 0. \quad (6)$$

Якщо дотичні до монотонної кривої лінії в точках 1 та 2 задати рівняннями  $y = xa_1 + b_1$  та  $y = xa_2 + b_2$  відповідно, значення похідних функції в рівняннях (5) і (6) визначаються як  $y_1' = a_1$ ,  $y_2' = a_2$ .

Розв'язавши систему з п'яти рівнянь (2), (3), (4), (5), (6), визначимо значення коефіцієнтів  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  і отримаємо рівняння, що задає першу ділянку обводу у вигляді (1).

Для визначення значення другої похідної функції, що визначає еліпс, у точці 2 потрібно двічі продиференціювати рівняння (1) і підставити в нього координати точки  $2(x_2, y_2)$ . Виділивши з рівняння другу похідну функції отримаємо:

$$y'' = -\frac{2Bx_2 + 2Cy_2 + E}{2A + 4By' + 2C(y')^2}, \quad (7)$$

де  $y' = -\frac{2Bx_2 + 2Cy_2 + E}{2Ax_2 + 2By_2 + D}$ .

Для регулярного стикування першої та другої ділянок обводу, крім загальної дотичної в точці 2, достатньо забезпечити рівність других похідних функцій, що задають дуги еліпсів, у цій точці.

Для визначення коефіцієнтів рівняння, яке задає еліпс, що становить другу ділянку обводу, потрібно вирішити систему з п'яти рівнянь:

- рівняння (3) та (6);
- рівняння (7), у яке підставлені значення коефіцієнтів рівняння, що задає дугу еліпса першої ділянки обводу;
- рівняння, що визначають характеристики обводу в точці 3:

$$Ax_3^2 + Bx_3y_3 + Cy_3^2 + Dx_3 + Ey_3 + 1 = 0,$$

$$2Ax_3 + B(y_3 + x_3y_3') + 2Cy_3y_3' + D + Ey_3' = 0.$$

Перша та друга ділянки обводу, характеристики якого розраховані за описаною вище методикою, представлені на рис. 3.

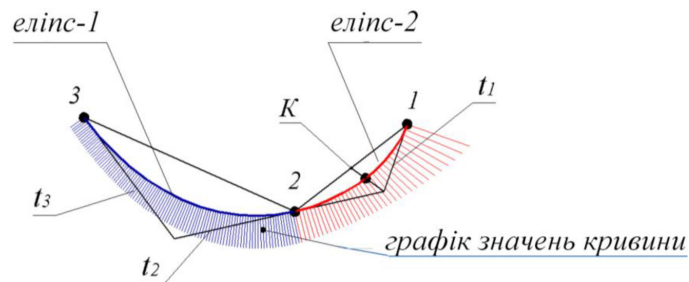


Рис. 3. Формування обводу дугами еліпсів

Обвід сформовано в CAD-системі SolidWorks за допомогою спеціально розробленого програмного модуля. Як вихідні дані взято точковий ряд, що належить монотонній кривій лінії, інтерполяція якого досліджена в роботі [12]. Графік значень кривини вздовж обводу, сформований за допомогою функцій CAD-системи, демонструє регулярність стикування ділянок. Максимальна абсолютна похибка інтерполяції становила 0,8735 мм на першій ділянці і 0,6328 мм – на другій.

Максимальне відхилення обводу від меж області можливого розташування монотонної кривої лінії на кожній із ділянок становило 0,0121 і 0,0053 мм відповідно. Монотонна зміна значень кривини вздовж дуг еліпсів, що формують ділянки обводу, визначила їхнє розташування в межах області розташування монотонної кривої лінії. Однак способи, що дають можливість заздалегідь прогнозувати відсутність точок з екстремальним значенням кривини в межах дуги еліпса, заданої характеристиками в граничних точках, нам невідомі.

Після визначення коефіцієнтів, що задають рівняння еліпса, який становить другу ділянку обводу, аналогічно визначаються рівняння третьої та наступних ділянок. При цьому п'ятою умовою, що визначає конфігурацію кожної з дуг еліпсів, є рівність похідних із попередньою ділянкою обводу в точці стикування.

Недоліком запропонованої методики формування обводу є відсутність можливості локального коригування його форми. Зміна конфігурації першої ділянки обводу призведе до зміни конфігурацій решти ділянок. Причиною зазначеного недоліку є накладення максимально можливої кількості умов на кожну з ділянок обводу.

Можливість локального коригування форми ділянок є основною перевагою обводів, що формуються B-сплайном. Ступінь рівняння, що задає B-сплайн, визначає порядок похідних функції, значення яких збігаються в точках стикування ділянок сплайна [11]. Рівняння третього ступеня, що задає ділянки B-сплайна, який використовує CAD-система SolidWorks, автоматично забезпечує регулярність зміни значень кривини вздовж обводу будь-якої конфігурації.

Інтерполяція точкового ряду в CAD-системі здійснюється в інтерактивному режимі – вихідні точки послідовно вказуються за допомогою курсору. Якщо вихідний точковий ряд можна інтерполювати опуклою кривою лінією, то сплайн формується у вигляді опуклого обводу, число ділянок якого мінімальне – кожна ділянка обводу формується однією ділянкою сплайна. Вказана послідовність команд легко реалізується створеним нами програмним додатком, який забезпечує автоматичне формування опуклого обводу в CAD-системі SolidWorks.

Накладання на B-сплайн умови торкання із зафіксованими прямими лініями потребує збільшення параметричного числа кривої лінії через збільшення кількості ділянок сплайна. Це може призвести до порушення опуклості обводу. У CAD-системах опуклість B-сплайн можна забезпечити в інтерактивному режимі шляхом коригування положення вершин багатокутника, що задає сплайн. За великої кількості вихідних точок і призначених у них дотичних таке завдання стає надмірно трудомістким.

Можливість використання стандартних функцій SolidWorks для забезпечення необхідної точності інтерполяції B-сплайном послідовності точок, що призначені на монотонній кривій лінії, розглянемо на наступному прикладі.

На рис. 4 зображено сформований у CAD-системі SolidWorks кубічний неперіодичний B-сплайн, що інтерполює точковий ряд, який складається із 10 точок. Як вихідний точковий ряд взято послідовність точок, яка була використана в роботі [12] для визначення області розташування монотонної кривої лінії.

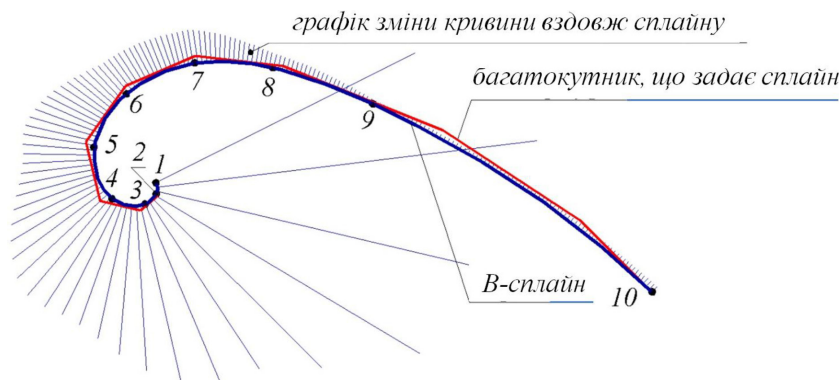


Рис. 4. B-сплайн, заданий координатами вихідних точок

Сплайн складається з 9 сегментів, конфігурацію яких визначають 12 точок, що його задають. Графік зміни значень кривини вздовж B-сплайна, який сформовано за допомогою функцій CAD-системи, дає змогу визначити наявність у нього особливих точок. Ділянки сплайна сумарно містять сім точок з екстремальним значенням кривини.

У таблиці 1 представлені характеристики вихідного точкового ряду та значення похибок його інтерполяції B-сплайном, де:

- 1)  $h_i = |i, i + 1|$  – довжини відрізків, що з'єднують вихідні точки;
- 2)  $\delta_i$  – максимальна абсолютна похибка інтерполяції точкового ряду монотонною кривою лінією;
- 3) ширина області можливого розташування ділянок опуклого обводу, яка дорівнює:
  - відстані  $H_i$  від відрізка  $[i, i + 1]$  до точки перетину прямих  $(i - 1, i)$  та  $(i + 1, i + 2)$ ;
  - відстані  $H_i^t$  від відрізка  $[i, i + 1]$  до точки перетину дотичних  $t_i$  та  $t_{i+1}$ ;



- 4) абсолютна похибка, з якою монотонну криву лінію представляють ділянки обводу:  
 –  $\Delta_i$ , коли обвід заданий точковим рядом;  
 –  $\Delta'_i$ , коли обвід заданий точковим рядом і положенням дотичних у вихідних точках;  
 5)  $f_i$  – максимальна відстань від сформованого В-сплайна до найбільш віддаленої межі області можливого розташування ділянок монотонної кривої лінії.

Таблиця 1

Характеристики вихідного точкового ряду та значення похибок його інтерполяції В-сплайном

$i$	$h_i$	$\delta_i$	$H_i$	$H'_i$	$\Delta_i$	$\Delta'_i$	$f_i$
1	5,28	0,0140	3,1408	1,6068	2,4075	0,8735	0,1500
2	7,20	0,0078	4,4045	1,2234	3,8139	0,6328	0,0824
3	15,57	0,0218	11,7259	4,2358	9,8524	2,3623	0,1440
4	25,24	0,0595	18,3244	8,1017	14,3855	4,1628	0,6637
5	28,82	0,0629	12,6391	4,7848	10,4325	2,5782	0,4586
6	34,90	0,0922	10,4670	5,2981	7,8280	2,6591	0,3054
7	36,29	0,2184	6,8370	3,2593	5,2685	1,6908	0,1534
8	49,65	0,2257	6,7010	2,6676	5,4764	1,4320	0,1712
9	155,96	1,1281	19,7329	10,6813	14,8909	5,8393	1,5414

Виконання умови дотику з десятьма зафіксованими дотичними до монотонної кривої, призначеними у вихідних точках, потребувало збільшення параметричного числа сплайна через збільшення кількості його сегментів. Отриманий В-сплайн складається із 14 сегментів, конфігурацію яких визначають 16 точок, що його задають. За результатами коригування конфігурації В-сплайна з використанням інструментів САД-системи SolidWorks «Елемент управління додаванням дотику», «Елемент управління додаванням кривини» і «Маркери сплайна» вдалося досягти опуклості всього обводу та відсутності особливих точок не більше ніж на його ділянках 6...7, 7...8, 8...9 та 9...10.

Отриманий сплайн є опуклою кривою лінією, яка містить 13 точок з екстремальним значенням кривини. На ділянках, що містять особливі точки, сплайн розташовано за межами області можливого розташування монотонної кривої лінії, максимальне відхилення від якої становило 0,1182 мм на ділянці 3...4. На ділянках 6...7, 7...8, 8...9, 9...10, де значення кривини змінюються монотонно, сплайн розташовано всередині області розташування відповідних ділянок монотонної кривої.

Похибка інтерполяції обводом, що складається з дуг еліпсів, аналогічна похибці інтерполяції В-сплайном, який має у вихідних точках загальні дотичні з монотонною кривою. Максимальна похибка інтерполяції всього точкового ряду визначається ділянкою обводу, на якому величини  $\Delta_i$  або  $\Delta'_i$  мають найбільше значення. Такими ділянками будуть найбільш протяжні або ті, на яких викривленість обводу максимальна. Для обводу, наведеного в таблиці 1, це ділянка № 9, для якої  $\Delta_i = 14,8909$ ,  $\Delta'_i = 5,8393$ .

Справжнє розташування опуклого обводу щодо меж області розташування монотонної кривої залежить від характеристик обводу на конкретних ділянках. У разі монотонної зміни значень кривини вздовж ділянки обводу та загальних дотичних із монотонною кривою на її межах відхилення обводу від меж області розташування монотонної кривої не перевищує ширину цієї області. Якщо ділянка обводу містить точки з екстремальним значенням кривини, то способи, що дають можливість заздалегідь визначити його розташування всередині області опуклої кривої, нам невідомі. Можна гарантувати, що похибка подання монотонної кривої лінії опуклим обводом не перевищує максимальної відстані між межами їх можливого розташування. Цю похибку можна скільки завгодно зменшити шляхом збільшення кількості вихідних точок.



Створення програми, яка забезпечує автоматичне формування опуклого регулярного В-сплайна, заданого послідовністю вихідних точок і положенням дотичних у них, є складним завданням. Приклади вирішення цього завдання нам невідомі. У разі формування В-сплайна, який із заданою точністю представляє монотонну лінію, найпростішим і ефективнішим рішенням буде збільшення кількості вихідних точок, які можна інтерполювати монотонною кривою.

Зменшення похибки інтерполяції через збільшення кількості вихідних точок продемонструємо на прикладі заміни евольвенти кола опуклим В-сплайном.

Евольвента кола є монотонною кривою, вздовж якої значення кривини зменшуються. Її параметричне рівняння має вигляд [2]:

$$x = r \cos \varphi + r\varphi \sin \varphi;$$

$$y = r \sin \varphi - r\varphi \cos \varphi,$$

де  $r$  – радіус кола (еволюти), що визначає евольвенту;

$\varphi$  – кут, що відповідає дузі евольвенти.

Координати точок, що належать евольвенті кола і склали вихідний точковий ряд для інтерполяції В-сплайном, отримані для кроку зміни значень параметра  $\Delta\varphi = \varphi_{i+1} - \varphi_i = 1$ , починаючи з точки, що визначається значенням параметра  $\varphi_i = 0$ .

Значення похибки інтерполяцією перших 10 точок точкового ряду опуклим обводом, у точках якого положення дотичних не визначено ( $\Delta_i$ ), представлені в таблиці 2.

За допомогою розробленого нами програмного забезпечення отриманий точковий ряд інтерпольовано кубічним сплайном, який імпортовано в САД-систему SolidWorks. На рис. 6 зображено ділянку обводу, сформованого В-сплайном, і графік зміни кривини вздовж нього.

Таблиця 2

Значення похибок інтерполяції точкового ряду опуклим обводом

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h_i, \cdot 10^{-2}, \text{ мм}$	1,60	2,67	3,73	4,80	5,86	6,93	7,97	9,06	10,13	11,19
$\Delta_i, \cdot 10^{-4}, \text{ мм}$	1,30	2,29	3,233	4,169	5,103	6,036	6,968	7,90	8,83	9,76

Точність, з якою В-сплайн представляє евольвенту кола, забезпечує графік зміни значень кривини вздовж обводу, який інструменти САД-системи визначають як монотонний.

*Висновки.* У роботі досліджено можливість формування в САД-системі SolidWorks гладкого регулярного обводу, який із заданою точністю представляє монотонну криву лінію. Криві, ділянками яких можна формувати регулярний обвід, не дають можливості забезпечити монотонну зміну значень кривини вздовж обводу, але дають змогу контролювати його опуклість. Тому як абсолютну похибку інтерполяції на кожній із ділянок запропоновано використовувати найбільшу відстань між областями можливого розташування монотонної і опуклої кривих ліній, заданих тим самим точковим рядом.

Будь-яку криву лінію можна розглядати як таку, що складається з монотонних частин. Тому припущення про те, що якщо послідовність точок можна інтерполювати монотонною кривою лінією, то вихідна крива лінія, на якій ці точки були призначені, є монотонною, що дає змогу використовувати запропонований підхід для оцінки похибки інтерполяції точкового ряду довільної конфігурації.

Запропоновані критерії оцінки точності інтерполяції у разі формування обводів, заданих вихідним точковим рядом і точковим рядом, у точках якого задані положення дотичних щодо монотонної кривої прямих дають можливість розробити способи формування обводів дугами різних кривих ліній, опуклість яких можна контролювати. На основі запропонованих критеріїв

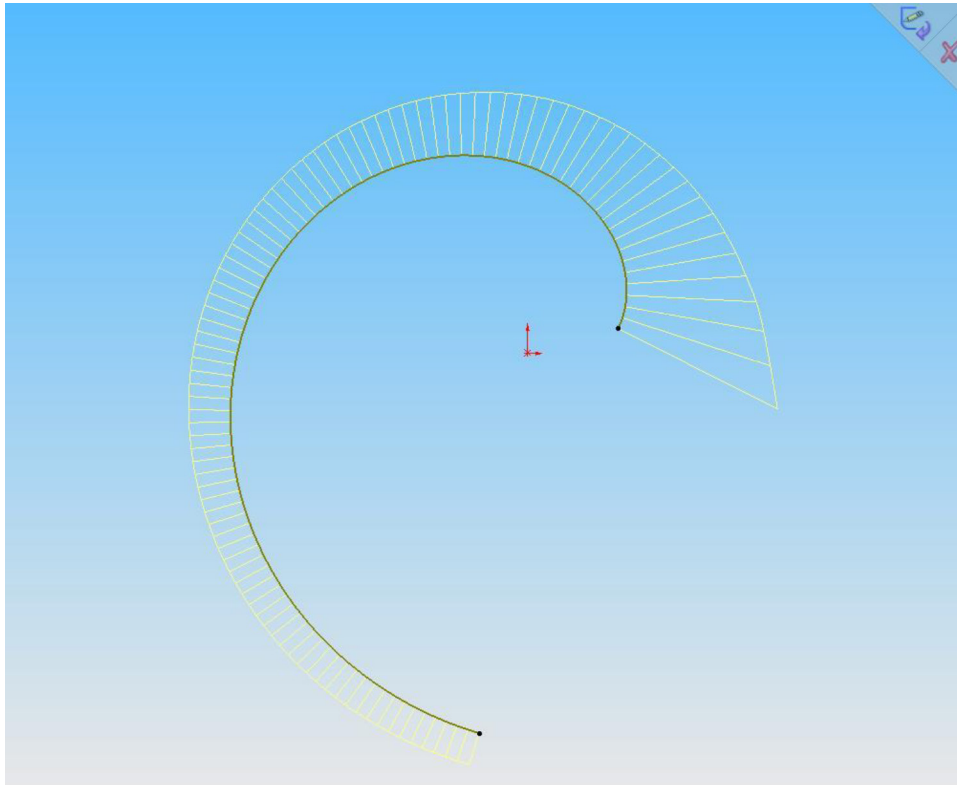


Рис. 5. Подання евольвенти кола В-сплайном

оцінки похибки інтерполяції розроблені способи формування опуклих регулярних обводів із дуг еліпсів та В-сплайна. Способи реалізовані в програмному додатку, який автоматично створює обводи в САД-системі SolidWorks. Спосіб формування обводу дугами еліпса заснований на рівняннях, що задають еліпси, і визначених за цими рівняннями параметрах, які дають можливість формувати ділянки обводу в системі SolidWorks. Такими параметрами є координати точок, що обмежують ділянку обводу, положення прямих дотичних до монотонної кривої лінії в цих точках і координати ще однієї точки, що належить еліпсу.

Створений додаток для формування обводів В-сплайном забезпечує його проходження через послідовність точок, заданих своїми координатами.

Спосіб формування обводів дугами еліпсів враховує положення дотичних до обводу прямих і забезпечує більшу точність інтерполяції. Спосіб формування обводів В-сплайном потребує меншого обсягу обчислень і легше реалізується у вигляді програмного забезпечення.

Можливості способу формування обводів В-сплайном досліджені під час вирішення завдань:

- інтерполяції точкового ряду, що складається з десяти точок, які задають монотонну криву лінію;
- інтерполяції точкового ряду, що належить евольвенті кола.

Дослідження доводить, що домогтися якомога малої похибки інтерполяції можна шляхом зменшення відстаней між вихідними точками, що належать до монотонної кривої, через збільшення їх кількості. Послідовність точок, що інтерполюються, може бути збільшена як шляхом уточнення вихідних даних, так і завдяки призначенню проміжних точок за методикою, запропонованою в [12].

Розроблені способи доцільно застосовувати в моделюванні лінійних елементів каркаса функціональних поверхонь з підвищеними аеро- і гідродинамічними властивостями, для яких мінімальна кількість особливих точок є основним критерієм якості отриманого розв'язку.



Перевагою запропонованих у роботі способів перед розробленим у роботі [12] способом представлення монотонної кривої лінії обводом, сформованим дугами кіл, є регулярна зміна значень кривини. Перевагою способу, запропонованому в [12], є монотонна зміна значень кривини вздовж обводу. Обидві із зазначених характеристик є важливими для моделювання функціональних поверхонь. Для вирішення конкретних завдань заздалегідь встановити пріоритет однієї із характеристик неможливо, оскільки він залежатиме від умов задачі. Такими умовами є швидкість переміщення потоку середовища вздовж поверхні та фізичні характеристики середовища (щільність, в'язкість та інші).

Ступінь впливу якості стикування ділянок обводу та закономірності зміни вздовж нього значень кривини можна встановити за результатами експерименту.

Універсальним способом збільшення точності, з якою регулярний обвід представляє монотонну криву, і зменшення різниці значень кривини в точках стикування дуг кіл є збільшення кількості точок, що інтерполюються. Задачу інтерполяції відповідної кількості точок дає змогу розв'язати створене на основі наших досліджень програмне забезпечення.

#### Список використаних джерел

1. Гавриленко Є. А., Холодняк Ю. В., Найдиш А. В., Лебедев В. А. Створення САД-моделей поверхонь із використанням спеціалізованого програмного забезпечення. *Прикладні питання математичного моделювання*. Херсон : ХНТУ, 2020. Т. 3, № 2.2. С. 66–75.
2. Ковальов Ю. М. Основи геометричного моделювання : навч. посіб. Київ : Вища школа, 2003. 231 с.
3. Найдиш В. М. Дискретна інтерполяція : навч. посіб. Мелітополь : Люкс, 2008. 250 с.
4. Холодняк Ю. В. Варіативне дискретне геометричне моделювання обводів на основі базисних трикутників по заданому закону зміни кривини : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мелітополь, 2016. 24 с.
5. Czerech L., Kaczyski R., Werner A. Machining error compensation for objects bounded by curvilinear surfaces. *Acta Mech. Autom.* 2012. Vol. 6. P. 26–30.
6. Jadhav Y. P., Chougule V. N., Mulay A. V. Free-form surface models generation using reverse engineering techniques – an investigation. *J. Mech. Civ. Eng.* 2006. P. 379–385. DOI: 10.9790/1684-15008030311-15
7. Pérez-Arribas F., Pérez-Fernández R. A B-spline design model for propeller blades. *Adv. Eng. Softw.* 2018. Vol. 118. P. 35–44. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.01.005
8. Fooladi M., Foroud A.A. Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbine. *IET Renew. Power Gener.* 2015. Vol. 10. P. 250–259. DOI: 10.1049/iet-rpg.2014.0419
9. Chekalin A. A., Reshetnikov M. K., Shpilev V. V., Borodulina S. V. Design of Engineering Surfaces Using Quartic Parabolas. *IOP Conf.-Ser. Sci. Eng.* 2017. Vol. 221, 012015. DOI: 10.1088/1757-899X/221/1/012015
10. Shen W., Wang G., Huang F. Direction monotonicity of a rational Bézier curve. *Appl. Math.* 2016. Vol. 31. P. 1–20. DOI: 10.1007/s11766-016-3399-7
11. Okaniwa S., Nasri A., Lin H., Abbas A., Kineri, Y., Maekawa T. Uniform B-Spline Curve Interpolation with Prescribed Tangent and Curvature Vectors. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 2016. Vol. 18. P. 1474–1487. DOI: 10.1109/TVCG.2011.262.
12. Havrylenko Ye., Kholodniak Yu., Halko S., Vershkov O., Bondarenko L., Suprun O., Miroshnyk O., Shchur T., Śrutek M., Gackowska M. Interpolation with Specified Error of a Point Series Belonging to a Monotone Curve. *Entropy*. 2021. Vol. 23 (5), 493. DOI: 10.3390/e23050493
13. Ashyralyev A., Sobolevskii P. *New Difference Schemes for Partial Differential Equations*. Birkhäuser: Germany, 2004. 446 p.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 15.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025





**Ye. Havrylenko, O. Mykhailenko**  
**Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University**

## **SOLVING INTERPOLATION PROBLEMS IN THE SOLIDWORKS CAD-SYSTEM**

### *Summary*

The paper examines the capabilities of a CAD system for solving interpolation problems. The problem of modelling a smooth contour with a regular change in curvature representing a monotone curve with specified accuracy is solved in the article. The contour is formed within the area of possible location of a convex curve, which can interpolate a point series. The assumption that if a sequence of points can be interpolated by a monotone curve, the original curve on which these points have been assigned is monotone, allows to use the proposed approach to estimate interpolation error of a point series of arbitrary configuration. The proposed methods for forming a convex regular contour by arcs of ellipses and B-spline ensure interpolation of any point series in parts that can be interpolated by a monotone curve. At the same time, deviation of the contour from the boundaries of the area of possible location of the monotone curve is controlled.

The study demonstrates that it is possible to achieve an arbitrarily small interpolation error by decreasing the distances between initial points on a monotonic curve by increasing their number. The sequence of interpolated points can be increased both by refining the initial data and by assigning intermediate points. The possibilities of the developed methods are tested while solving problems of interpolation of a point series belonging to monotone curves. The problems are solved in the CAD system SolidWorks with the use of software application created on the basis of the methods developed in the research work. The developed methods are appropriate for use in modeling linear elements of the framework of functional surfaces with enhanced aerodynamic and hydrodynamic properties, for which the minimum number of singular points is the main criterion for the quality of the resulting solution.

**Keywords:** interpolation, tangent line, curvature, area of location of the curve, contour, error, CAD-system, software application.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-37>

УДК 664.6/7

В. С. Калина, канд. техн. наук., доцент

ORCID: 0000-0002-3061-3313

В. О. Троєкурова, асистент

ORCID: 0009-0002-9117-696X

Д. П. Закопай, магістр

ORCID: 0009-0007-5364-6293

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет*

e-mail: viktoriya-kalina@ukr.net

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА АМАРАНТОВО-ЖИТНЬОГО ХЛІБА ЯК ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОДУКТУ З ПІДВИЩЕНОЮ ХАРЧОВОЮ ЦІННІСТЮ

*Анотація.* Метою роботи є розробка технології виробництва амарантово-житнього хліба. За результатами експериментальних досліджень розроблено рецептуру хлібобулочних виробів з підвищеною харчовою цінністю. Методом бального оцінювання визначено органолептичні показники якості нового продукту. Стандартними методами проаналізовано хлібні зразки за фізико-хімічними показниками якості: вологість, кислотність, пористість. Встановлено раціональні співвідношення рецептурних інгредієнтів для створення хлібних виробів та рекомендовано для виробництва використання кількості суміші борошна амарантово-житнього як 2:1. При цьому покращуються зовнішній вигляд, смак та фізико-хімічні показники якості. Використання амарантового борошна у хлібопекарстві дозволить збагатити продукт нутрієнтами, які є важливими для здоров'я людини та розширити асортимент в раціоні для окремих груп споживачів.

*Ключові слова:* хліб, борошно амарантове, борошно житнє, технологія, органолептичні та фізико-хімічні показники якості.

*Постановка проблеми.* В сучасних умовах розвитку харчової промисловості спостерігається зростаюча потреба населення у високоякісних, безпечних та корисних для здоров'я продуктах харчування. Хліб, як один із базових елементів раціону людини, має велике соціальне та економічне значення. Традиційні технології виробництва хлібобулочних виробів не завжди відповідають сучасним вимогам до харчової цінності, збереження корисних властивостей сировини та потреб окремих груп споживачів (діти, люди похилого віку, особи з непереносимістю глютену, цукровим діабетом тощо).

Відмінним варіантом використання в раціоні людей хворих на целиацію є сировина з амаранту. Білки з такої сировини містять всі амінокислоти і легко засвоюються організмом людини, оскільки є одними з найбільш схожих на білки тваринного походження [1].

До малопоширених видів борошна можна віднести житнє борошно, яке містить значну кількість харчових волокон, вітамінів групи В, мінеральних речовин (залізо, калій, магній), антиоксидантів та біологічно активних сполук. Серед зернових продуктів досить багатими на клітковину є житні продукти, дослідження яких демонструють позитивний вплив на метаболізм глюкози і самооцінку ситості, придушення голоду і як наслідок споживання енергії під час наступного прийому їжі [2].

Однак, впровадження житнього борошна у виробництво хліба супроводжується низкою технологічних та органолептичних труднощів. Тісто із житнього борошна має слабку клейковину або повністю її позбавлене, що ускладнює формування об'єму та структури готового виробу. Хліб із житнього борошна, у порівнянні з пшеничним, має більш кислий смак, темні-



ший колір і специфічні смакові властивості, які не завжди відповідають звичним споживчим уподобанням.

Крім того, виникають проблеми з ферментативними процесами у житньому тісті (через високу активність амілаз), що можуть негативно впливати на якість хліба. Це вимагає застосування особливих технологічних прийомів: заквасок, ферментованих добавок, ретельного контролю кислотності та температурних режимів.

Отже, постає нагальна потреба у вивченні оптимальних умов і способів використання житнього борошна для забезпечення високої якості хлібобулочних виробів, з урахуванням як його харчової цінності, так і технологічних особливостей.

*Аналіз останніх досліджень.* Хліб є одним з основних продуктів харчування, який може виконувати роль засобу корекції харчового раціону. Попри наявність широкого асортименту традиційної хлібобулочної продукції, виробництво виробів із підвищеним вмістом білка та інших біологічно-активних речовин для окремих соціальних або вікових груп є вкрай обмеженим – їх частка не перевищує 1–2 % від загального обсягу виробництва. У зв'язку з цим розробка нових видів продукції з використанням нетрадиційної сировини, що має високу біологічну цінність, є актуальним напрямом наукових досліджень і технологічних розробок.

Спостерігається тенденція до зростання виробництва хлібобулочних виробів із підвищеною харчовою цінністю. Незважаючи на доступність традиційного хліба як потенційного джерела білка, його реальна білкова цінність є низькою через високий вміст вологи. Це обмежує можливість повноцінного забезпечення білкових потреб організму за рахунок звичайної хлібної продукції.

При виробництві хлібобулочних виробів та інших харчових продуктів жито виступає ключовою зерновою культурою, що слугує джерелом борошна.

Жито, порівняно з іншими злаковими культурами, характеризується здатністю до акумуляції білка у підвищених кількостях. Цей феномен є предметом вивчення науковців, особливо в контексті створення гібридів пшениці та жита. Вміст білка у зерні може коливатися в межах 21–25 %, що зумовлено низкою факторів, зокрема генотипом, агрокліматичними умовами та строками посіву [3].

До основних харчових продуктів, що виготовляють з використанням жита, належать хліб, хрусткі сорти хліба, а також житні пластівці для приготування каш і сніданків. Останнім часом спостерігається зростання інтересу до застосування жита як інгредієнта у виробництві напівфабрикатів та снекової продукції. Завдяки своєму хімічному складу, зерно жита розглядається як перспективна сировина для створення функціональних і здорових харчових продуктів. Жито має потенціал для розширення асортименту зернових продуктів, доступних для споживання людиною, а також сприяє підвищенню вмісту харчових волокон і супутніх біологічно-активних сполук у готовій продукції, що є важливим чинником у формуванні раціонального харчування [4].

Зерно жита також вирізняється вищим вмістом деяких амінокислот, зокрема гістидину, аргініну, фенілаланіну та глутамінової кислоти, що зумовлює його підвищену біологічну цінність.

Особливості складових житнього борошна можуть бути визначені його характеристиками при вологості 14 %. Відсотковий склад житнього борошна залежить від сорту і включає 7,0–11,0 % білкових речовин, 70–77 % вуглеводів, 1,1–1,6 % жирів і 0,6–1,3 % мінеральних речовин. Вуглеводи представлені крохмалем, цукрами, розчинними (слизями) і нерозчинними пентозанами, а також клітковиною [5].

Порівнюючи з амарантовим борошном, можна відзначити, що житнє борошно відрізняється своєю складовою структурою, в якій переважають крохмаль, цукри, гумі речовини. У той час як амарантове борошно багате протеїнами, мінералами, вітамінами і має інші характеристики, які роблять його перспективним у харчовій промисловості [6].



В умовах постійного розвитку харчової промисловості та зростаючого попиту на здорові та високоякісні продукти, зерно амаранту та продукти його переробки виступають як перспективне джерело сировини. Одним із найпопулярніших продуктів харчування є хліб.

Амарант вражає своїм цінним хімічним складом та високою безпекою. Його використання в технології виробництва хлібних виробів відкриває нові можливості для створення продуктів із підвищеною харчовою та біологічною цінністю. Він виділяється своїм цінним хімічним складом та високим рівнем безпеки. Застосування його у виробництві хлібних виробів відкриває перспективи для створення продуктів з підвищеною харчовою та біологічною цінністю. Амарантове борошно, у свою чергу, є важливим джерелом основних мінералів (кальцію, цинку, магнію, фосфору, заліза) та вітамінів. Маленька порція амаранту (до 250 мл) забезпечує до 30 % добової норми кальцію, до 13 % добової норми вітаміну С та навіть цілих 80 % заліза [7].

Амарантове борошно вирізняється високою харчовою цінністю завдяки своєму збагаченому хімічному складу. Зокрема, вміст білка у ньому перевищує аналогічний показник пшеничного борошна у 3,8 рази, ліпідів – у 9,4 рази, клітковини – у 17 разів. Амарантове борошно також суттєво переважає за вмістом мінеральних речовин: натрію – у 24 рази, калію – у 4,2 рази, кальцію – у 19 разів, магнію – у 6 разів, фосфору – у 5 разів, заліза – у 36 разів. Вміст вітамінів є значно вищим: тіаміну – у 33 рази, рибофлавіну – у 74 рази, ніацину – у 1,2 рази [8].

Завдяки підвищеному вмісту білків і ліпідів амарантове борошно має дещо вищу енергетичну цінність порівняно з пшеничним. Вміст незамінних амінокислот у білковій фракції амарантового борошна становить 17,6 г на 100 г білка, а загальна кількість амінокислот – 37,7 г/100 г білка, що свідчить про його більш збалансований амінокислотний склад у порівнянні з пшеничним борошном. Тому амарантове борошно є доцільним для використання у хлібопекарській та кондитерській галузях у сумші з пшеничним борошном. Амарантове борошно доцільно використовувати не лише у виробництві хліба, а й інших продуктах харчової промисловості [9].

Останнім часом значно зріс інтерес до амарантової сировини, як до обґрунтовано перспективного інгредієнту для створення функціональних харчових продуктів завдяки своїм високоякісним харчовим та технологічним властивостям.

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є розробка технології виробництва амарантово-житнього хліба.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити рецептуру хлібобулочних виробів;
- оцінити органолептичні та фізико-хімічні показники якості дослідних зразків.

*Основна частина.* Дослідні зразки хліба готували з використанням борошна амарантового органічного ТМ «АНІМСА», борошна житнього цільнозернового жорнового помелу ТМ «Лавка традицій», закваски ТМ «Земледар», олії оливкової ТМ «David», солі кухонної харчової ТМ «Артемсіль», цукру та води. Кількість води додавалася з урахуванням вихідної вологості сировини відповідно до рецептури. Рецептурні співвідношення інгредієнтів тіста для виготовлення хлібу представлені в таблиці 1.

Під час проведення експериментів зразки готували за методом пробного лабораторного випікання. Використовуючи закваску, тісто замішували відповідно до рецептури. Загальна тривалість бродіння тіста склала 240 хвилин за температури  $37 \pm 1$  °С. Процес вистоювання тістових заготовок здійснювався за температури 37–38 °С та відносній вологості повітря 80–85 %. Після вистоювання тістових заготовок проводили випікання в лабораторній електропечі при температурі 150–160 °С тривалістю 90 хвилин.

З даних таблиці 1 видно, що дослідні зразки за рецептурами №№ 1–2 попадають в діапазон, що дозволяє одержати задовільні структурно-механічні показники тіста та органолептичні показники готового виробу, рецептура № 3 – не відповідає контрольному зразку.

Таблиця 1

Рецептура для приготування тіста

Найменування рецептурних інгредієнтів	Зразок 1 (Амарантово – житній хліб)	Зразок 2 (Житній хліб)	Зразок 3 (Амарантовий хліб)
Борошно амарантове органічне, %	30,8	–	46,2
Борошно житнє цільнозернове жорнового помелу, %	15,4	46,2	–
Закваска, %	19,2	19,2	19,2
Олія оливкова, %	2,3	2,3	2,3
Сіль кухонна харчова, %	0,7	0,7	0,7
Цукор, %	0,5	0,5	0,5
Вода, %	30,8	30,8	30,8
Характеристика дослідних зразків	Задовільні показники якості готового виробу	Задовільні показники якості готового виробу	Незадовільні показники якості готового виробу

Після випікання якість хліба оцінювали за органолептичними (рис. 2) та фізико-хімічними (табл. 2) показниками. Дослідні зразки випечених виробів представлено на рисунку 1.



Рис. 1. Дослідні зразки хлібу

1) Амарантово-житній; 2) Житній; 3) Амарантовий

Застосування методу бальної оцінки дало змогу встановити органолептичні показники якості дослідних зразків, результати яких наведено на рисунку 2.

Серед органолептичних характеристик враховували зовнішній вигляд хлібу (форма, колір та стан поверхні кірки), стан м'якуша (колір, структура пористості, реологічні властивості), смак та аромат.

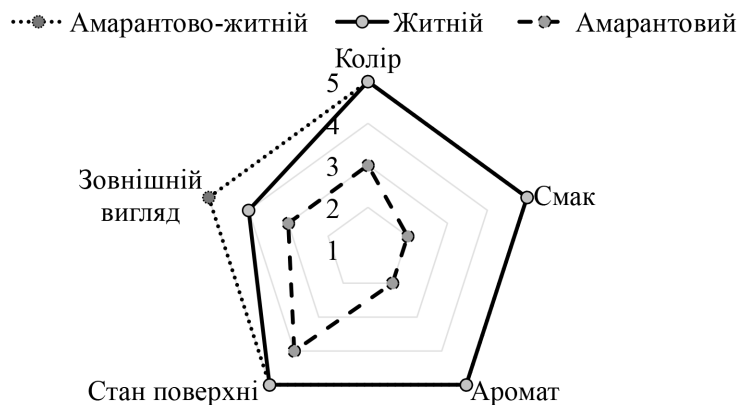


Рис. 2. Профілограми органолептичної оцінки якості дослідних зразків хліба

Досліджувані вироби, виготовлені на основі суміші борошна амарантового та житнього (зразок 1) мали найвищу оцінку за усіма показниками. Слід зазначити, що якість виробу на основі борошна амарантового (зразок 3) суттєво знижується за усіма критеріями оцінювання.



З метою підвищення якості хлібних виробів досліджено вплив різного співвідношення борошняних інгредієнтів на фізико-хімічні показники якості хлібних виробів.

Досліджувані зразки проаналізовано за фізико-хімічними показниками якості та представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Фізико-хімічні показники якості хлібних виробів

№ з/п	Найменування борошна (його співвідношення у хлібних виробках)	Фізико-хімічні показники хлібних виробів		
		Вологість %	Кислотність %	Пористість %
1	Амарантово-житній(2:1)	12,0	2,9	88,6
2	Житній (1:0)	11,8	5,5	83,7
3	Амарантовий (1:0)	19,6	3,3	82,6

Дані таблиці 2 свідчать про те, що:

– вологість досліджуваних зразків нижча показників ДСТУ. Хліб із пониженою вологістю має довший термін зберігання, оскільки менша кількість води уповільнює розвиток пліснявих грибів та бактерій. Це допомагає зберегти свіжість виробу на тривалій період та гарантує його якість і безпечність для споживача. Крім того, знижена вологість позитивно впливає на текстуру та структуру хліба, підтримуючи кращу консистенцію та форму під час зберігання й використання. Тривалість його зберігання становить 7 днів, тоді як традиційні хлібобулочні вироби залишаються свіжими лише 2 днів. Отже, зменшення вологості сприяє значному подовженню терміну придатності хліба;

– кислотність зразка 1 (амарантово-житній) перебуває в допустимих межах, що підтверджує доцільність застосування обраної рецептури хлібних виробів;

– пористість усіх досліджених зразків відповідає вимогам нормативно-технічної документації. Підвищена пористість хліба має низку переваг, що позитивно впливають на його якість та властивості під час його споживання. Завдяки більшій кількості пор хліб легше піддається діям шлункових соків, що сприяє ефективнішому перетравленню. Крім того, пориста структура забезпечує м'якість виробу, покращує його смакові характеристики та робить текстуру більш приємною. Рівномірний розподіл вологи в пористому хлібі сприяє тривалішому зберіганню та допомагає довше підтримувати свіжість продукту. Також хліб із розвиненою пористістю зазвичай має привабливіший зовнішній вигляд. Отже, підвищена пористість суттєво підсилює загальну якість хліба та покращує його споживні властивості.

*Висновки.* На основі представлених даних, а також експертних оцінок дослідних зразків хлібних виробів можна рекомендувати для виробництва використання суміші борошна амарантово-житнього у співвідношенні 2:1. При цьому покращуються зовнішній вигляд, смак та фізико-хімічні показники якості.

Використання амарантового борошна у хлібопекарстві дозволить збагатити продукт корисними речовинами, такими як кальцій, магній, фосфор та залізо, які є важливими в раціоні людини. Крім того, амарантово-житній хліб має низький глікемічний індекс, що робить його відмінним для тих, хто слідкує за рівнем цукру в крові. Його вміст лізину робить цінним джерелом повноцінного протеїнового білка. Такий хліб може бути особливо корисним для спортсменів, його прийнято вважати фітнес-хлібом. Враховуючи всі ці фактори, амарантово-житній хліб можна вважати не лише смачним, але й дієтичним продуктом, що підтримує здоров'я людини.

*Список використаних джерел*

1. Калина В. С., Родигін О. А. Макаронні вироби з амарантового борошна. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків : НТУ «ХПІ». 2022. № 3 (13). С. 57–62. doi:10.20998/2413-4295.2022.03.09
2. Sanz-P., Juan M. Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT-Food science and technology*. 2013, 50.2: 679–685.
3. Deleu Lomme J. The major constituents of rye (*Secale cereale* L.) flour and their role in the production of rye bread, a food product to which a multitude of health aspects are ascribed. *Cereal Chemistry*. 2020. 97.4: 739-754.
4. Kamal-Eldin, Afaf et al. Rye bread and other rye products. *Technology of functional cereal products*. 2008. 233–260.
5. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва. К. : Логос, 2002. с. 516.
6. Дзюндзя О. В., Звагольська К. М. Аналіз нетрадиційної борошняної сировини для виробництва хлібобулочних виробів. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 1. С. 22–29.
7. Шаповаленко О. І., Корж Т. В., Бондар І. П. Вплив борошна з амаранту на якість хліба. *Зберігання і переробка зерна*. 2007. № 5(95). С. 34–36.
8. Овсієнко С. М. Амарант та продукти його переробки в хлібопеченні. *Продовольчі ресурси*. 2022. Т. 10. № 18. С. 109–120.
9. Miranda-Ramos K. C., Sanz-Ponce N., Haros C.M. (2019). Evaluation of technological and nutritional quality of bread enriched with amaranth flour. *Food Science and Technology*. 114, 108418.

*Стаття надійшла до редакції 12.10.2025*

*Стаття прийнята 29.10.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**V. Kalyna, V. Troiekurova, D. Zakopai**  
**Dnipro State Agrarian and Economic University**

## **RESEARCH INTO THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF AMARANTH-RYE BREAD AS A FUNCTIONAL PRODUCT WITH INCREASED NUTRITIONAL VALUE**

### *Summary*

The aim of the work is to develop a technology for the production of amaranth-rye bread. It is proposed to strengthen the position of bakery products on the domestic market by expanding the range and increasing the production of products of increased nutritional and biological value. For this purpose, a new functional product has been developed – bread products containing amaranth and rye flour. Based on the results of experimental research, a recipe for bakery products with increased nutritional value has been developed. The following recipe ingredients were used in the work: organic amaranth flour, whole grain milled rye flour, sourdough, olive oil, table salt, sugar, water. The test samples were prepared using the laboratory baking test method. The total duration of dough fermentation was 240 minutes at a temperature of  $37 \pm 1$  °C. The dough proofing process was carried out at a temperature of 37–38 °C and a relative humidity of 80-85%. After proofing, the dough was baked in a laboratory electric oven at a temperature of 150–160 °C for 90 minutes. The organoleptic quality indicators of the new product were determined using the scoring method. Bread samples were analyzed using standard methods for physicochemical quality indicators: moisture, acidity, porosity. Rational ratios of recipe ingredients for creating bread products have been established and it is recommended to use the amount of amaranth-rye flour mixture as 2:1 for production. This improves the appearance, taste, and physicochemical quality indicators. The use of amaranth flour in baking will enrich the product with nutrients that are important for human health and expand the range of foods in the diet for certain groups of consumers.

**Keywords:** bread, amaranth flour, rye flour, technology, organoleptic and physicochemical quality indicators.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-38>

УДК 664.6

В. С. Калина, канд. техн. наук., доцент

ORCID: 0000-0002-3061-3313

В. О. Троєкурова, асистент

ORCID: 0009-0002-9117-696X

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет*

e-mail: viktoriya-kalina@ukr.net

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗПУШУВАЧІВ НА ЛУЖНІСТЬ ПЕЧИВА

*Анотація.* Метою роботи є порівняльний аналіз впливу розпушувачів на лужність печива. Методом сенсорного оцінювання визначено органолептичні показники якості дослідних зразків печива: зовнішній вигляд, колір, запах, смак, консистенція. Стандартними методами проаналізовано зразки за фізико-хімічними показниками якості: лужність. При застосуванні дослідних розпушувачів отримані зразки печива за органолептичними показниками відповідають вимогам ДСТУ3781:2014; найнижчий рівень лужності зафіксовано у зразках, приготованих із використанням розпушувача № 4 (сода харчова та кислота лимонна) = 0,20°; лужність усіх досліджуваних зразків не перевищувала нормативне значення, яке становить 2°. Досліджені розпушувачі є безпечними для використання у технології приготування здобного печива.

*Ключові слова:* печиво, розпушувачі, харчові добавки, лужність, органолептичні та фізико-хімічні показники якості.

*Постановка проблеми.* Якість борошняних кондитерських виробів значною мірою визначається їхньою структурою, смаковими властивостями та безпечністю для споживача. Одним із ключових факторів, що впливає на ці показники, є застосування хімічних розпушувачів, які забезпечують утворення пористої структури готового продукту за рахунок виділення вуглекислого газу під час випікання. Однак використання розпушувачів супроводжується певними технологічними та безпековими обмеженнями. Зокрема, лужність виробів, що визначається типом та кількістю розпушувача, регламентується санітарними нормами і не повинна перевищувати допустимих значень. Надмірна лужність може негативно впливати на смакові властивості, зовнішній вигляд, колір, консистенцію та навіть на вітамінний склад виробів. Враховуючи поширене використання різних видів розпушувачів – харчової соди, кислотних та комбінованих пірофосфатів постає необхідність системного аналізу їх впливу на лужність печива та оцінки ефективності розпушування при дотриманні безпечних технологічних параметрів. Розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору складу і дозування розпушувачів є актуальною задачею для підвищення якості та безпечності борошняних кондитерських виробів.

*Аналіз останніх досліджень.* Харчові добавки є невід'ємною складовою сучасної технології кондитерського виробництва. Вони являють собою широкий спектр природних або штучно синтезованих речовин, які додаються до продукту не заради його поживної цінності, а з конкретною технологічною метою, а саме для вдосконалення технології виготовлення певного виду харчових продуктів з характерними органолептичними показниками та відповідними властивостями.

Згідно із Законом України «Про якість та безпеку харчових продуктів і продовольчої сировини» харчовою добавкою є природна чи синтетична речовина, яка спеціально вводиться у харчовий продукт для надання йому бажаних властивостей [1].



Ключове призначення цих інгредієнтів – комплексне покращення характеристик готових виробів: від подовження терміну придатності та забезпечення мікробіологічної безпеки до надання привабливого зовнішнього вигляду, бажаної текстури, консистенції, а також підсилення смакових та ароматичних якостей.

Таким чином, харчові добавки дозволяють технологам створювати безпечну, стабільну та високоякісну продукцію, що відповідає сучасним вимогам споживчого ринку.

Харчові розпушувачі відіграють фундаментальну роль у технології кондитерського виробництва. Їхнє основне призначення – забезпечити продукції пористу, легку та пишну структуру, збільшити її об'єм та суттєво покращити органолептичні характеристики.

Ключова функція цих інгредієнтів полягає у генерації газоподібних речовин (переважно вуглекислого газу) безпосередньо в тісті під час його приготування або термічної обробки. Бульбашки газу розширюють тісто, формуючи необхідну структуру та запобігаючи ущільненню кінцевого продукту.

Під час хімічного розпушування зазвичай виділяється більше газу, коли тісто кисле, а температура висока. Деякі хлібопекарські інгредієнти, такі як борошно, можуть бути злегка кислими, але зазвичай використовуються так звані розпушувальні кислоти, особливо кислі фосфати, які є солями металів частково нейтралізованої фосфорної кислоти, а не чисті кислоти. Теоретично, можна вибрати будь-яку харчову кислоту, деякі з яких є більш активними, ніж інші. Бажано уникати високорозчинних у воді та гігроскопічних матеріалів, інакше збереження властивостей хімічних розпушувачів буде значно погіршено [2].

Аналіз проведених досліджень щодо функціональності розпушувачів у печиві показує, що вони беруть участь у комплексі хімічних реакцій і їх функція полягає в утворенні газу  $\text{CO}_2$ , який дозволяє (разом з випаровуванням вологи) утворювати бульбашки газу під час випікання.

У печиві також присутня значна кількість солі, що зменшує іонну силу водної фази розчину печива. Як відомо з електрохімії, іонна сила суттєво змінює дисоціацію іонів з розпушувачів. Отже, ми повинні враховувати вплив хлориду натрію ( $\text{NaCl}$ ) у хімічних реакціях [3].

*Формулювання мети статті (постановка завдання).* Метою роботи є аналіз впливу розпушувачів на лужність здобного печива.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити чотири різні типи хімічних розпушувачів при виготовленні дослідних зразків;
- оцінити органолептичні та фізико-хімічні показники якості дослідних зразків.

*Основна частина.* Для розпушування тіста широко використовують різноманітні харчові добавки. Найбільш відомою та поширеною серед них є сода харчова – гідрокарбонат натрію (натрій двовуглекислий, натрій кислий вуглекислий)  $\text{NaHCO}_3$ . У списку дозволених до застосування харчових добавок вона має індекс E500. Це білий кристалічний порошок без запаху, з характерним слабосолоним лужним смаком, який добре розчиняється у воді. Розпушувальна дія натрію гідрокарбонату проявляється під час нагрівання, коли він розкладається з утворенням діоксиду вуглецю.

Широке використання харчової соди у технології борошняних виробів зумовлене сукупністю її технологічних переваг. Зокрема, гідрокарбонат натрію є відносно недорогим, нетоксичним, простим у застосуванні та практично не впливає на смакові характеристики готового продукту. Крім того, сода промислового виробництва характеризується високою чистотою та мінімальним вмістом сторонніх домішок. Разом із тим, натрій двовуглекислий як розпушувальний агент має певні обмеження. Процес його термічного розкладу не є повним, унаслідок чого виділяється лише близько 50 % вуглекислого газу, який бере участь у формуванні пористої структури борошняних напівфабрикатів. Невиділена частина  $\text{CO}_2$  перетворюється на карбонат натрію ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), що спричиняє підвищення лужності, надання виробам жовтуватого відтінку, появу специфічного мильно-лужного присмаку та часткове руйнування вітамінів групи B [4].



Для збільшення об'єму утворюваного вуглекислого газу та регулювання швидкості його виділення до рецептури вводять органічні кислоти. Під час замішування тіста гідрокарбонат натрію швидко розчиняється у воді, що спричиняє підвищення рН до рівня, за якого газ практично не виділяється. Тому наявність певної кількості кислоти є необхідною умовою для забезпечення ефективного газоутворення. У виробництві борошняних кондитерських виробів з цією метою найчастіше застосовують лимонну кислоту (E330). Отриманий внаслідок взаємодії гідрокарбонату натрію та лимонної кислоти кисло-лужний розпушувач характеризується високою ефективністю та сприяє оптимальному розпушенню тіста.

В якості розпушувачів борошняних кондитерських виробів також можуть застосовуватися пірофосфати, що мають код E450. Ці сполуки входять до переліку харчових добавок, дозволених до використання у харчовій промисловості, оскільки не спричиняють шкідливого впливу на здоров'я людини. Сучасні рецептури розпушувачів часто включають кислий пірофосфат натрію ( $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ ). Ефективність таких композицій розпушувачів підвищується, якщо реакція між компонентами відбувається повільно та завершується лише під час термічної обробки тіста.

Серед основних технологічних обмежень при використанні кислого пірофосфату натрію слід виділити появу післясмаку. Зокрема, характерний «пірофосфатний» присмак виникає внаслідок обмінної реакції між кальцієм зубної емалі та натрієм, що міститься у динатрійфосфаті, який утворюється під час розпушування. Таким чином, присмак є наслідком хімічної активності пірофосфату під час процесу газоутворення та дії ферментів, що розщеплюють пірофосфати.

Основною метою застосування будь-якого розпушувача у виробництві борошняних кондитерських виробів є формування пористої структури готового продукту. Водночас необхідно дотримуватися вимог безпеки, оскільки лужність виробів регламентується санітарними нормами та не повинна перевищувати 2°.

У навчальній лабораторії кафедри харчових технологій Дніпровського державного аграрно-економічного університету здійснено експериментальне дослідження, присвячене вивченню впливу складу хімічних розпушувачів на лужність борошняних кондитерських виробів. Дослідження включало пробне лабораторне випікання контрольних зразків печива, органолептичну оцінку, визначення фізико-хімічного показника – лужності та подальший сенсорний аналіз одержаних результатів.

Для оцінки ефективності розпушення та безпечності виробів було відібрано та досліджено чотири різні типи хімічних розпушувачів (табл 1).

Таблиця 1

Склад розпушувачів

Номер зразка розпушувача	Склад дослідного розпушувача
1	пірофосфат натрію кислий + бікарбонат натрію+ крохмаль кукурудзяний
2	сода харчова E500+ пірофосфат натрію E450+ борошно пшеничне
3	сода харчова E500
4	сода харчова E500+ кислота лимонна E330

Представлені розпушувачі використовували при випіканні контрольних зразків здобного печива [5–6], інгредієнтний склад якого представлений в таблиці.

При використанні розпушувачів їх дозування визначалося згідно з рекомендаціями спеціалізованих технологів-виробників.

Після випікання контрольних зразків печива було здійснено органолептичну оцінку їх якості. Оцінювання проводили в навчальній лабораторії кафедри харчових технологій Дніпровського державного аграрно-економічного університету. Визначено органолептичні показники якості:

Таблиця 2

## Інгредієнтний склад печива

№ з/п	Назва інгредієнту
1	Борошно пшеничне (вищого або першого ґатунку)
2	Жири (вершкове масло, маргарин або спеціалізовані кондитерські жири, вміст яких може досягати до 40 %)
3	Цукор (або цукрова пудра, до 45 %)
4	Яйця або меланж
5	Харчові розпушувачі
6	Смакові та ароматичні добавки (ванілін)
7	Сіль

зовнішній вигляд, колір, консистенцію, запах та смак. Для опису якості застосовували словесну характеристику.

Усі контрольні зразки продемонстрували наступні властивості: зовнішній вигляд – правильна форма, рівні краї, відсутність здуттів на поверхні; колір – рівномірний золотавий; запах – ванільний, характерний для даного виду виробу; смак – солодкий, без сторонніх призмків; консистенція – суха, без ущільнення, крихка при натисканні.

Одержані результати досліджень свідчать про те, що всі дослідні зразки печива за органолептичними показниками відповідають вимогам технічного нормативного документа ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови».

Нами проведено лабораторне дослідження з визначення лужності контрольних зразків печива відповідно до ДСТУ 5898-87 «Кондитерські вироби. Методи визначення кислотності та лужності». За результатами аналізу встановлено рівень лужності дослідних зразків печива, що характеризує їх фізико-хімічні властивості та відповідає вимогам нормативної документації: – з розпушувачем № 1 – 0,31°; – з розпушувачем № 2 – 0,28°; – з розпушувачем № 3 – 0,23°; – з розпушувачем № 4 – 0,20°.

*Висновки.* Одержані результати дослідження дозволяють зробити такі висновки: при застосуванні дослідних розпушувачів отримані зразки печива за органолептичними показниками відповідали вимогам ДСТУ3781:2014; найнижчий рівень лужності зафіксовано у зразках, приготованих із використанням розпушувача № 4 (сода харчова та кислота лимонна) = 0,20°; лужність усіх досліджуваних зразків не перевищувала нормативне значення, яке становить 2°. Отже, всі досліджені розпушувачі є безпечними для використання у технології приготування здобного печива.

*Список використаних джерел*

1. Закон України «Про якість та безпеку харчових продуктів і продовольчої сировини». Відомості Верховної Ради України. 1998. № 19. С. 298–312.
2. Ракша-Слюсарєва О.А. Харчові добавки: монографія. М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. 2014. 552 с.
3. Дорохович А. М., Дорохович В. В., Абрамова А. Г., Петренко М. М. Технологія печива звичайного і спеціального призначення. Навчальний посібник. Інкос. 2022. 826 с.
4. Pierre Gélinas. Inventions on phosphates for chemical leavening. *International Journal of Food Science and Technology*, Volume 57, Issue 5, May 2022. P. 2840–2861. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15675>
5. Євлаш Л. В., Торяник О. І., Коваленко В. О., Аксьонова О. Ф. та ін. Харчова хімія: навчальний посібник. Харків : Світ книг. 2019. 504 с.
6. Kollemparembil A.M. Application of CO<sub>2</sub> gas hydrates as leavening agents in black-and-white cookies. *Foods*. 2023. 12.14: 2797.
7. RGM van der Sman. Thermodynamic description of the chemical leavening in biscuits. *Curr Res Food Sci*. 2021. Mar 26;4:191–199. doi: 10.1016/j.crfs.2021.03.006
8. Олабоді О. В. Хімічні технології харчових добавок та косметичних засобів / монографія: НУХТ. Київ. 2021. 176 с.



9. Ластухін Ю. О. Харчові добавки. Е-коди. Будова. Одержання. Властивості. Навч. посібник. Львів : Центр Європи. 2009. 836 с.

10. Гайдук О. В., Герлянд Т. М., Дрозіч І. А., Кулалаєва Н. В., Романова Г. М. Приготування кондитерських виробів: збірник рецептур. К. : ППТО НАПН України. 2021. 222 с.

11. Ростовський В. С., Кукуєва О. М. Технологія виробництва борошняних кондитерських виробів. Абетка кондитерського мистецтва: Навчальний посібник. Кондор. 2018. 497 с.

*Стаття надійшла до редакції 29.10.2025*

*Стаття прийнята 15.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**V. Kalyna, V. Troiekurova**  
**Dnipro State Agrarian and Economic University**

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SOLVENTS ON THE ALKALINITY OF COOKIES**

### *Summary*

The aim of the work is a comparative analysis of the effect of baking agents on the alkalinity of cookies. In the training laboratory of the Department of Food Technologies of the Dnipro State Agrarian and Economic University, a trial laboratory baking of control samples of shortbread cookies was carried out. The following recipe ingredients were used in baking: wheat flour, butter, sugar, eggs, food additives – baking powder, vanillin, salt. To assess the effectiveness of baking powder and the safety of products, four different types of chemical baking powders were selected and tested: sample 1 – sodium pyrophosphate acid + sodium bicarbonate + corn starch; sample 2 – baking soda E500 + sodium pyrophosphate E450 + wheat flour; sample 3 – baking soda E500; sample 4 – baking soda E500 + citric acid E330. The organoleptic quality indicators of the experimental cookie samples were determined by the sensory evaluation method. All control samples demonstrated the following properties: appearance – regular shape, smooth edges, no bulges on the surface; color – uniform golden; smell – vanilla, characteristic of this type of product; taste – sweet, without foreign flavors; consistency – dry, without compaction, brittle when pressed. The samples were analyzed by standard methods for physicochemical quality indicators: alkalinity. When using the experimental baking powders, the obtained cookie samples by organoleptic indicators meet the requirements of DSTU3781:2014. According to the results of the analysis, the alkalinity level of the experimental cookie samples was established, which characterizes their physicochemical properties and meets the requirements of regulatory documentation: – with baking powder No. 1 – 0.31°; – with baking powder No. 2 – 0.28°; – with baking powder No. 3 – 0.23°; – with baking powder No. 4 – 0.20°. All of the tested baking powders are safe for use in shortbread cookie making.

**Keywords:** cookies, baking powders, food additives, alkalinity, organoleptic and physicochemical quality indicators.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-39>

УДК 641.4:664.8.037:664.149:634.7:640.43

І. М. Калугіна, канд. техн. наук, доцент  
Одеський національний технологічний університет  
e-mail: ik101273@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3385-9722

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СОРБЕТУ З ФЕЙХОА ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА

*Анотація.* Робота присвячена удосконаленню технології сорбету з фейхоа для закладів ресторанного господарства шляхом дослідження його структурно-механічних властивостей. Наведені перспективи використання в технології сорбету добавки з нової плодово-ягідної сировини, а саме пюре фейхоа із цукром, що характеризується високим вмістом цінних нутрієнтів. Показана доцільність дослідження структурно-механічних властивостей сорбету з фейхоа для підбору раціональних режимів приготування на сучасному устаткуванні. Для обґрунтування кількості добавки фейхоа в рецептурі та визначення технологічних параметрів приготування сорбету з фейхоа на стадії фризювання досліджені зміни ефективної в'язкості, вплив тривалості збивання на показник збитості та структурну міцність сорбету. Удосконалену технологію сорбету з фейхоа рекомендовано до впровадження в заклади ресторанного господарства для розширення асортименту десертів здорового харчування з підвищеною харчовою цінністю.

*Ключові слова:* сорбет, заморожений десерт, фейхоа, структурно-механічні властивості, реологічні методи, фризювання, якість, заклади ресторанного господарства.

*Постановка проблеми.* Серед популярних десертів, що споживаються населенням усього світу, привертають до себе увагу сорбети. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (ФАО) класифікує сорбети як заморожений десерт на водній основі, який складається з двох основних інгредієнтів: фруктового соку та цукру (серед інших інгредієнтів) [1]. Сорбет – це заморожений десерт, який готують із плодово-ягідної сировини без використання молочних продуктів. Його популярність зумовлена гарними споживними властивостями, охолоджувальним ефектом, низькою калорійністю (60–120 ккал/100 г). Крім того, це підходящий вид десерту для людей з алергією або непереносимістю інгредієнтів у продуктах на молочній основі [2] або для тих, хто дотримується вегетаріанської / веганської дієти [3; 4]. Сучасні споживачі мають підвищену свідомість щодо здоров'я, це стимулює їх до пошуку нових продуктів, що сприяють його покращенню. Завдяки високому вмісту в рецептурі сорбету ягід і плодів, які багаті вітамінами, мінеральними речовинами, органічними кислотами й пектинами, сорбет можна розглядати як продукт здорового харчування. У закладах ресторанного господарства сорбети зазвичай виготовляються зі свіжих фруктів та ягід і не містять стабілізаторів, тому їх можна зберігати в побутових морозильних камерах лише 2–3 доби. Сорбети можуть виступати як здорові десерти із численними смаковими можливостями залежно від фруктів та ягід, які додаються до рецепта. Відомо, що одним із найкращих способів зберегти смак, колір, а також біоактивні сполуки фруктово-ягідної сировини є заморожування [5]. Технологія приготування сорбету дає змогу ввести в його рецептуру добавки з місцевих і нетрадиційних видів сировини, збалансованих за вмістом біологічно-активних речовин, і одержати заморожений десерт високої харчової цінності з регульованими структурно-механічними й органолептичними показниками для ефективного впровадження у виробництво закладів ресторанного господарства.



Використання нової сировини – фейхоа з високим вмістом цінних нутрієнтів для виробництва сорбету підвищеної харчової цінності є актуальним завданням, яке потребує вирішення.

Умови процесу заморожування суттєво впливають на якість сорбету, спосіб зберігання та його структурно-механічні властивості. Реологічна структура сорбету вважається замороженою піною, у якій розмір кристалів льоду, повітряних бульбашок і частинок фруктово-ягідного наповнювача є найважливішим параметром для якості кінцевого продукту. Так, великі кристали льоду можуть призвести до зниження органолептичних властивостей сорбету [6]. Тому під час розробки заморожених десертів, як-от сорбет із фейхоа, постає питання дослідження їх реологічних і технологічних властивостей для підбору раціональних режимів приготування на сучасному устаткуванні, а отже, забезпечення високої якості готового продукту.

*Аналіз останніх досліджень.* Сьогодні розробка технологій нових заморожених десертів – це тренд у галузі досліджень у світі, що зосереджений на розробці здоровіших альтернатив морозиву [7], продуктах із довшим терміном зберігання або тих, що мають додану цінність завдяки певним інгредієнтам (інуліну, антиоксидантам, вітамінам, амінокислотам тощо) [3]. Постійний науковий інтерес до вивчення заморожених десертів очевидний із наявності опублікованих статей на цю тему [8; 9; 10]. Так, щоб задовольнити зростаючий попит на спеціальні дієти, спрямовані на споживачів із непереносимістю лактози та веганів, фахівці харчової галузі розробляють заморожені десерти типу сорбет, виготовлені з додаванням соєвого, рисового, амарантового білка, стевії [11]. Останнім часом сорбети використовуються як засіб для доставки в організм цінних сполук, як-от біоактивні пептиди, інулін тощо [6]. Аналогічно сорбети з підвищеним вмістом біологічно активних речовин виробляють із додаванням авокадо, ківі, дині, чорниці, манго, насіння чіа та амаранту, ягід асаї, м'яти, що зрештою покращує органолептичні та корисні для здоров'я властивості цих продуктів [5; 11; 12; 4]. Отже, підвищення харчової цінності сорбетів завдяки додаванню нових видів фруктово-ягідної сировини, багатой на цінні нутрієнти, викликає зростаючий інтерес з боку науковців, комерційної харчової промисловості та ресторанного бізнесу [13].

Перспективною сировиною за органолептичними характеристиками та вмістом цінних речовин у хімічному складі для розробки таких десертів, як сорбети, є ягоди фейхоа (Feijoa). Адже вони містять значну кількість біологічно-активних речовин у доступній для організму людини формі, які забезпечують потужний оздоровчий ефект на організм людини: вітамін С (32...36 мг/100 г), вітаміни групи В, вітамін РР, бета-каротин; мінеральні елементи – фосфор, залізо, магній, калій, кальцій, натрій, марганець, мідь та цинк, органічні кислоти, кахетіни та лейкоантоціани [14; 15]. До того ж ягоди фейхоа слугують цінним джерелом йоду та селену. Зокрема, їхній вміст у плодах становить відповідно 0,07...0,1 мг/100 г йоду та 0,02...0,03 мг/100 г селену [16; 17; 18]. Невисока енергетична цінність фейхоа (45...50 ккал) дає підстави віднести цей продукт до категорії дієтичних [19]. Крім того, ягоди фейхоа характеризуються високим вмістом пектину (1,5...2,5 г/100 г) [20], який володіє структуроутворювальними властивостями. Наявність пектину в добавці з фейхоа обумовлює її перспективність для виготовлення структурованих десертів, як-от сорбет.

*Формулювання мети (постановка завдання).* Метою роботи є удосконалення технології сорбету з фейхоа для закладів ресторанного господарства шляхом дослідження його структурно-механічних властивостей.

Відповідно до цього поставлено завдання:

- дослідити зміни ефективної в'язкості сорбету з фейхоа для визначення раціональних технологічних параметрів стадії фризювання;
- визначити збитість сорбету з фейхоа для обґрунтування кількості добавки в рецептурі та режимів збивання маси;
- з'ясувати вплив добавки фейхоа та режимів збивання на структурну міцність сорбету.

*Основна частина.* Для виробництва нових добавок у сорбет використовували ягоди фейхоа сорту «Андре», які відповідали вимогам ДСТУ 4640:2006 [21]. Запропоновано метод сезонного консервування ягід фейхоа, який передбачає виготовлення пюре фейхоа з додаванням цукру для подальшого використання в технологічних процесах закладів ресторанного господарства протягом року у виробництві сорбету. Як контрольний зразок використовували сорбет, який готували за рецептурою № 10.48 «Сорбет лимонний» [22]. Було розроблено кілька варіантів рецептур сорбету з різним умістом фейхоа – 25, 35 та 40 % до загальної маси продукту.

Під час виготовлення сорбету особливо важливо звернути увагу на стадію фризеравання – процес інтенсивного збивання суміші з одночасним частковим її заморожуванням. Цей етап спрямований на утворення однорідної, кремоподібної маси збільшеного об'єму. Параметри фризеравання значною мірою визначають споживчі характеристики сорбету – консистенцію, її рівномірність, пухкість, дрібнодисперсність і ступінь розподілу повітряних бульбашок, частинок фейхоа та кристалів льоду. Процес фризеравання здійснювали у фризери періодичної дії Frigomat G20 [18]. Температура сорбету на виході з апарата становила  $-4\dots-6$  °C.

У процесі фризеравання в структурі сорбету відбуваються деформаційні зміни. Для їх аналізу під час механічного впливу, зокрема під час збивання, доцільно застосовувати реологічні методи. В'язкість зразків визначалася після завершення фризеравання на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2» [18; 23].

На рис. 1 наведено реограми залежності ефективної в'язкості ( $\eta$ , кПа·с) сорбету від швидкості зсуву ( $\dot{\gamma}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ) за різного вмісту пюре фейхоа. Установлено, що зі збільшенням кількості добавки фейхоа ефективна в'язкість сорбету підвищується. Так, за градієнта швидкості зсуву  $1,8 \text{ с}^{-1}$  в'язкість контрольного зразка становила 1,261 кПа·с, тоді як у зразках із 25, 35 та 40 % фейхоа – 1,358, 1,440 та 1,511 кПа·с відповідно. Зростання в'язкості пояснюється властивостями дисперсної фази, зокрема структурою пюре фейхоа, частинки якого мають неоднорідні розміри (0,1...0,4 мм) та різну енергію міжчастинкових зв'язків у коагуляційних контактах [18; 24; 25]. Розмір твердих частинок у високов'язких продуктах, як-от сорбет із фейхоа, впливає на енергетичні витрати й ефективність процесів виробництва, особливо під час збивання у фризери.

Підвищення ефективної в'язкості сорбету з фейхоа також може бути зумовлене наявністю в пюре пектинових речовин – природних гідроколоїдів, що сприяють загущенню маси [18; 28].

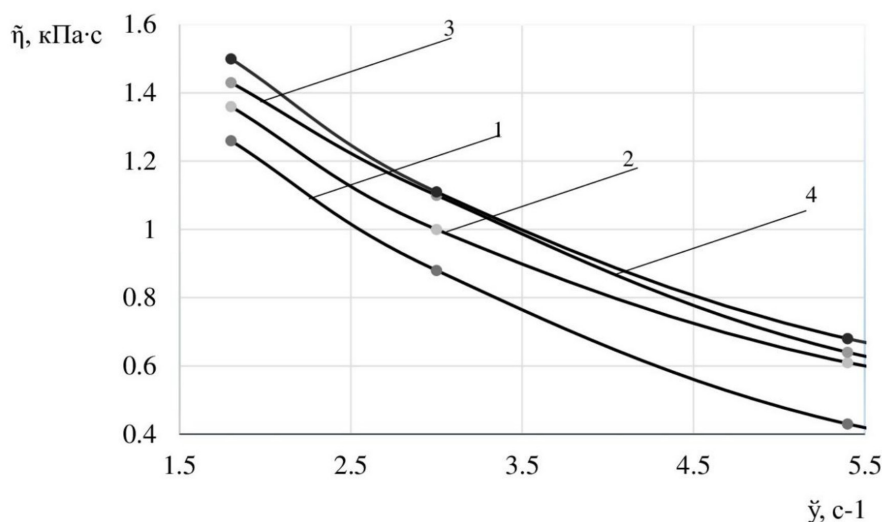


Рис. 1. Залежність ефективної в'язкості –  $\eta$ , кПа·с сорбету від швидкості зсуву –  $\dot{\gamma}$ ,  $\text{с}^{-1}$  та кількості добавки фейхоа:

1 – контроль; 2 – сорбет, 25 % фейхоа; 3 – сорбет, 35 % фейхоа; 4 – сорбет, 40 % фейхоа

Як видно з рис. 1, зі зростанням швидкості зсуву від  $1,8$  до  $5,4 \text{ с}^{-1}$  ефективна в'язкість усіх зразків зменшується у  $2,2$ – $2,4$  рази, досягаючи мінімуму за градієнта  $5,4 \text{ с}^{-1}$ , що відповідає максимальному руйнуванню структури сорбету [18]. Отже, для формування стабільної консистенції десерту доцільно здійснювати збивання за градієнта швидкості зсуву від  $3$  до  $4 \text{ с}^{-1}$ , коли структура сорбету не руйнується; тривалість такого фризювання становить приблизно  $6$  хв.

Для заморожених десертів, зокрема сорбету, збитість – найважливіший показник, що характеризує їх структуру і консистенцію. Збитість сорбетів обумовлена ступенем насичення їх повітрям під час збивання, і це значення повинно бути не нижче ніж  $40$ – $60$  % [18; 26]. Якщо показник збитості низький ( $15$ – $20$  %), у масі сорбету нерівномірно й не в достатньому обсязі розподіляється повітряна фаза, утворюються великі кристали льоду і, як наслідок, консистенція стає грубою та забитою.

Встановлено, що для досягнення необхідного показника збитості тривалість збивання сорбетів повинна становити  $4$  хв (рис. 2). Оптимальною для досягнення найкращих показників збитості є тривалість збивання  $6$  хв, з подальшим збиванням протягом  $8$  хв показник збитості знижується, що може свідчити про руйнування структури. Найкращий показник збитості ( $70$ – $76$  %) досягається в разі приготування сорбету з додаванням  $35$  % фейхоа, який може бути рекомендованим для впровадження в заклади ресторанного господарства [18].

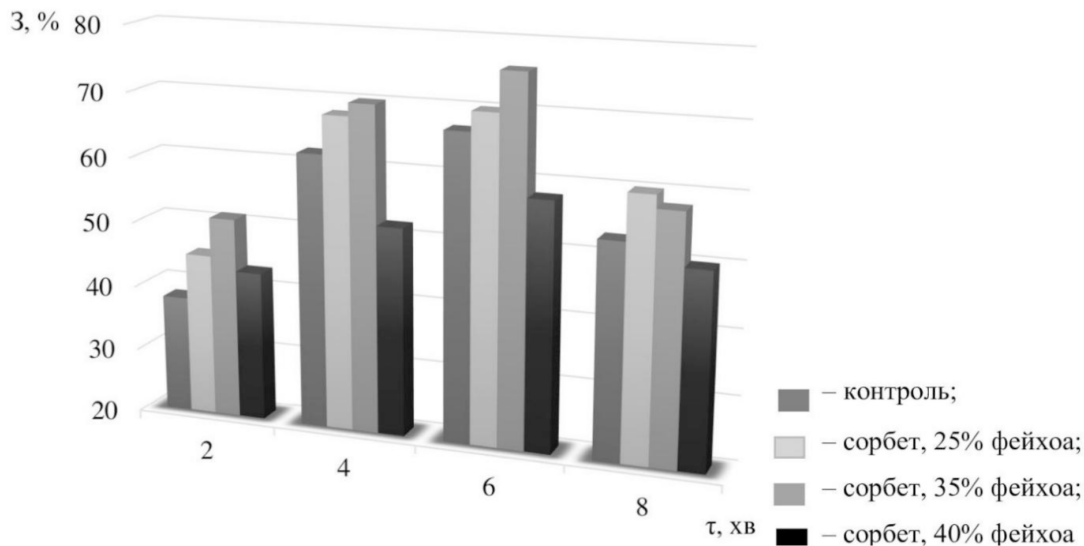


Рис. 2. Залежність збитості  $Z$ , %, сорбету від тривалості збивання  $t$ , хв, та кількості добавки фейхоа

Дослідження граничної напруги зсуву сорбету для визначення його структурної міцності були проведені на пенетрометрі AP-4/1 [27]. Результати дослідження показника граничної напруги зсуву сорбету (рис. 3) свідчать про підвищення структурної міцності з додаванням добавки фейхоа. Так, на початку збивання величина показника граничної напруги зсуву в контрольному зразку сорбету становила  $208$  Па, а в зразках сорбету з добавками фейхоа в кількості  $25$ ,  $35$  та  $40$  % –  $241$ ,  $276$  і  $332$  Па відповідно.

Підвищення міцності сорбету з додаванням добавок фейхоа в  $1,6$  рази може бути пояснена тим, що до хімічного складу добавки входить високомолекулярний полімер – пектин, який здатний зміцнювати структуру мас. Імовірно, що введення добавок фейхоа в сорбет зумовлює високу різницю полярностей між дисперсною середовищем і дисперсійною фазою [27], що призводить до утворення більш міцної коагуляційної структури сорбету, а отже, до підвищення значення показника граничної напруги зсуву. Встановлено, що загальною тенденцією для досліджуваних зразків сорбету є зниження показника граничної напруги зсуву під час зби-

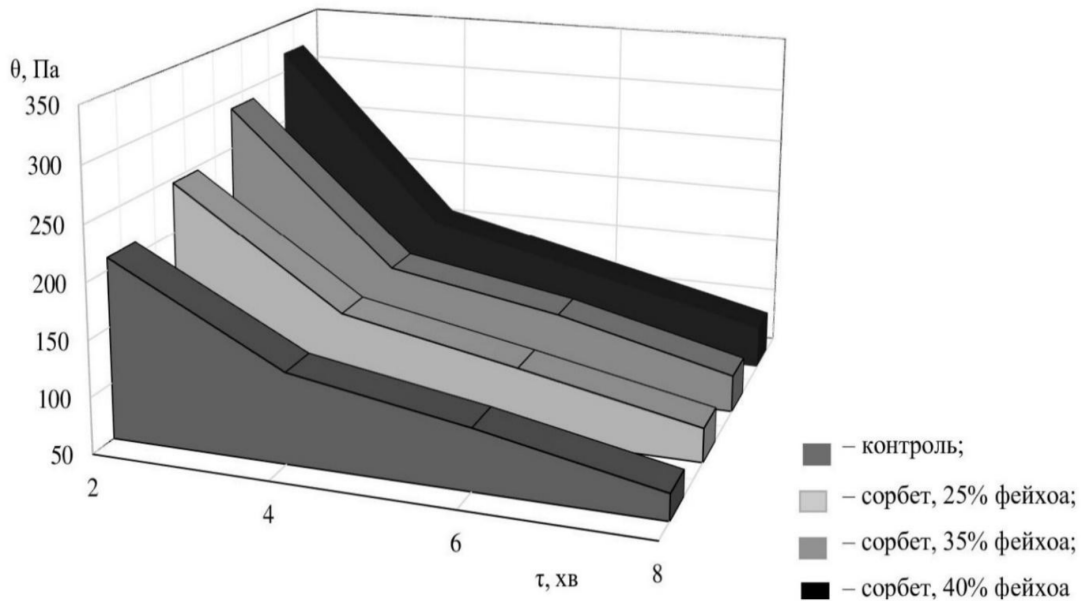


Рис. 3. Залежність граничної напруги зсуву  $\theta$ , Па, сорбету від тривалості збивання  $\tau$ , хв, та кількості добавки фейхоа

вання протягом 2...8 хв. Так, у разі збивання зразків сорбету протягом 6 хв гранична напруга зсуву знижується для контрольного зразка у 2 рази, для зразків сорбету з 15, 20 та 25 % добавки фейхоа – у 2,2, 2,4 та 2,6 рази відповідно. Об'ємна концентрація повітря, досягнувши максимального значення, незначний час залишається постійною. Подальше збивання протягом 8 хв призводить до зменшення обсягу піни та значного зменшення показника граничної напруги зсуву, що свідчить про руйнування структури мас. Це є підґрунтям для рекомендації раціональної тривалості збивання під час стадії фризирования сорбету – 6 хв для отримання найбільш пишної, дрібнодисперсної структури й водночас стабільної консистенції.

**Висновки.** Проведені дослідження структурно-механічних властивостей сорбету з фейхоа, а саме ефективної в'язкості, збитості та граничної напруги зсуву, дали можливість удосконалити технологію цього замороженого десерту. Встановлено: рекомендований вміст добавки фейхоа у рецептурі сорбету – 35 % до маси готового продукту; для отримання стабільної структури сорбету з фейхоа є ефективним проводити процес збивання за температур  $-4...-6$  °C в межах градієнта швидкості зсуву від 3 до 4  $s^{-1}$ , що дорівнює 6 хв фризирования. За цих режимів технологічної обробки та вмісту добавки фейхоа досягаються стандартні показники збитості сорбету (70...76 %) та значення граничної напруги зсуву – 126 кПа, що відповідає нормованому.

Удосконалену технологію сорбету з фейхоа можна рекомендувати до впровадження в заклади ресторанного господарства для розширення асортименту десертів здорового харчування з підвищеною харчовою цінністю.

Перспективи подальших наукових розробок полягають у розширенні асортименту солодких страв із фейхоа, спрямованих на профілактику дефіциту йоду.

#### Список використаних джерел

1. CODEX. Dairy-based desserts (e.g., pudding, fruit or flavoured yoghurt). In General Standards for Food Additives; WHO: Geneva, Switzerland, 2021. URL: <https://resource.chemlinked.com.cn/food/File/codex-food-additive-2021.pdf>
2. P. Agnieszka, M. Skotnicka. The health-promoting and sensory properties of tropical fruit sorbets with inulin. *Molecules*. 2022. Vol. 27 (13). P. 4239. <https://doi.org/10.3390/molecules27134239>



3. Teodora Petkova, Pavlina Doykina, Iordanka Alexieva, Dasha Mihaylova Characterization of Fruit Sorbet Matrices with Added Value from Zizyphus jujuba and Stevia rebaudiana *Foods*. 2022. Vol. 11 (18). P. 2748. <https://doi.org/10.3390/foods11182748>
4. Rita Székelyhidi, Erika Lakatos, Zsófia Tóth, Beatrix Sik. The effect of mint addition on the physicochemical and organoleptic properties of strawberry sorbets. *Food Chemistry*. 2025. Vol. 26, February. P. 102271. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102271>
5. Agnieszka P., Wilczyńska A. Storage quality changes in craft and industrial blueberry, strawberry, raspberry and passion fruit-mango sorbets *Foods*. 2023. Vol. 12 (14). P. 2733. <https://doi.org/10.3390/foods12142733>
6. Malgor M., Sabbione A.C., Scilingo A. Amaranth lemon sorbet, elaboration of a potential functional food. *Plant Foods Hum Nutr*. 2020. Vol. 75. P. 404–412. DOI: 10.1007/s11130-020-00818-y
7. López-Martínez M.I., Moreno-Fernández S., Miguel M. Development of Functional Ice Cream with Egg White Hydrolysates. *Int. J. Gastron. Food Sci.* 2021. Vol. 25. P. 100334. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100334>
8. Medeiros A.C.d., Bolini H.M.A. Plant-Based Frozen Desserts: Temporal Sensory Profile and Preference. *Braz. J. Food Technol.* 2021. Vol. 24. P. 2020037. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03720>
9. Fayed A., Abo El-Naga M., Khallaf M., Eid M. Value addition to frozen desserts through incorporation of pumpkin solids and of milk permeate. *Arab Univ. J. Agric. Sci.* 2020. Vol. 28. P. 857–870.
10. Jackson Williams, Andrew J. McKune and Nenad Naumovski Sorbets as Functional Food Products. *Unexplored Food Matrices, Their Challenges, and Advancements*. 2023. Appl. Sci. 13 (21). P. 11945. <https://doi.org/10.3390/app132111945>
11. Alessandra Cazelatto de Medeiros, Helena Maria André Bolini. Plant-based frozen desserts: temporal sensory profile and preference. *Braz. J. Food Technol.* 2021. Vol. 24. P. 1–12. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03720>
12. Palka A., Skotnicka M. The health-promoting and sensory properties of tropical fruit sorbets with inulin. *Molecules*. 2022. Vol. 27. P. 4239. <https://doi.org/10.3390/molecules27134239>
13. Srikaeo K. Biotechnological tools in the production of functional cereal-based beverages. *Biotechnological Progress and Beverage Consumption*. 2020. Vol. 19: The Science of Beverages. P. 149–193. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816678-9.00005-9>
14. Pasquariello M. S., Mastrobuoni F. D. Agronomic, nutraceutical and molecular variability of feijoa. *Scientia Horticulturae*. 2015. Vol. 191 (6). P. 1–9. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.04.036
15. Калугіна І. М., Поплавська С. О. Дослідження реологічних властивостей десертних мас з фейхоа. *Вісник ЛТЕУ. Технічні науки*. 2025. Вип. 41. С. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2025-41-07>
16. Ferrara L., Montesano D. Nutritional characteristics of Feijoa sellowiana fruit. The iodine content. *Rivista di Scienza dell'Alimentazione*. 2001. Vol. 30. P. 353–356. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IT2002062753>
17. Roderick J. W. Bio-active products from fruit of the feijoa. *Food Chemistry*. 2010. Vol. 121 (4). P. 923–926. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.01.047
18. Калугіна І. М. Дослідження структурно-механічних властивостей сорбету з фейхоа. *Продовольчі ресурси*. 2024. № 12 (22). С. 81–91. <https://doi.org/10.31073/foodresources2024-22-09>
19. Калугіна І. М., Дзюба Н. А., Дубіна А. В. Технологія солодких страв із використанням дієтичних добавок для закладів ресторанного господарства. *Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації*. 2023. Том 6, № 1. С. 110–124. DOI: <https://doi.org/10.31866/2616-7468.6.1.2023.278475>
20. Zuoyi Zhu, Xinyue Song, Jiarong Yao, Zhen Li. Structural characteristics, functional properties, antioxidant and hypoglycemic activities of pectins from feijoa (*Acca sellowiana*) peel. *Food Chemistry*. 2023. Vol. 428, 1 December. P. 136819. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136819>
21. ДСТУ 4640:2006. Продукти перероблення субтропічних культур. Листя мирта, зизифуса, маслини та фейхоа. Технічні умови. Київ, 2007. 27 с.
22. Шалимінов О. В., Дяченко Т. П., Кравченко Л. О. та ін. Збірник рецептур національних страв та кулінарних виробів. Для підприємств громад. харчування всіх форм власності. Київ : А.С.К., 2000. 848 с.
23. Anandha Rao M. Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications. Springer-Verlag US, 2007. 482 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-70930-7>
24. Черевко О. І., Маяк В. І. Вплив діаметра частинок і вмісту сухих речовин на реограми пастоподібних концентратів напоїв. *Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування. Економічні проблеми торгівлі : зб. наук. праць. Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2005. Ч. 1. С. 85–91.*



25. Михайлов В. М., Маяк В. І., Смілик М. М. Залежність реологічних властивостей цукатів від розміру твердих часток. *Обладнання та технології харчових виробництв* : зб. наук. праць. Дон. нац. ун-т екон. і торг. ім. М. Туган-Барановського. Донецьк, 2006. Вип. 14. С. 238–243.

26. Бартковський І. І., Поліщук Г. С., Шарахматова Т. Є. та ін. Технологія морозива : навч. посібник. Київ : Фенікс, 2010. 248 с.

27. Черевко О. І., Михайлов В. М., Маяк В. І., Маяк О. А. Реологія в процесах виробництва харчових продуктів : навч. посібник: у 2 ч. Ч. 1. Класифікація та характеристика неньютонівських рідин. Харків : ХДУХТ, 2014. 244 с.

28. Калугіна І. М., Поплавська С. О. Структурно-механічні властивості мусу з фейхоа. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2024. № 1 (19). С. 49–57. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.01.07>

*Стаття надійшла до редакції 10.10.2025*

*Стаття прийнята 01.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*



**I. Kalugina**

**Odesa National University of Technology**

## **IMPROVEMENT OF FEIJOA SORBET TECHNOLOGY FOR RESTAURANT ESTABLISHMENTS**

### *Summary*

The work is devoted to improving the technology of feijoa sorbet for restaurant establishments by studying its structural and mechanical properties. The prospects for using additives from new fruit and berry raw materials in sorbet technology are presented, namely feijoa puree with sugar, which is characterized by a high content of valuable nutrients. The feasibility of studying the structural and mechanical properties of feijoa sorbet for selecting rational cooking modes on modern equipment is shown. To justify the amount of feijoa additive in the recipe and determine the technological parameters of preparing feijoa sorbet at the freezing stage, changes in effective viscosity, the effect of whipping duration on the whipping index and structural strength of sorbet were studied. The improved technology of feijoa sorbet is recommended for implementation in restaurant establishments to expand the range of healthy food desserts with increased nutritional value.

**Keywords:** sorbet, frozen dessert, feijoa, structural and mechanical properties, rheological methods, freezing, quality, restaurant establishments.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-40>

УДК 664.681.2

В. І. Пономаренко, аспірант

ORCID: 0009-0003-0132-1316

О. Ю. Кошель, д. ф., доцент

ORCID: 0000-0002-2184-2106

Сумський національний аграрний університет

e-mail: valerija.ponomarenko26@gmail.com

## ВПЛИВ НАТУРАЛЬНИХ БАРВНИКІВ НА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ

*Анотація.* У роботі досліджено вплив натурального барвника, отриманого з вичавок смородини, на фізико-хімічні властивості бісквітних напівфабрикатів. Метою дослідження було визначення змін активної та титрованої кислотності, а також масової частки вологи залежно від кількості внесення барвника (0–30 %). Установлено, що підвищення дози барвника зумовлює поступове зниження показника рН з 5,8 до 5,4 та збільшення титрованої кислотності з 0,25 % до 0,35 %, що свідчить про надходження органічних кислот із рослинної сировини. Масова частка вологи підвищувалася від 33,5 % до 39,4 % завдяки високій гідрофільності пектинових речовин і харчових волокон. Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей впливу вторинної рослинної сировини – смородинових вичавок – на кислотно-вологісний баланс бісквітних систем. Практична цінність полягає у можливості використання такого барвника як безпечного натурального компонента, що покращує не тільки колір, а й фізико-хімічні показники, сприяючи розвитку екологічно орієнтованих технологій у харчовій промисловості.

*Ключові слова:* орна смородина, вичавки, натуральний барвник, екстракт, антоціани, барвні речовини, бісквітні напівфабрикати, кислотність, вологість.

*Постановка проблеми.* У сучасній харчовій промисловості спостерігається чітка тенденція до відмови від синтетичних барвників на користь натуральних, що зумовлено як регуляторними обмеженнями, так і зростанням вимог споживачів до безпечності продуктів. При цьому важливо не лише зберегти привабливий зовнішній вигляд виробів, а й забезпечити стабільність кольору під час термічної обробки та гарні фізико-хімічні показники. Одним із найбільш перспективних джерел рослинних пігментів є вичавки смородини.

Смородина містить значну кількість антоціанів. Це одна з найцінніших високовітамінних ягід, яка за вмістом вітамінів перевершує більшість інших плодів і ягідних культур. Її унікальний хімічний склад містить широкий спектр макро- та мікроелементів, що позитивно впливають на стан організму, зокрема сприяють підвищенню імунітету та зменшенню проявів стресу й депресії. У ягодах містяться ефірні олії фенольної природи, які характеризуються вираженою антимікробною активністю, а природні барвні речовини володіють протівірусними властивостями, зокрема здатністю пригнічувати вірус грипу [1].

Плоди смородини багаті на мінеральні речовини – солі калію, кальцію, заліза, фосфору, магнію та інші мікроелементи, які перебувають у легкозасвоюваній органічній формі. Серед усіх ягідних культур вона вирізняється високим вмістом калію (понад 370 мг%), а кількість заліза перевищує його вміст у цитрусових, винограді, агрусі, сливах, яблуках, абрикосах та інших плодах [2].

Важливою перевагою є можливість використання вичавок після переробки ягід як вторинної сировини, що відповідає концепції безвідходних технологій і раціонального використання ресурсів [3].



Проте разом із пігментами у виробі надходить певна кількість органічних кислот і фенольних сполук [4], що можуть змінювати активну та титровану кислотність, а також впливати на вологозв'язувальну здатність бісквітних напівфабрикатів.

Це зумовлює необхідність дослідження впливу внесення барвника з вичавок смородини на фізико-хімічні властивості бісквітів.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* У сучасних дослідженнях встановлено, що використання натуральних барвників у виробництві кондитерських виробів впливає не лише на їх зовнішній вигляд, а й на фізико-хімічні показники готової продукції.

Дослідження [5] з використанням екстракту чашечок розели (*Hibiscus sabdariffa*) показало, що додавання рослинного барвника сприяє підвищенню вмісту вологи, білка та аскорбінової кислоти в кексах, що свідчить про покращення їхніх поживних властивостей. При цьому спостерігалось незначне зниження рівня рН, зольності та вмісту ліпідів, що може бути пов'язано з органічною природою барвника та його кислотністю. Наявність антоціанів забезпечила не лише характерне забарвлення, а й антиоксидантну активність продукту, яка зберігалася на рівні понад 60 % після термічної обробки при 180 °С.

Аналогічну тенденцію виявлено в дослідженні [6], присвяченому використанню екстракту кліторії трійчастої (*Clitoria ternatea*) в бісквітах. Додавання КТЕ зумовлювало зростання загального вмісту поліфенолів та антиоксидантної активності, а також зменшення показників перекисного окислення ліпідів, що свідчить про стабілізуючий ефект на жирову фазу виробів. Фізико-хімічні зміни містили підвищення твердості та жувальності, а також зниження когезивності й пружності бісквітів. Крім того, спостерігалось зменшення світлоти, почервоіння та жовтизни, що узгоджується з наявністю природного пігменту антоціанінового типу.

У роботі вчених [7], де часткову заміну пшеничного борошна в печиві здійснювали екстрактами чорниці та журавлини, виявлено достовірне збільшення вмісту вологи й активності води при одночасному зниженні рН ( $p < 0,05$ ). Ці зміни вказують на підвищення гігроскопічності та кислотності виробів, що, своєю чергою, може впливати на термостійкість і текстурні характеристики. Колірні параметри також істотно змінювалися: зменшувалися значення світлоти та жовтизни, а показник почервоіння збільшувався, що свідчить про насиченість червоних відтінків завдяки антоціановим пігментам.

Науковцями [8] встановлено, що давання томатних вичавок до хлібобулочних і кондитерських виробів (зокрема, мафінів) сприяло значному зростанню вмісту харчових волокон, вітаміну С, мінеральних речовин (Na, K, Mg, Ca, Fe) та антиоксидантної активності ( $p < 0,05$ ). Фізико-хімічні показники змінювалися завдяки зниженню світлоти та підвищенню показників почервоіння і жовтизни, що зумовлено наявністю каротиноїдних пігментів томату. Крім того, виробі з додаванням томатних вичавок мали м'якшу текстуру та довший термін придатності завдяки антиоксидантним властивостям природних сполук.

Узагальнюючи результати аналізу, можна відзначити, що використання натуральних барвників рослинного походження не лише забезпечує привабливе забарвлення кондитерських виробів, а й істотно впливає на їх фізико-хімічні властивості – вологість, рН, уміст білка, ліпідів і золи, текстурні характеристики та антиоксидантну активність. Ці зміни мають переважно позитивний характер, сприяючи покращенню харчової цінності та функціональних властивостей готової продукції, що відкриває перспективи для подальшого використання натуральних барвників.

*Формулювання мети (постановка завдання).* Мета роботи полягає у дослідженні впливу натурального барвника з вичавок смородини на фізико-хімічні характеристики бісквітних напівфабрикатів, зокрема активну кислотність (рН), титровану кислотність і масову частку вологи.

Відповідно до цього поставленні такі завдання: випекти дослідні зразки, дослідити та проаналізувати тенденцію зміни фізико-хімічних показників бісквітних напівфабрикатів.



*Основна частина.* Об'єктом дослідження були бісквітні напівфабрикати, виготовлені за рецептурою бісквіту типу Буше, яка висвітлена в попередній статті. У дослідних зразках використовувався один вид харчового барвника в різних концентраціях: 0 % (контроль), 10 %, 20 % та 30 % від маси готового виробу, а саме барвник із вичавок смородини [9].

Використаний барвник, отриманий у формі екстракту з вичавок смородини, характеризується темно-червоним кольором, кислуватим смаком та слабким, характерним для смородини запахом. Цей екстракт має високу концентрацію барвних речовин, що свідчить про значний уміст пігментів, зокрема антоціанів. При 20 °С густина екстракту –  $1000 \pm 2$  кг/м<sup>3</sup>, а вміст сухих речовин дорівнює  $12,4 \pm 0,1$  %. У перерахунку на лимонну кислоту активна кислотність екстракту (рН  $3,2 \pm 0,1$ ) та титрована кислотність ( $0,65 \pm 0,05$  %) підтверджують кисле середовище, яке є необхідним для збереження стабільності барвних речовин. [3].

Визначення фізико-хімічних показників проводили за стандартними методиками:

Активна кислотність ДСТУ 5024:2008.

Титрована кислотність ДСТУ 4957:2008.

Масова частка вологи ДСТУ 4910:2008.

Дослідження проводили в трикратній повторності, результати обробляли статистично.

У таблиці 1 наведені результати фізико-хімічних досліджень бісквітних напівфабрикатів із різними рівнями внесення барвника.

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники виробів

Показник	1 зразок контроль	2 зразок 10%	3 зразок 20%	4 зразок 30%
Активна кислотність	5,8	5,7	5,5	5,4
Титрована кислотність,%	0,25	0,3	0,35	0,35
Масова частка вологи,%	33,5	34,3	38,3	39,4

Аналіз фізико-хімічних показників бісквітних напівфабрикатів свідчить про наявність вираженої залежності між рівнем внесення натурального барвника з вичавок смородини та якісними характеристиками готових виробів.

Для зручності інтерпретації зміни показників були подані графічно (рис. 1–3).

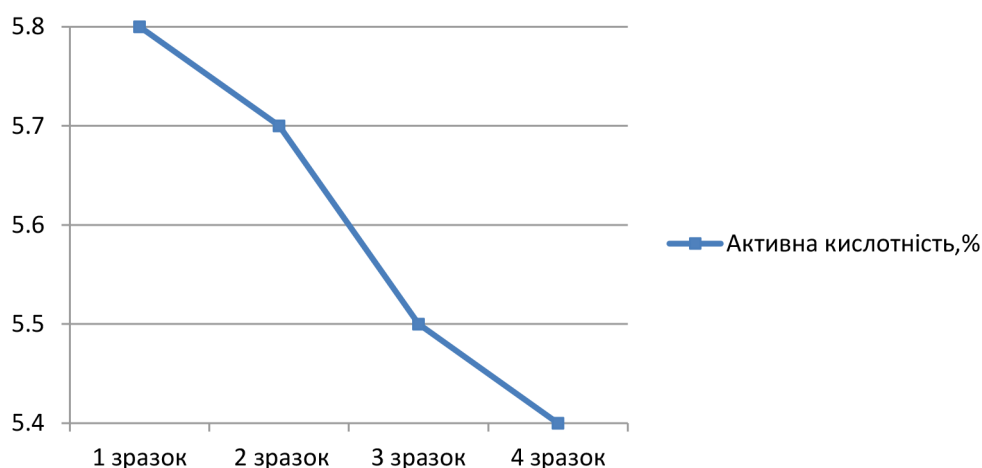


Рис. 1. Зміна в зразках показника активної кислотності, %

Зокрема, встановлено поступове зниження показника активної кислотності (рН) із 5,8 у контрольному зразку до 5,4 у бісквіті з максимальним рівнем внесення барвника – 30 % (рис. 1). Це зумовлено наявністю у складі вичавок смородини органічних кислот, що знижують рН системи [2].

Титрована кислотність зростала від 0,25 % у контрольному зразку до 0,35 % у зразках із внесенням 20–30 % барвника (рис. 2). Отримані результати узгоджуються з тенденцією зниження рН та свідчать про збагачення системи органічними кислотами з вичавок смородини. Відомо, що підвищення титрованої кислотності у випічці може позитивно впливати на мікробіологічну стійкість готових виробів, подовжуючи час зберігання [10].

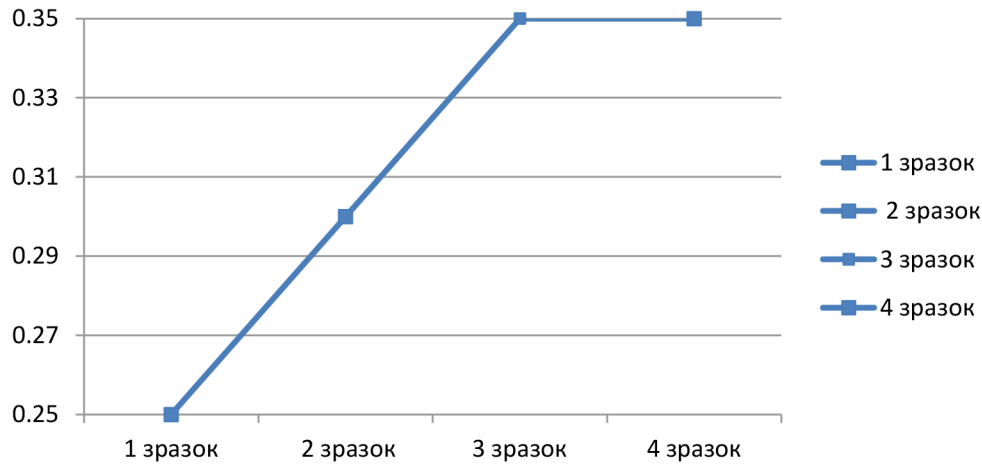


Рис. 2. Зміна у зразках показника титрованої кислотності, %

Щодо масової частки вологи, спостерігається її поступове зростання від 33,5 % у контрольному зразку до 39,4 % при 30 % внесенні барвника (рис. 3). Це пояснюється високою гідрофільністю компонентів рослинної сировини, зокрема пектинових речовин і харчових волокон, здатних зв'язувати значні кількості води.

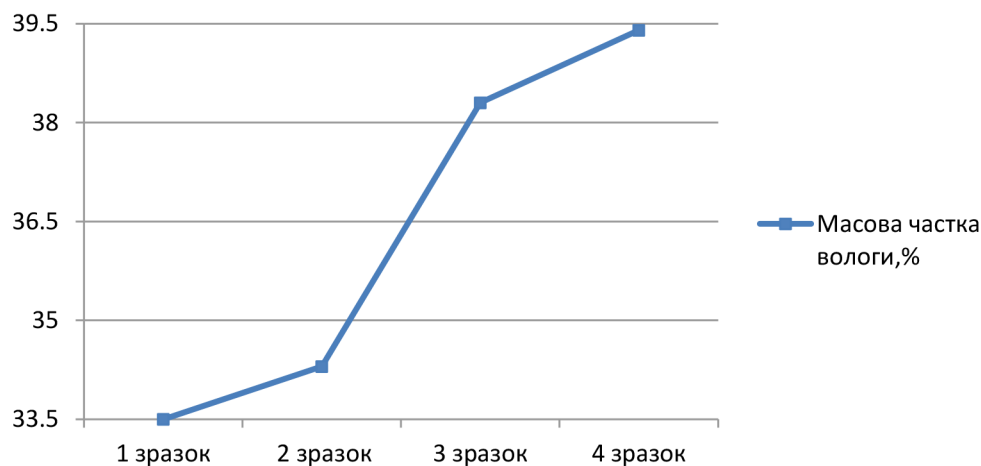


Рис. 3. Зміна у зразках показника масової частки вологи, %

*Висновки.* У результаті проведених досліджень встановлено, що додавання натурального барвника з вичавок смородини позитивно впливає на фізико-хімічні показники бісквітних напівфабрикатів. Із підвищенням рівня внесення барвника від 0 до 30 % спостерігалось поступове зниження активної кислотності з 5,8 до 5,4, що зумовлено наявністю в смородинових



вичавках органічних кислот. Титрована кислотність при цьому збільшувалася з 0,25 % до 0,35 %, що свідчить про збагачення системи природними кислотами, здатними підвищувати стійкість виробів під час зберігання. Масова частка вологи зростала від 33,5 % у контрольному зразку до 39,4 % при максимальному дозуванні барвника, що пояснюється високою вологоутримувальною здатністю пектинових речовин і харчових волокон у складі вичавок.

Так, дослідження підтвердило, що використання натурального барвника з вичавок смородини не лише надає бісквітним напівфабрикатам привабливого забарвлення, а й істотно впливає на їхні фізико-хімічні властивості.

#### *Список використаних джерел*

1. Гомля Л., Брах Ю. Сортове різноманіття та агротехніка вирощування смородини чорної. Біорізноманіття: інноваційна діяльність у системі екології й освіти : матеріали Всеукр. науково-практ. конф., м. Крива Руда, 3–4 черв. 2021 р. 2021. С. 35–38.
2. Касіячук В. Д. Нові технології виробництва продукції оздоровчого і лікувально-профілактичного призначення. Концептуальні проблеми розвитку сучасної гуманітарної науки та прикладної науки : матеріали V Всеукр. науково-практ. симп., м. Івано-Франківськ, 14 трав. 2021 р. 2021. С. 108–112.
3. Кошель О. Ю., Євчук Я. В. Перспективи використання вичавок смородини чорної для отримання натуральних барвників. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*. 2025. № 2. С. 26–30. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.2.4>.
4. Використання різних видів смородини в якості складової структуроутворювачів / Г. П. Хомич та ін. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024. Т. 32, № 2. С. 320–332. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i2.302520> (дата звернення: 19.10.2025).
5. Abdel-Moemin A. R. Effect of Roselle calyces extract on the chemical and sensory properties of functional cupcakes. *Food Science and Human Wellness*. 2016. Т. 5, № 4. С. 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2016.07.003>
6. Physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of sponge cakes fortified with *Clitoria ternatea* extract / P. Pasukamonset та ін. *Journal of Food Science and Technology*. 2018. Т. 55, № 8. С. 2881–2889. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3204-0>
7. Salihu S., Gashi N., Hasani E. Effect of Plant Extracts Addition on the Physico-Chemical and Sensory Properties of Biscuits. *Applied Sciences*. 2023. Т. 13, № 17. С. 9674. <https://doi.org/10.3390/app13179674>
8. Tomato processing byproduct valorization in bread and muffin: improvement in physicochemical properties and shelf life stability / D. Mehta та ін. *Journal of Food Science and Technology*. 2018. Т. 55, № 7. С. 2560–2568. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3176-0>
9. Кошель О. Ю., Пономаренко В. І. Використання натуральних барвників у кондитерських виробках. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 341–347. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.3.36>
10. Efficacy of weak acid preservatives on spoilage fungi of bakery products / С. В. Моро та ін. *International Journal of Food Microbiology*. 2022. С. 109723. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109723>

*Стаття надійшла до редакції 18.10.2025*

*Стаття прийнята 05.11.2025*

*Статтю опубліковано 22.12.2025*





**V. Ponomarenko, O. Koshel**  
**Sumy National Agrarian University**

**THE IMPACT OF NATURAL COLORANTS ON PHYSICAL  
AND CHEMICAL PROPERTIES OF CONFECTIONERY PRODUCTS**

*Summary*

The study investigates the effect of a natural colorant obtained from blackcurrant pomace on the physicochemical properties of sponge cake semi-finished products. The aim of the research was to determine the changes in active and titratable acidity, as well as moisture content, depending on the level of colorant addition (0–30%). It was found that increasing the colorant dosage led to a gradual decrease in pH from 5.8 to 5.4 and an increase in titratable acidity from 0.25% to 0.35%, which indicates the presence of organic acids derived from plant raw materials. The moisture content rose from 33.5% to 39.4% due to the high hydrophilicity of pectic substances and dietary fibers. The scientific novelty of the work lies in establishing the regularities of the influence of secondary plant raw materials – blackcurrant pomace – on the acid–moisture balance of sponge systems. The practical significance consists in the possibility of using such a colorant as a safe natural component that improves not only the color but also the physicochemical parameters, promoting the development of environmentally friendly technologies in the food industry.

**Keywords:** black currant, pomace, natural dye, extract, anthocyanins, coloring substances, biscuit semi-finished products, acidity, humidity.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-41>

УДК 635.3/635.5

О. П. Прісс, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6395-4202

О. І. Яковер, здобувач

ORCID: 0009-0008-5588-7346

Т. І. Колісниченко, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0560-9520

П. О. Булгаков, доктор філософії

ORCID: 0009-0002-9011-8151

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: olesia.priss@tsatu.edu.ua

## ЗМІНИ ВМІСТУ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ СПОЛУК БЕБІ-ШПИНАТУ ПІД ЧАС ЗБЕРІГАННЯ

*Анотація.* Досліджено зміни вмісту біологічно активних сполук бебі-шпинату (*Spinacia oleracea* L.) під час зберігання в живильному середовищі на основі хітозану та рутину порівняно з контролем. Зберігали сорти шпинату Траверс, Такома, Трейлбос за температури  $7 \pm 0,5$  °C та відносної вологості повітря вологості  $95 \pm 3$  %. Оцінювали сухі речовини, аскорбінову кислоту, суму хлорофілів ( $a + b$ ) та фенольних сполук. Установлено, що застосування живильного середовища істотно сповільнює деградацію компонентів: через 6 діб втрати фенолів скоротилися щонайменше вдвічі, хлорофілів у 2–6 разів менші, а збереження вітаміну С було на 20–30 % вищим. Після 12 діб зберігання збережено 65–80 % початкового рівня хлорофілів та понад 80 % аскорбінової кислоти (залежно від сорту). Запропонований підхід подовжує період свіжості бебі-шпинату та підтримує його біохімічний склад.

*Ключові слова:* бебі-шпинат, хітозан, рутин, фенольні сполуки, хлорофіли, аскорбінова кислота, зберігання, біополімери, антиоксиданти.

*Постановка проблеми.* Шпинат (*Spinacia oleracea* L.) є важливою листовою овочевою культурою, яка містить високі концентрації корисних фітохімічних речовин [1]. Шпинат є низькокалорійним і багатий такими незамінними мікронутрієнтами, як вітамін А, вітамін С [2], мінерали (зокрема, залізо, магній, калій, цинк, кальцій, фосфор) [3], поліфенольні сполуки [4]. Уміст поліфенолів у шпинаті сприяє його ефективним антиоксидантним та антимікробним властивостям [3]. Шпинат посідає третє місце за загальною антиоксидантною здатністю серед поширених овочів, поступаючись лише часнику (*Allium sativum*) та капусті кейл (*Brassica oleracea*) [1]. Проте шпинат дуже швидкопсувний продукт і погано зберігається, листя піддається механічним пошкодженням та мікробіологічному псуванню, особливо під час післязбиральної обробки та зберігання. Термін зберігання шпинату зазвичай становить менше 14 днів після збору й залежить від температури [4; 5]. Крім того, внаслідок фізичних пошкоджень, несприятливих умов навколишнього середовища, мікробних патогенів та фізіологічних стресів відбувається швидка втрата якості та вмісту поживних речовин [5]. Тож пошук технологій і способів зберігання направлених на подовження термінів зберігання шпинату при стабілізації вмісту біологічно активних речовин є актуальним.

*Аналіз останніх досліджень.* Загалом, сьогодні дослідники сходяться на думці, що ключову роль у подовженні термінів зберігання відіграють оптимальні режими температури й вологості зберігання. Зниження температури дає змогу продовжити терміни зберігання. Ці висновки узгоджуються з дослідженнями шпинату та іншої листової зелені, які показують, що зберігання в холоді зберігає колір, уміст хлорофілу та поживну цінність, уповільнюючи метаболічні та окислювальні процеси. Мінімальна обробка в поєднанні з належним контролем темпера-



тури покращує збереження вітамінів та біоактивних сполук [6]. Свіжий шпинат, як мінімально оброблений, так і комерційно упакований, слід зберігати при температурі настільки низькій, наскільки це можливо, щоб мінімізувати втрати вітамінів [5]. Особливою популярністю серед споживачів сьогодні користується шпинат, вирощений за технологією baby leaf (бебі-шпинат). Це шпинат, зібраний на ранній стадії росту. Для шпинату, зібраного на ранній стадії (28 днів після посіву), рекомендується зберігання при 4 °C протягом не більш ніж 6 днів для досягнення високого вмісту фітохімічних речовин та мінералів. За 10 °C термін зберігання мінімально обробленого шпинату (за візуальною якістю) скорочується до 3 днів [6]. Низький температурний режим (зокрема, 4 °C) хоч і є критично важливим, але не гарантує максимального продовження термінів зберігання та збереження якості. Шпинат є продуктом, що швидко псується, має високу інтенсивність дихання та схильність до швидкої втрати якості, поживних речовин і розвитку мікроорганізмів, навіть за умов охолодження [1]. Модифікована атмосфера є одним із часто пропонувананих доповнень до холодильного зберігання, оскільки шпинат має відносно високу швидкість втрати води та дихання. Модифікована атмосфера, як правило, у поєднанні з низькою температурою, може значно подовжити термін придатності шпинату [4]. З іншого боку, при зниженні вмісту кисню й підвищенні CO<sub>2</sub> в упаковці може створюватись атмосфера, сприятлива для окремих патогенів. Для зелені, яка має велику поверхню випаровування й високу метаболічну активність, це особливо важливо [7]. Крім того, матеріали упаковки, контролювання газового складу, додаткове технологічне обладнання – усе це підвищує витрати [8]. Для збереження якості мінімально обробленого шпинату запропоновано також зберігати в пакуванні з поліпропілену: зберігання при 4 °C у такому пакуванні визнано найефективнішим методом для збереження якості мінімально обробленого шпинату. Зокрема, таке пакування підтримало найвищий уміст хлорофілу а та хлорофілу b, загального хлорофілу, суми каротиноїдів, антиоксидантної здатності та загального вмісту фенолів [6]. Однак використання полімерних пакувань завдає відчутної шкоди довкіллю та становить значну екологічну проблему [9], а обмеження щодо їх використання посилюються щороку.

Використання додаткових обробок, як-от покриття або попередня обробка, може підвищити стійкість шпинату до погіршення якості. Передзбиральна обробка шпинату екстрактом бурих водоростей може покращити якість під час зберігання шляхом зменшення втрати маси, покращення візуальної якості та тургору листя [1]. Нові біокомпозитні покриття, наприклад, на основі серицину та вуглецевих квантових точок, також є перспективним методом. Таке покриття успішно затримувало ріст колоній мікроорганізмів, зберігало аромат шпинату, знижувало втрату ваги та концентрацію малонового діальдегіду (МДА) [2], який є показником окислювального стресу. Погіршення якості, зокрема старіння листя, часто пов'язують саме з окислювальним стресом, який прискорює деградацію пігментів та розпад мембран. Тому одним із сучасних напрямів є застосування в складі покриттів антиоксидантів. Мелатонін, який є потужним ендогенним поглиначем вільних радикалів, ефективно подовжує термін зберігання шпинату та покращує його якість при 4 °C. Обробка шпинату мелатоніном у дозі 0,20 мг/мл затримувала деградацію хлорофілу, зберігала високий уміст розчинного цукру та розчинного білка, знижувала накопичення МДА [10]. Установлено, що застосування антиоксидантних речовин під час зберігання зелені петрушки в живильному середовищі сприяє стабілізації зеленого забарвлення та уповільненню деградації хлорофілу. Використання розчинів антиоксидантів (зокрема, хлорофіліпту та іонолу) дає змогу зменшити інтенсивність окислювальних процесів, зберегти візуальну привабливість, свіжість і біохімічну активність листків упродовж тривалішого періоду [11]. Живильне середовище на основі аграрного гідрогелю та антиоксидантів показує високу ефективність для продовження терміну зберігання, збереженості пігментного комплексу й вмісту аскорбінової кислоти при зберіганні бебі-шпинату [12]. Проте



основний компонент більшості аграрних гідрогелів поліакрилат натрію (Na-РАА). Його біодеградація – складний і актуальний аспект, оскільки від цього залежить екологічна безпечність таких матеріалів. Водночас природний біополімер хітозан з успіхом застосовують для створення біодеградабельних покриттів для зберігання спаржі [13]. Концентрування хітозанових розчинів дає змогу створювати гелеві структури [14] та може використовуватись як екологічна і безпечна основа живильного середовища для зберігання зеленних культур.

Отже, сучасні дослідження повинні бути спрямовані на використання саме природних антиоксидантів і полімерів, які уповільнюють окислення, старіння листя та розвиток мікроорганізмів, забезпечуючи довше збереження біологічно активних сполук шпинату.

*Формулювання мети статті.* Мета роботи – вивчити зміни вмісту поліфенолів, хлорофілів та аскорбінової кислоти під час зберігання бебі-шпинату в живильному середовищі на основі природного біополімеру хітозану й антиоксиданту рутину.

*Матеріали і методика досліджень.* У роботі використовували сорти шпинату городнього (*Spinacia oleracea* L.) Траверс і Такома (напівсавойський тип) та Трейлбос (гладкий тип) селекції компанії Enza Zaden (Нідерланди). Вирощування рослин здійснювали в умовах неопалюваних плівкових теплиць відповідно до положень методичних рекомендацій з експериментальної справи в овочівництві та баштанництві [15].

Для зберігання відбирали листки довжиною не більш ніж 10 см, що відповідали вимогам Стандарту ЄЕК ООН FFV-58 щодо реалізації та контролю якості листових овочів. Свіже листя формували в пучки масою по 50 г, після чого розміщували в пластикових ящиках. У кожен ящик установлювали лоток із живильним розчином, приготовленим на основі хітозану (Х) та природного антиоксиданту рутину (Р). Технологія приготування розчину хітозану з рутином описана в наших попередніх дослідженнях раніше [13]. Для отримання гелеподібної структури використовували концентрацію хітозану 3 %. Стеблові частини шпинату занурювали в отриманий гель на глибину близько 1 см.

Зберігання шпинату здійснювали за температури  $7 \pm 0,5$  °С і відносної вологості  $95 \pm 3$  %. Контрольним варіантом слугував шпинат, що зберігався за тих самих умов без живильного середовища. Уміст сухих речовин визначали термогравіметричним методом, аскорбінової кислоти (АК) – за реакцією з реактивом Тільманса [16]. Уміст хлорофілів і каротиноїдів визначали шляхом екстрагування пігментів ацетоном із подальшим спектрофотометричним аналізом оптичної густини [16]. Суму поліфенольних сполук за реакцією з реактивом Фоліна – Деніса з наступним визначенням оптичної густини спектрофотометрично [16]. Кожне біохімічне визначення виконували в триразовій повторності.

*Зміни вмісту сухих речовин.* Під час зберігання вміст сухих речовин закономірно зменшується в усіх варіантах – як у контролі, так і при зберіганні в живильному середовищі Х + Р (рис. 1).

Це типова закономірність для зеленних культур, пов'язана з диханням і витратою запасних речовин. Усі контрольні варіанти втрачали товарний вигляд після 6 діб зберігання, втрати маси від в'янення та загнивання перевищували допустимі значення. Сорт Траверс мав найвищий уміст сухих речовин на початку – близько 10,5 %, і навіть після 12 діб у живильному середовищі Х + Р зберігав порівняно високий рівень (~9 %). Це свідчить про високу стабільність біохімічного складу під час зберігання. Сорт Такома характеризувався найнижчими показниками на всіх етапах – близько 9 % до зберігання, далі до ~8 % у контролі та ~8,5 % у досліді, а на 12 добу зберігання лише 7,6 %. Імовірно, сортова специфіка пов'язана з меншою щільністю тканин та інтенсивнішим респіраторним метаболізмом. Шпинат Трейлбос посідав проміжне положення – стартові значення близько 10 %, після 12 діб залишалося ~8,5 %. Порівняно з контролем у варіанті з використанням живильного середовища Х + Р зниження сухих речовин відбувалося повільніше, що видно після 6 діб. Достовірність відмінностей підтверджена

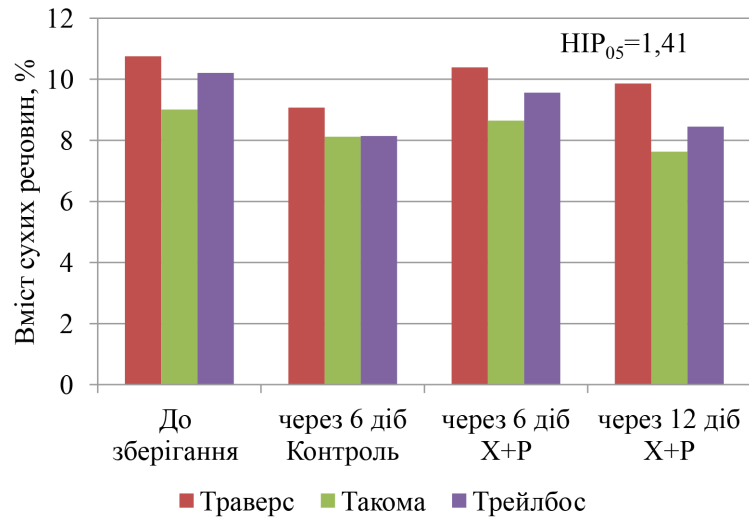


Рис. 1. Сухі речовини під час зберігання бебі-шпинату

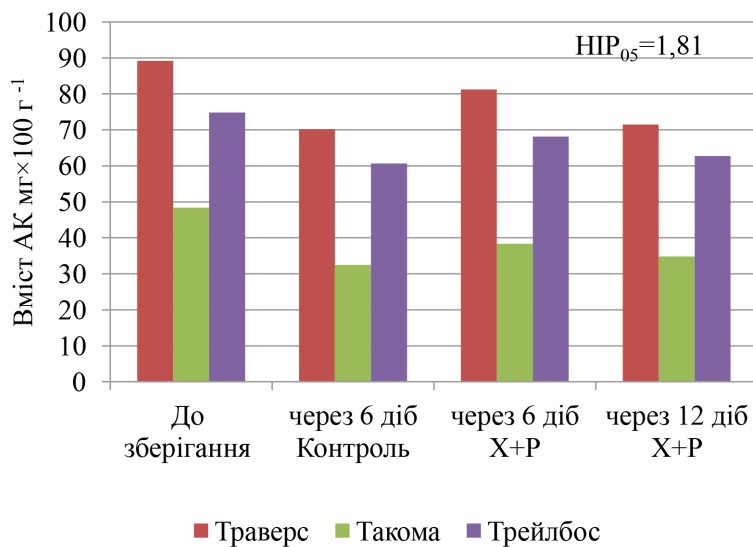


Рис. 2. Вміст аскорбінової кислоти під час зберігання бебі-шпинату

( $NIP_{05} = 1,41$ ). Це може бути свідченням того, що використання живильного середовища Х + Р дає змогу зменшити транспіраційні втрати. У підсумку, застосування дослідного методу зберігання дало змогу сповільнити деградацію сухих речовин.

*Зміни вмісту аскорбінової кислоти.* Під час зберігання вміст аскорбінової кислоти закономірно зменшується в усіх варіантах, що пов'язано з окисненням вітаміну С, яке інтенсифікується внаслідок дихання та ферментативних процесів (рис. 2).

Проте ступінь зниження залежить від сорту та умов зберігання. У сорту Траверс найвищий серед досліджених початковий вміст АК (близько 89 мг/100 г). Через 6 діб у контрольному варіанті він знижується на 16 %. При зберіганні в середовищі Х + Р – збережено 85 мг/100 г, тобто втрати лише близько 5 %. Через 12 діб у середовищі Х + Р збережено понад 80 % початкового рівня. Початковий вміст АК у шпинаті Такома дещо вище – 48 мг/100 г. У контрольному варіанті через 6 діб втрати сягають 20 %. У дослідному варіанті на цей же час втрати АК не перевищували 10 %. Після 12 діб тенденція збереження на рівні 34 мг/100 г. Трейлбос початково містив близько 74 мг/100 г. Через 6 діб зберігання в контролі спостерігалось зниження вмісту АК на 17 %. У середовищі Х + Р втрати не перевищували 10 %. Через 12 діб у дослідному варіанті вміст АК сягав 62 мг/100 г.

У процесі зберігання вітамін С у шпинаті знижується в усіх сортів, але живильне середовище з хітозаном і рутином помітно зменшило деградацію АК. Це пов'язано з тим, що рутин у поєднанні з аскорбіновою кислотою проявляє синергічний антиоксидантний ефект і може захищати вітамін С від окиснення [17]. Крім того, у харчових матрицях хітозанові антиоксидантні плівки / покриття зменшують окиснювальні втрати. Показано й краще збереження ендогенної аскорбінової кислоти при включенні АК в хітозанове покриття [18]. Водночас ефект залежить від матриці та умов. Є публікації про можливу антагоністику АК та рутину в препараті «аскорутин» [19], тому добір концентрацій важливий.

*Зміни вмісту хлорофілів.* Уміст хлорофілів – показник, який прямо відображає фізіологічний стан листя, інтенсивність старіння та загальну якість зелені. На рисунку 3 показано зміну суми хлорофілів (a + b) у бебі-шпинаті за різних способів зберігання. Початково всі сорти шпинату мають відносно високі значення: Траверс близько 37 мг/100 г, Такома – 26 мг/100 г, Трейлбос – 22 мг/100 г. У всіх сортів спостерігається зменшення вмісту хлорофілів під час зберігання. Втрати в контрольних зразках сягають 16–32 % уже через 6 діб, що відповідає активним процесам старіння та окиснення пігментів. Вплив способу зберігання зі застосуванням живильного середовища X + P достовірно ( $HP_{05} = 2,16$ ) зменшує деградацію хлорофілів.

Через 6 діб втрати зменшені у 2–6 разів порівняно з контролем. Навіть через 12 діб зберігання в живильному середовищі X + P дає змогу зберегти близько 65–80 % початкового рівня хлорофілів. Сорт Траверс має найвищий вихідний рівень пігментів, проте середній темп деградації. Шпинат Такома проявляє найкращу стабільність у покритті X + P (втрати лише 4 % за 6 діб). Найбільш чутливий до зберігання сорт Трейлбос: 36 % після 12 діб. Отримані тенденції цілком узгоджуються з науковими даними, а механізм впливу середовища зберігання виявляється в такому. Хітозан має антибактеріальний ефект, знижує транспірацію вологи, що

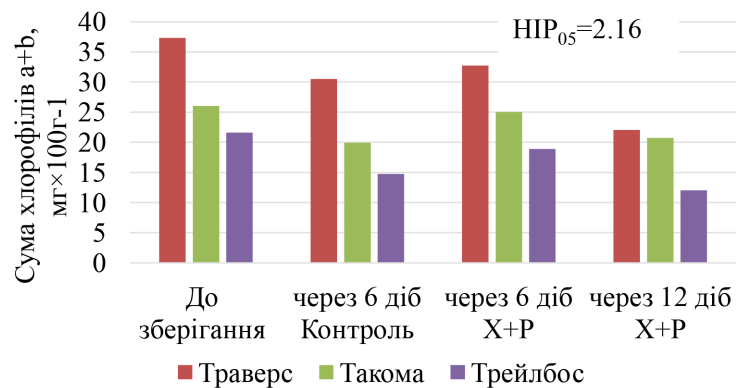


Рис. 3. Сума хлорофілів (a + b) під час зберігання бебі-шпинату

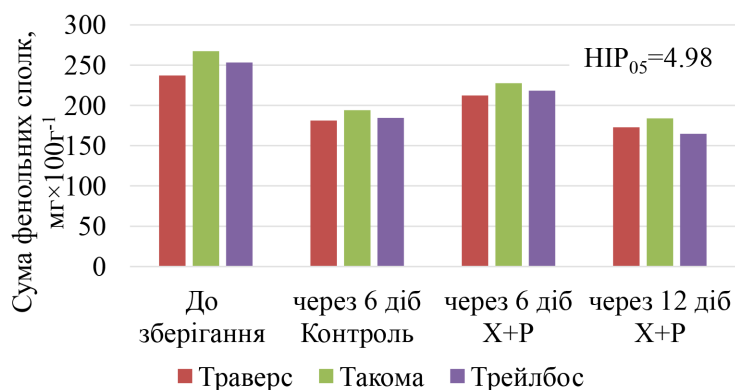


Рис. 4. Сума фенольних сполук під час зберігання бебі-шпинату



зменшує окисне руйнування хлорофілів [20]. Рутин як природний флавоноїд є антиоксидантом, зв'язує активні форми кисню, пригнічуючи ферменти Mg-дехелатазу й хлорофілазу [21]. Комбінація хітозану та природних флавоноїдів забезпечує антиоксидантно-бар'єрний ефект й уповільнення пожовтіння листків [22].

Зміни вмісту фенольних сполук. За нашими даними, уміст фенольних сполук у шпинаті знижується (рис. 4).

Для шпинату зменшення вмісту фенольних сполук під час зберігання вважають закономірним [23]. У контрольних зразках через 6 діб спостерігається значна втрата фенольних сполук (25–44 %). У групах з використанням живильного середовища X + P втрати через 6 діб суттєво менші – 12–15 %, залежно від сортових особливостей. Надалі втрати зростають, але все ще є нижчими або зіставними з втратами в контролі через 6 діб. Сортowa специфіка зберігається. Найчутливіший сорт Трейлбос (велика початкова втрата в контролі), а найбільш стабільний – Такома з використанням живильного середовища X + P. Сортowi відмінності пов'язані з вихідним пулом фенолів, а також, можливо, зі структурою листка, швидкістю дихання чи чутливістю до стресу. Зниження фенольних сполук може бути зумовлене окисно-ферментативними процесами втратами в метаболічних процесах або кращою мобілізацією фенолів у захисних процесах. Живильне середовище X + P, імовірно, уповільнює метаболічні процеси: хітозан зменшує проникнення O<sub>2</sub>, рутин діє як антиоксидант – тому фенольні сполуки споживаються повільніше.

*Висновки.* У результаті проведених досліджень встановлено, що зберігання бебі-шпинату в живильному середовищі на основі природного біополімеру хітозану (X) в поєднанні з природним антиоксидантом рутином (P) позитивно впливає на збереження його біохімічного складу та сповільнює процеси старіння листя.

Втрати сухих речовин під час зберігання у варіанті із живильним середовищем X + P були нижчими порівняно з контролем. Сорт Траверс виявився найбільш стійким до деградації сухих речовин, зберігаючи понад 85 % початкового рівня після 12 діб зберігання.

Уміст аскорбінової кислоти закономірно знижувався в усіх сортах, проте швидкість її деградації у варіанті зберігання бебі-шпинату в живильному середовищі X + P була у 2–3 рази нижчою, ніж у контролі. Найвищу стабільність спостережено в сорту Траверс, де через 12 діб у середовищі X+P збережено понад 80 % початкової кількості АК. Це підтверджує синергічну антиоксидантну дію рутину та вітаміну С.

Сума хлорофілів (a + b) зменшувалася під час зберігання, проте застосування живильного середовища з хітозаном і рутином достовірно сповільнило деградацію пігментів. Сорти Такома та Траверс продемонстрували найкращу збереженість зеленого кольору листя.

Уміст фенольних сполук знижувався під час зберігання в усіх варіантах, однак у середовищі X + P втрати становили лише 12–15 % через 6 діб, тоді як у контрольних зразках – 25–44 %. Це свідчить про збереження антиоксидантного потенціалу завдяки антиоксидантно-бар'єрним властивостям живильного середовища

Комплексна дія хітозану та рутину проявилася в зменшенні швидкості деградації біохімічних компонентів, що забезпечило подовження періоду свіжості шпинату до 12 діб при збереженні високої біологічної цінності. Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні складу біополімерних живильних середовищ з використанням природних флавоноїдів різної природи та дослідженні їх впливу на ферментативну активність й окисно-відновні процеси під час зберігання зелених культур.



## Список використаних джерел

1. Fan D., Kandasamy S., Hodges D. M., Critchley A. T., & Prithiviraj B. Pre-harvest treatment of spinach with *Ascophyllum nodosum* extract improves post-harvest storage and quality. *Scientia Horticulturae*. 2014. 170. P. 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.038>
2. Zhu S., Jin L., Zhang Y., Chen F., Farouk A., Yang T., Yi G., Li H., Ban Z. J., & Liu L. Enhancing fresh-cut spinach preservation with carbon quantum dot-based composite coatings. *Scientific Reports*. 2025. 15(1). P. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07882-x>
3. Huda-Faujan N., Zubairi S. I., & Baker A. A. A. Nutritional and bioactive constituents of antioxidant and antimicrobial properties in *Spinacia oleracea*: A review. *Sains Malaysiana*. 2023. 52(9). P. 2571–2585. <https://doi.org/10.17576/JSM-2023-5209-08>
4. Garrido Y., Tudela J. A., Hernández J. A., & Gil M. I. Modified atmosphere generated during storage under light conditions is the main factor responsible for the quality changes of baby spinach. *Postharvest Biology and Technology*. 2016. 114. P. 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.001>
5. Pandrangi S., LaBorde L. F. Retention of folate, carotenoids, and other quality characteristics in commercially packaged fresh spinach. *Journal of Food Science*. 2004. 69(9). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09919.x>
6. Akan S. Effects of storage temperature and packaging on physiological and nutritional quality preservation of minimally processed spinach. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2022. 24(3). P. 679–691.
7. Caleb O. J., Mahajan P. V., Al-Said F. A.-J., & Opara U. L. Modified atmosphere packaging technology of fresh and fresh-cut produce and the microbial consequences – a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2013. 6(2). P. 303–329. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0932-4>
8. Czerwiński K., Rydzkowski T., Wróblewska-Krepsztul J., & Thakur V. K. Towards impact of modified atmosphere packaging (MAP) on shelf-life of polymer-film-packed food products: challenges and sustainable developments. *Coatings*. 2021. 11(12). <https://doi.org/10.3390/coatings11121504>
9. Ncube L. K., Ude A. U., Ogunmuyiwa E. N., Zulkifli R., & Beas I. N. Environmental impact of food packaging materials: a review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid-based materials. *Materials (Basel)*. 2020. 13(21). <https://doi.org/10.3390/ma13214994>
10. Wang M., Xu J., Ding Z., & Xie J. Prolong the postharvest shelf life of spinach through the antioxidative ability of melatonin. *Food Chemistry: X*. 2023. 19. 100769. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100769>
11. Priss O. P., & Kulik A. S. Color stabilization of green vegetables at storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 4(10(70)). P. 53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26231>
12. Прісс О. П., Улянич О. І., Шевчук К. М., Яковенко О. І., & Ваховська А. В. Зберігання зелені шпинату городнього з використанням живильного середовища. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. 2023. 103(1). С. 7–17. <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-7-17>
13. Priss O., Hutsol T., Glowacki S., Bulhakov P., Bakhlukova K., Osokina N., Nurek T., Horetska I., & Mykhailova L. Effect of asparagus chitosan-rutin coating on losses and waste reduction during storage. *Agricultural Engineering*. 2024. 28(1). P. 99–118. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2024-0008>
14. Yang J., Shen M., Luo Y., Wu T., Chen X., Wang Y., & Xie J. Advanced applications of chitosan-based hydrogels: from biosensors to intelligent food packaging system. *Trends in Food Science and Technology*. 2021. 110. P. 822–832. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.032>
15. Бондаренко Г. Л., Яковенко К. І. Методика дослідної справи в овочівництві і баштанництві. Харків : Основа, 2001. 369 с.
16. Сердюк М. Є., Прісс О. П., Гапріндашвілі Н. А., Здоровцева Л. М., Сухаренко О. І., Іванова І. Є. Дослідницький практикум. Частина 1. Методи дослідження плодоовочевої та ягідної продукції. Люкс, 2020. 307 с.
17. Gęgotek A., Jarocka-Karpowicz I., & Skrzydlewska E. Synergistic cytoprotective effects of rutin and ascorbic acid on the proteomic profile of 3D-cultured keratinocytes exposed to UVA or UVB radiation. *Nutrients*. 2019. 11(11). <https://doi.org/10.3390/nu11112672>
18. Wang J., Yuan Y., Liu Y., Li X., & Wu S. Application of chitosan in fruit preservation: a review. *Food Chemistry: X*. 2024. 23. 101589. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101589>
19. Maslov O. Y., Komisarenko M. A., Kolisnyk S. V., & Golik M. Y. Investigation of antioxidant interaction between ascorbic acid and rutin in medicine “Ascorutin.” *Current Issues in Pharmacy and Medicine: Science and Practice*. 2024. 17(1). P. 17–20. <https://doi.org/10.14739/2409-2932.2024.1.295418>

20. Meitha K., Pramesti Y., Signorelli S., & Kriswanto J. A. Postharvest chitosan application maintains the quality of spinach through suppression of bacterial growth and elicitation. *Horticulture, Environment and Biotechnology*. 2022. 63(2). P. 217–227. <https://doi.org/10.1007/s13580-021-00397-0>
21. Lopez-Polo J., Soto A., Zamorano M., Silva-Weiss A., Oyarzun-Ampuero F. A., Brossard N., Fuentes J., & Osorio F. A. Effect of the incorporation of liposomes loaded with rutin on the transport properties of edible film produced with hydroxypropyl methylcellulose: an *in vitro* release study. *LWT*. 2024. 191. 115583. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115583>
22. Feng K., Feng X., Tan W., Zheng Q., Zhong W., Liao C., Liu Y., Li S., & Hu W. Development of a food preservative from sea buckthorn together with chitosan: application in and characterization of fresh-cut lettuce storage. *Frontiers in Microbiology*. 2023. 14. 1080365. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1080365>
23. Manzoor M. F., Waseem M., Javed M. R., Saleem M., Khalil A. A., Althawab S. A., Ahmed I. A. M., & Zeng X.-A. Unlocking spinach polyphenols: novel extraction, impact of processing, value-addition and therapeutic potentials. *Food Reviews International*. 2025. P. 1–38. <https://doi.org/10.1080/87559129.2025.2562437>

Стаття надійшла до редакції 12.10.2025

Стаття прийнята 29.10.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



**O. Priss, O. Yakover, T. Kolisnychenko, P. Bulgakov**  
**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

## **CHANGES IN THE CONTENT OF BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS IN BABY SPINACH DURING STORAGE**

### *Summary*

The study investigates the dynamics of biologically active compounds in baby spinach (*Spinacia oleracea* L.) during postharvest storage in a nutrient medium based on natural chitosan and the flavonoid rutin, compared with conventional storage conditions. The experiment aimed to assess the effect of the chitosan–rutin medium on the preservation of dry matter, ascorbic acid, total chlorophylls (a + b), and phenolic compounds in spinach leaves of three cultivars—Travers, Tacoma, and Trailboss—during refrigerated storage at  $7 \pm 0.5$  °C and  $95 \pm 3$  % relative humidity.

The results demonstrated that all cultivars exhibited a gradual decline in biochemical indicators during storage; however, samples stored in the chitosan–rutin (X + P) medium maintained significantly higher levels of active substances compared to the control. After six days, losses of phenolic compounds in the treated samples were reduced by two to three times (12–15 % vs. 25–44 % in control), and the degradation of chlorophylls decreased 2–6 fold, which effectively delayed leaf yellowing. The retention of ascorbic acid was also substantially improved: vitamin C content remained 20–30 % higher than in the control. After twelve days of storage, spinach maintained 65–80 % of its initial chlorophyll level and more than 80 % of ascorbic acid, depending on the cultivar.

The obtained data confirm that chitosan and rutin act synergistically: chitosan forms a semi-permeable film that reduces transpiration and oxygen permeability, while rutin exhibits pronounced antioxidant properties, neutralizing reactive oxygen species and stabilizing cell membranes. The combination provides both barrier and antioxidant protection, slowing oxidative degradation of pigments and phenolics and extending the shelf life of baby spinach without synthetic preservatives.

The proposed eco-friendly approach is consistent with sustainable food preservation strategies, reducing postharvest losses and maintaining nutritional and sensory quality. The findings support the feasibility of using biodegradable chitosan-flavonoid coatings as an alternative to conventional packaging for leafy vegetables.

**Keywords:** baby spinach, chitosan, rutin, phenolic compounds, chlorophylls, ascorbic acid, postharvest storage, biopolymers, antioxidants, biopolymers.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-42>

УДК 637.12:575.113.2

Т. П. Синенко, док. філ.

ORCID: 0000-0002-5300-5142

Н. В. Болгова, к. с.-г. н., доц.

ORCID: 0000-0002-0201-0769

О. Ю. Кошель, док. філ., доц.

ORCID: 0000-0002-2184-2106

Сумський національний аграрний університет

e-mail: tetiana.synenko@snau.edu.ua

## ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ МОЛОКА-СИРОВИНИ ВІД КОРІВ ІЗ РІЗНИМИ ГЕНОТИПАМИ В–КАЗЕЇНУ

*Анотація.* У статті представлено результати дослідження молока корів української чорно-рябої породи з різними генотипами β-казеїну (A1A1, A1A2, A2A2), які утримуються в Сумському районі. У період 2023–2025 років було здійснено відбір проб. Встановлено, що кислотність (рН 6,51–6,84) і густина (1025–1028 кг/м<sup>3</sup>) молока стабільні, майже не залежать від генотипу β-казеїну. Молоко з генотипом A2A2 має вищий рівень білка (до 3,15 %), жиру (до 5,07 %) і сухих речовин (до 13,25 %), що свідчить про його кращу харчову та технологічну цінність. У молоці A1A1 і A1A2 показники білка та жиру нижчі. Кореляція між генотипом β-казеїну та складом молока слабка: білок ( $r = 0,13$ ), жир ( $r = 0,26$ ), сухі речовини ( $r = 0,17$ ). Кислотність і густина значного впливу не демонструють. Тривимірна модель «білок–жир–генотип» підтвердила кращі показники для A2A2. Результати можуть бути використані в селекції високопродуктивних стад худоби.

*Ключові слова:* молочна сировина, β-казеїн, якісні показники, функціональні показники, технологічні властивості, сталий розвиток, статистичний аналіз, кореляційний аналіз.

*Постановка проблеми.* Коров'яче молоко є одним із ключових компонентів функціонального харчування, а його якість визначається насамперед фізико-хімічними характеристиками, які формують поживну цінність, технологічну придатність та стабільність готової продукції. Значну роль у варіації цих параметрів відіграє білковий комплекс молока, основу якого становлять міцелярні казеїни. Серед них особливе технологічне значення має β-казеїн, частка якого в загальному казеїновому пулі сягає 35–45 %. Поліморфізм β-казеїну (A1, A2 та інші варіанти) зумовлений точковими відмінностями у структурі білка, що впливають на гідрофобність, стабільність міцел, зв'язування кальцію й ферментативну чутливість.

Генетична різноманітність варіантів β-казеїну є важливим чинником, який може визначати як технологічні особливості молока, так і його базові фізико-хімічні властивості. Водночас інформація про склад і якість молока-сировини від корів різних β-казеїнових генотипів у дрібних сільських домогосподарствах України, особливо розташованих поблизу зон бойових дій, залишається обмеженою. В умовах воєнного стану такі домогосподарства відіграють критичну роль у локальному забезпеченні молоком, проте перебувають під впливом стресових факторів, що можуть позначатися на якісних параметрах сировини. Це обумовлює необхідність детального вивчення фізико-хімічних показників молока залежно від генотипу β-казеїну для забезпечення продовольчої безпеки та контролю якості сировини.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Білкову систему коров'ячого молока традиційно описують як комбінацію міцелярних казеїнів (≈80 % загального білка) та сироваткових білків [1]. Серед казеїнових фракцій β-казеїн привертає особливу увагу завдяки ролі у формуванні гелю під час коагуляції, розподілі кальцію, стабільності міцел та структурних властивостях молочної системи. Наразі ідентифіковано щонайменше 13 його



генетичних варіантів [2], проте практичне значення у молочній галузі мають переважно варіанти А1 та А2. Відмінність між ними зумовлена заміною проліну на гістидин у позиції 67, що впливає на третинну структуру білка, гідрофобність та його взаємодію з кальцієм [3].

Численні дослідження підтверджують вплив  $\beta$ -казеїнового поліморфізму на коагуляційні властивості молока. Для молока А1А1 характерний коротший час зсідання та щільніший згусток, тоді як молоко А2А2 утворює м'які, пластичні гелі з підвищеною вологозатримувальною здатністю [4]. У кислотних технологіях відмінності між генотипами менш виражені, оскільки структуру гелю формує переважно кислотна денатурація [5]. Деякі автори вказують і на вплив генотипу  $\beta$ -казеїну на базові фізико-хімічні характеристики молока – вміст білка, жиру, сухих речовин, кислотність і густину [6]. Такі відмінності пов'язують зі зміною структури казеїнових міцел, ступенем гідратації та розподілом кальцію між колоїдною й розчинною фазами.

Окремий блок досліджень присвячено аспектам фізіологічної прийнятності молока залежно від генотипу  $\beta$ -казеїну, зокрема утворенню пептиду  $\beta$ -казоморфіну-7 (ВСМ-7) під час гідролізу варіанта А1 [7, 8]. Хоча низка робіт припускає можливий негативний вплив ВСМ-7 на організм людини, систематичні огляди вказують на недостатність клінічних доказів та необхідність подальших досліджень [9].

Більшість публікацій присвячено аналізу молока з різними  $\beta$ -казеїновими генотипами у великих фермерських господарствах із контрольованими умовами утримання [10, 11]. Натомість питання якісного складу молока-сировини, отриманого в дрібних домогосподарствах, особливо під впливом стресових умов воєнного часу, в науковій літературі висвітлене недостатньо. Це формує потребу у проведенні досліджень, спрямованих на комплексну оцінку фізико-хімічних характеристик молока залежно від генотипу  $\beta$ -казеїну в реальних умовах виробництва.

*Формулювання мети (постановка завдання).* Мета роботи – встановлення впливу генетичних варіацій білка  $\beta$ -казеїну на якісний склад молока та визначення закономірностей його змін у динаміці.

Відповідно до цього поставлені наступні задачі: провести визначення фізико-хімічних показників молока; проаналізувати тенденції зміни показників залежно від генотипу  $\beta$ -казеїну та зробити узагальнені висновки.

*Основна частина.* Для проведення дослідження було відібрано поголів'я великої рогатої худоби української чорно-рябої молочної породи, що утримується в господарстві Сумського району (Україна). Відбір проб молочної сировини здійснювали у 2023–2025 роках, по 10 кг вранішнього молока від дев'яти корів, що мали відмінні генотипи за  $\beta$ -казеїном (А1А1, А1А2 і А2А2). Безпосередньо після доїння зразки привозили до лабораторії університету, відразу охолоджували у холодній воді до температури  $(4 \pm 2) ^\circ\text{C}$  і витримували в холодильній камері  $((4 \pm 2) ^\circ\text{C})$  не довше 6 годин.

Оцінювання якості відібраних зразків молока здійснювали згідно із загальноприйнятими методиками аналізу. Визначення якісних параметрів молока-сировини проводили відповідно до ДСТУ 3662:2018 «Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови».

Визначення густини молока виконували аерометричним способом, керуючись нормативами ДСТУ 6082:2009. Кислотність (рН) у молочній сировині встановлювали потенціометричним методом відповідно до ДСТУ 8550:2015.

Масова частка сухих речовин у досліджуваних зразках оцінювалася шляхом висушування до постійної маси відповідно до ДСТУ 8552:2015. Для визначення масової частки білка застосовували метод К'ельдаля, керуючись стандартами ДСТУ ISO 8968-1:2005. Визначення масової частки жиру проводили кислотним методом (методом Гербера) узгоджено з ДСТУ ISO 2446:2019.



Усі аналітичні дослідження проводили з трикратним повторенням вимірювань. Одержані результати наведені в одиницях міжнародної системи СІ.

Статистичний аналіз результатів здійснювали з використанням програмного забезпечення IBM SPSS Statistics 26.0. Для кожного показника (рН, густина, сухі речовини, білок, жир, співвідношення білок:жир) розраховували середнє значення, медіану, мінімум, максимум, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації. Нормальність розподілу перевіряли за критерієм Шапіро–Уїлка, однорідність дисперсій – за критерієм Левена. Для оцінки взаємозв'язків між генотипом  $\beta$ -казеїну та фізико-хімічними показниками виконували кореляційний аналіз з визначенням коефіцієнтів Пірсона або Спірмена (залежно від типу розподілу). Візуалізацію здійснювали у вигляді діаграм розсіювання, гістограм і двовимірних щільнісних графіків. Для інтегральної оцінки взаємодії «білок – жир – генотип» побудовано тривимірну поверхню за методом Distance Weighted Least Squares, що дало можливість встановити узагальнені закономірності формування білково-жирового профілю. Статистично значущими вважали відмінності при  $p < 0,05$ .

Важливою характеристикою якості молока-сировини є його фізико-хімічний склад, який визначає харчову цінність, технологічні властивості та придатність для переробки. На склад і властивості молока впливають різноманітні фактори – порода тварин, умови годівлі, період лактації, а також генетичні особливості, зокрема варіанти білка  $\beta$ -казеїну. З огляду на це, було проведено дослідження фізико-хімічних показників молока корів різних генотипів  $\beta$ -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2), відібраного щовесни 2023–2025 років. Результати наведені в таблиці 1.

Аналіз кислотності молока показав, що значення рН коливалися у межах 6,51–6,84. Генотипи  $\beta$ -казеїну демонстрували незначні відмінності між собою. Зокрема, молоко корів з генотипом A1A1 мало середнє значення рН близько 6,65–6,71, A1A2 – 6,66–6,77, а A2A2 – 6,66–6,69. Найвищі показники кислотності спостерігалися у зразків A1A2 у 2024–2025 роках, тоді як у A2A2 кислотність залишалася стабільною протягом трьох років. Таким чином, вплив генотипу на кислотність молока виявився незначним, що свідчить про відносну стабільність цього показника незалежно від варіанту  $\beta$ -казеїну.

Густина молока коливалася від 1025 до 1028 кг/м<sup>3</sup>, і суттєвих відмінностей між генотипами не виявлено. У 2023 році у корів з генотипом A2A2 спостерігалася найнижча густина (1025 кг/м<sup>3</sup>), тоді як інші зразки мали значення у межах 1026–1027 кг/м<sup>3</sup>. У 2024–2025 роках показники густини залишалися майже на однаковому рівні для всіх груп. Це свідчить про те, що густина молока менш чутлива до генетичних варіацій  $\beta$ -казеїну, але може дещо коливатися залежно від року та індивідуальних особливостей корів.

Молоко корів A2A2 мало вищу масову частку сухих речовин у динаміці за три роки, що коливалася від 12,24 % до 13,25 %. Для зразків A1A1 та A1A2 значення сухих речовин були трохи нижчими, у межах 12,42–12,99 %. Відзначено тенденцію до зростання сухих речовин у A2A2 у 2025 році, що свідчить про підвищену технологічну цінність цього молока для переробки на сир та інші молочні продукти. У 2024 році всі генотипи мали дещо нижчі показники сухих речовин порівняно з 2023 і 2025 роками.

Білкова складова молока також показала помірний вплив генотипу. Значення масової частки білка коливалися від 2,82 % до 3,15 %. Генотип A2A2 у 2025 році демонстрував вищі показники білка (3,11–3,15 %), тоді як у 2024 році спостерігалася невелике зниження білка у всіх групах. Молоко A1A1 та A1A2 характеризувалося стабільними, але трохи нижчими значеннями білка (2,87–3,03 %). Така тенденція свідчить про перевагу генотипу A2A2 у формуванні молока з підвищеним вмістом білка, що є важливим показником харчової та технологічної цінності продукту.

Жирність молока коливалася у межах 3,05–5,07 %. Генотип A2A2 стабільно демонстрував вищу жирність протягом усіх років спостережень, особливо у 2023 і 2025 роках (4,65–5,07 %).

Таблиця 1

## Фізико-хімічні показники зразків молока-сировини з різним генотипом

Рік	Зразок №*	Генотип $\beta$ -казеїну	Кислотність, од. рН	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Масова частка сухих речовин, %	Масова частка білка, %	Масова частка жиру, %
2023	1	A1A1	6,58	1026	12,54	2,93	4,34
	2		6,55	1027	12,43	2,96	4,02
	3		6,62	1026	12,65	2,85	4,66
	4	A1A2	6,52	1026	12,47	2,95	4,26
	5		6,56	1027	12,42	3,04	3,79
	6		6,51	1027	12,45	2,93	3,97
	7	A2A2	6,64	1026	12,24	2,97	4,66
	8		6,65	1026	12,78	2,89	4,65
	9		6,69	1025	13,08	2,88	5,07
2024	1	A1A1	6,76	1027	12,98	3,03	4,02
	2		6,74	1027	12,69	2,91	3,59
	3		6,72	1028	12,84	2,95	3,05
	4	A1A2	6,77	1028	12,88	2,97	3,27
	5		6,84	1025	12,42	2,82	3,65
	6		6,82	1028	12,88	2,94	3,75
	7	A2A2	6,79	1027	12,83	2,96	3,46
	8		6,77	1025	12,40	2,82	4,10
	9		6,79	1027	12,56	2,86	3,79
2025	1	A1A1	6,61	1025	12,64	2,91	4,86
	2		6,63	1027	12,92	3,00	3,62
	3		6,63	1026	12,65	2,9	3,55
	4	A1A2	6,79	1027	12,99	3,03	4,58
	5		6,66	1026	12,64	2,9	4,27
	6		6,76	1025	12,55	2,87	4,36
	7	A2A2	6,67	1028	13,19	3,11	4,26
	8		6,67	1028	12,99	3,03	3,71
	9		6,66	1025	13,25	3,15	5,07

\* Примітка: номер зразка молока-сировини відповідає ідентифікаційному номеру дослідної корови, від якої систематично здійснювався відбір молока.

Водночас генотипи A1A1 та A1A2 мали дещо нижчі значення, хоча окремі зразки A1A1 у 2025 році досягали 4,86 %. Високий рівень жиру у молоці A2A2 підтверджує його переваги для виготовлення сирів та інших молочних продуктів з підвищеним вмістом жирів.

Аналіз динаміки показників за роками продемонстрував наступні результати. У 2023 році молоко генотипу A2A2 характеризувалося підвищеним вмістом жиру та білка, тоді як рівень кислотності та густина залишалися в межах середніх значень. У 2024 році було зафіксовано незначне зменшення концентрації сухих речовин та білка у молоці всіх досліджуваних генотипів, водночас кислотність мала тенденцію до зростання. У 2025 році спостерігалось підвищення показників сухих речовин, білка та жиру в молоці генотипу A2A2, що додатково підтверджує його високу технологічну цінність.

Загалом результати вказують на стабільну перевагу генотипу A2A2 за рівнем білка, жиру та сухих речовин, що робить його більш перспективним для молокопереробки та створення продуктів із підвищеною харчовою цінністю. Водночас кислотність і густина молока виявилися менш залежними від генотипових особливостей.

Отримані результати фізико-хімічних показників зразків молока-сировини (табл. 1) показують, що варіації  $\beta$ -казеїну суттєво не впливають на кислотність чи густина молока. Середній вміст сухих речовин у зразках молока коливається на рівні  $(12,87 \pm 0,01)$  % для всіх модифі-



кацій генотипів  $\beta$ -казеїну. Однак встановлено, що значення вмісту білка у молоці A2A2 дещо вище (в середньому на 0,1 %) ніж в молоці A1A1 та A1A2. Вміст жиру навпаки в молоці A2A2 нижче ніж A1A2, але вище показник жиру в молоці A1A1.

Отримані результати узгоджуються з висновками науковців [12, 13]. Показано, що генетична варіації  $\beta$ -казеїну не впливає на якісні показники молока-сировини. Натомість, в роботі [14] корови з генотипом A2A2 мають вищий відсоток жиру в молоці, ніж їхні аналоги A1A1 і A1A2.

Розрахунки співвідношення білок:жир показали, що зразки молока з генотипом A1A1 мали вищі значення (в середньому дорівнює 0,73), порівняно із зразками молока з генотипом A1A2 (0,67) і A2A2 (0,71).

Також встановлено, що досліджувані зразки мають типовий склад для свіжого коров'ячого молока та узгоджуються з вимогами ДСТУ 3662:2018.

Для об'єктивної оцінки отриманих результатів застосовано статистичний аналіз з використанням програмного забезпечення SPSS Statistics, який дозволив встановити закономірності варіювання показників та виявити достовірні відмінності між групами. Результати аналізу представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Статистичний аналіз фізико-хімічні показники зразків молока-сировини з різним генотипом (2023–2025 рр.)

Показник	Середнє арифметичне	Медіана	Мінімум	Максимум	Стандартне відхилення (SD)	Коефіцієнт варіації (CV%)
Кислотність, од. рН	6,68	6,67	6,51	6,84	0,09	1,40
Густина, кг/м <sup>3</sup>	1026,48	1027,00	1025,00	1028,00	1,05	0,10
Масова частка сухих речовин, %	12,72	12,65	12,24	13,25	0,26	2,07
Масова частка білка, %	2,95	2,94	2,82	3,15	0,08	2,76
Масова частка жиру, %	4,09	4,02	3,05	5,07	0,54	13,15
Співвідношення білок:жир	0,73	0,74	0,57	0,97	0,10	13,50

На основі проведеного дослідження встановлено, що всі ключові показники молока-сировини знаходяться в межах, характерних для натурального коров'ячого молока високої якості. Водночас рівень варіативності деяких компонентів свідчить про вплив генетичних характеристик тварин.

Рівень кислотності рН ( $6,68 \pm 0,09$ ) підтверджує, що молоко має свіжий стан без ознак скисання; показник зберігає стабільність ( $CV = 1,4\%$ ), що вказує на однорідність зразків за даним параметром.

Густина молока ( $1026,5 \pm 1,05$ ) кг/м<sup>3</sup> демонструє надзвичайно низький коефіцієнт варіації ( $CV = 0,1\%$ ), що вказує на природну концентрацію компонентів без домішок води.

Масова частка сухих речовин ( $12,72 \pm 0,26\%$ ) перебуває в межах стандартних показників для якісного коров'ячого молока; рівень варіативності невисокий ( $CV = 2,1\%$ ), що підтверджує стабільність складу. Масова частка білка ( $2,95 \pm 0,08$ ) % відповідає типовим нормам (2,8–3,2 %); низький коефіцієнт варіації ( $CV = 2,76\%$ ) свідчить про генетичну сталість білкового компоненту. Масова частка жиру ( $4,09 \pm 0,54$ ) % показує найвищу варіативність ( $CV = 13,15\%$ ), що вказує на значний вплив генотипових особливостей та фізіологічного стану тварин на жирність молока.

Отримані результати демонструють, що молоко-сировина різних генотипів має високу фізико-хімічну якість, стабільний вміст білка і сухого залишку, проте відзначається змінною жирністю. Найбільшу варіабельність виявлено саме у показнику жиру, який є ключовою дифе-

## Закінчення табл. 4

ренційною ознакою між генотипами корів. Таким чином, генетичні особливості тварин суттєво впливають на жирову складову молока, тоді як параметри білка та фізичні характеристики залишаються відносно сталими й відповідають нормам ДСТУ 3662:2018.

Для аналізу отриманих даних було застосовано методи статистичної обробки, зокрема побудову гістограм розподілу для кожного досліджуваного параметра: кислотності, густини, вмісту сухих речовин, білка, жиру та співвідношення білок/жир. Це дозволило провести візуальну оцінку характеру варіації показників, визначити ступінь їхньої однорідності та відповідність нормальному (гаусовому) розподілу.

Побудовані гістограми (рис. 1) відображають закономірності змін фізико-хімічних властивостей молока залежно від генотипу  $\beta$ -казеїну та дають можливість встановити рівень стабільності й природної мінливості показників.

Гістограма розподілу показника рН (рис. 1, а) показує, що розподіл даних має форму, близьку до нормального ( $p > 0,10$ ), що свідчить про природну варіабельність показника в межах допустимих значень. Більшість зразків мають кислотність (рН) у діапазоні 6,6–6,8, що відповідає показникам свіжого молока-сировини. Це свідчить про стабільність якості молока незалежно від генотипу  $\beta$ -казеїну. Відсутність виражених «хвостів» у розподілі вказує на однорідність зразків і стабільні умови зберігання та відбору проб.

За результатами гістограми розподілу густини (рис. 1, б) визначено, що показник має помірну асиметрію ( $p = 0,15$ – $0,20$ ) зі зміщенням моди в бік більших значень. Це може бути зумовлено варіацією складу сухих речовин або різницею у вмісті жиру та білка між генотипами. Загалом густина перебуває в межах 1,026–1,030 г/см<sup>3</sup>, що характерно для натурального молока без розведення.

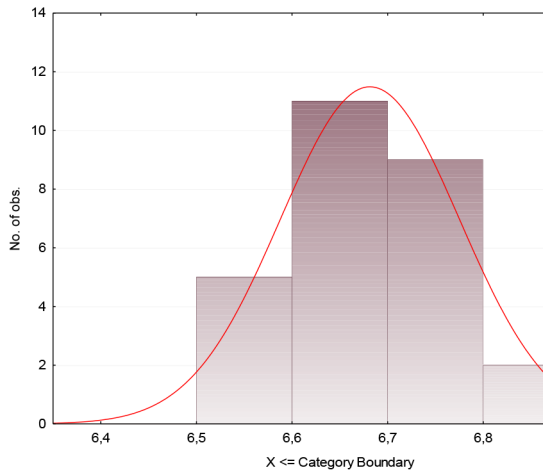
Гістограма вмісту сухих речовин (рис. 1, в) демонструє близький до нормального розподіл ( $p > 0,20$ ). Середні значення знаходяться на рівні 12,6–12,8 %, що є типовим для високоякісної молочної сировини. Незначна варіабельність показує сталість складу молока та відсутність технологічних відхилень у період збору проб.

Розподіл вмісту білка (рис. 1, г) має чітко виражений симетричний пік, що добре узгоджується з нормальною кривою ( $p > 0,25$ ). Середній вміст білка становить 3,0–3,2 %, а коефіцієнт варіації не перевищує 5 %, що свідчить про стабільність білкового складу молока. Це підтверджує вплив генотипу  $\beta$ -казеїну на структуру білкових фракцій: А1А1 характеризується дещо вищим рівнем білка, тоді як А2А2 – більш збалансованим білково-жировим профілем.

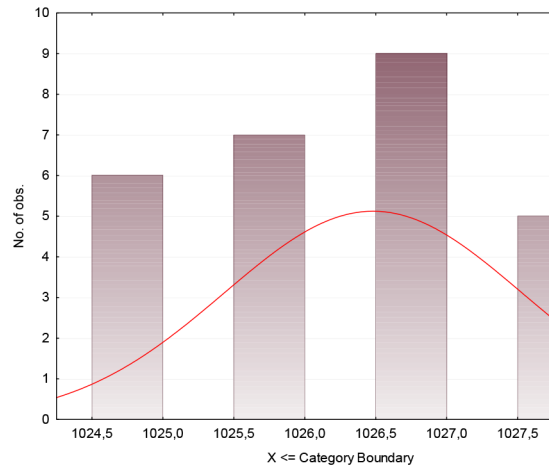
На основі гістограми вмісту жиру (рис. 1, д) встановлено, що розподіл має форму, близьку до нормальної ( $p > 0,20$ ). Більшість значень зосереджені поблизу 4,0 %, що є типовим для коров'ячого молока. Це свідчить про рівномірний розподіл жирності без значних коливань, що підтверджує однорідність молока-сировини та стабільність умов годівлі. Незначні коливання у бік вищих значень можуть бути властиві молоку корів генотипу А2А2.

Розподіл співвідношення «білок/жир» (рис. 1, е) характеризується слабкою правобічною асиметрією ( $p = 0,15$ ), що зумовлено варіацією між генотипами. Середнє співвідношення становить 0,70–0,75, що відповідає збалансованому складу молока. Вищі значення спостерігаються у зразків А1А1, що мають підвищений білковий вміст, тоді як у А2А2 співвідношення менше через більшу жирність. Такий розподіл підтверджує генетично зумовлений вплив  $\beta$ -казеїну на білково-жировий профіль молока.

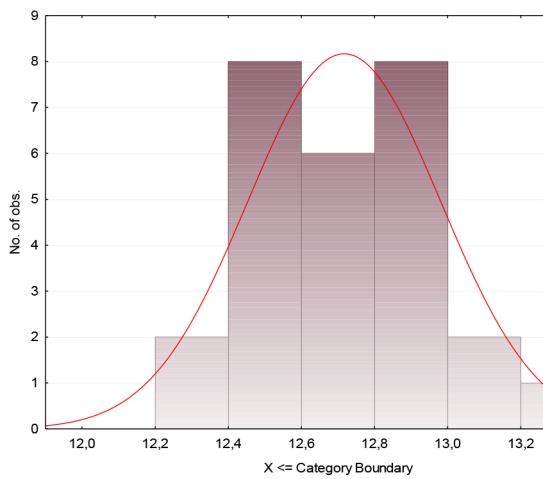
Таким чином, аналіз гістограм показує, що всі основні фізико-хімічні показники молока корів різних генотипів  $\beta$ -казеїну мають близький до нормального розподіл, що свідчить про однорідність вибірки, відсутність екстремальних значень і високу якість дослідженої сировини. Отримані результати підтверджують, що генотип  $\beta$ -казеїну впливає на хімічний склад



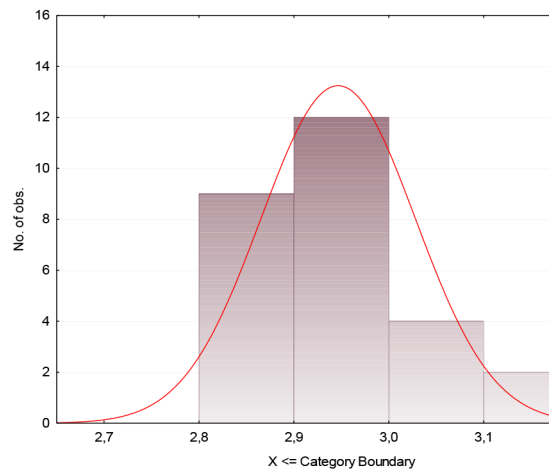
**а**



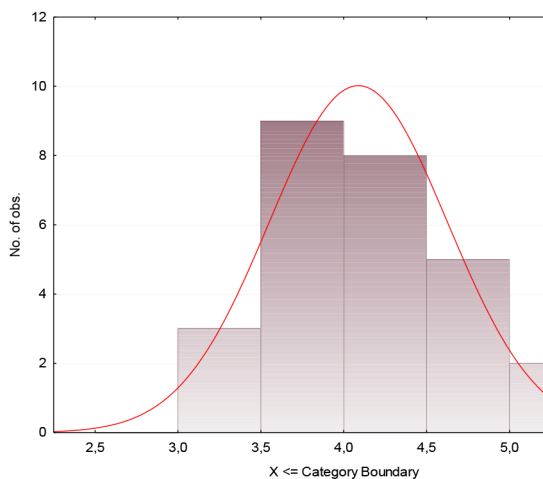
**б**



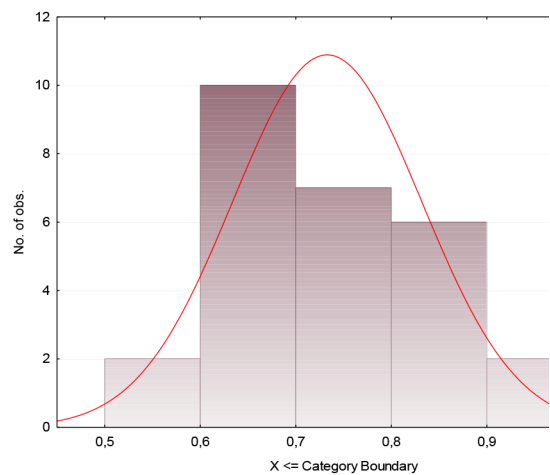
**в**



**г**



**д**



**е**

Рис. 1. Гістограми розподілу:

*а) кислотності; б) густини; в) вміст сухих речовин; г) вмісту білка; д) вмісту жиру; е) співвідношення білок:жир*

молока, зокрема на співвідношення білка та жиру, однак не порушує природного варіаційного закону.

Для більш глибокого аналізу хімічного складу молока-сировини створено тривимірну гістограму (рис. 2), яка відображає взаємозв'язок між рівнем білка (%) та вмістом жиру (%) у зразках молока корів із різними генотипами  $\beta$ -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2). Такий графічний метод дозволяє наочно показати співвідношення ключових компонентів молока і оцінити рівень їхньої варіативності в рамках досліджуваної вибірки.

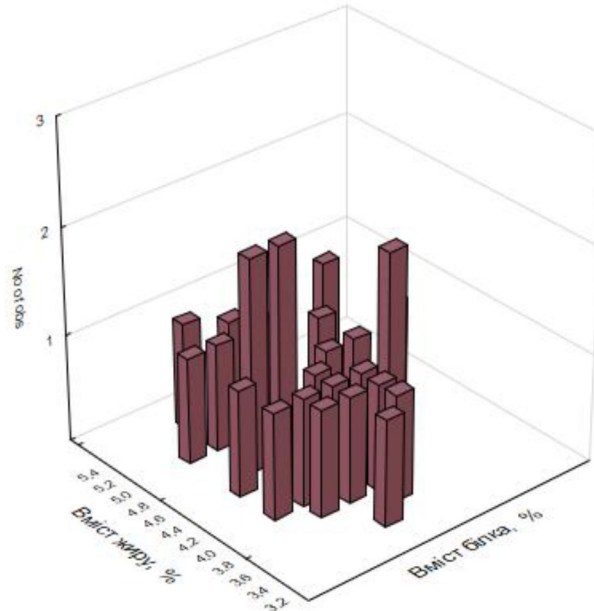


Рис. 2. Двовимірна гістограма «білок-жир»

За результатами двовимірної гістограми, що відображає співвідношення показників «Вміст білка» і «Вміст жиру» у зразках коров'ячого молока, встановлено, що основна маса спостережень зосереджена в межах середніх значень обох компонентів. Це свідчить про стабільність хімічного складу молока за вмістом жиру і білка. Відсутність чітко вираженої лінійної тенденції між показниками вказує на те, що вміст жиру та білка у коров'ячому молоці змінюється незалежно або з незначною кореляцією. Такі коливання можуть бути зумовлені природними біологічними особливостями тварин, умовами годівлі, сезоном лактації чи технологічними факторами.

Таким чином, отримані результати свідчать, що між вмістом білка і жиру існує помірна позитивна кореляція, характерна для натурального молока, де зростання жирності супроводжується підвищенням білкової частки. Це вказує на збалансований склад молока та оптимальні умови годівлі корів.

Для оцінки взаємозв'язку між генотипами  $\beta$ -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2) та ключовими показниками якості молока-сировини побудовано кореляційні діаграми розсіювання (рис. 3). Обчислені коефіцієнти кореляції ( $r$ ) демонструють силу та напрям взаємного впливу між досліджуваними параметрами.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, а) проведено кореляційний аналіз, який виявив слабку позитивну залежність між генотипом  $\beta$ -казеїну та кислотністю молока ( $r = 0,2416$ ). Середній показник кислотності склав  $(6,68 \pm 0,09)$  рН, з межами варіації від 6,51 до 6,84. У тварин із генотипом A2A2 спостерігалася тенденція до підвищення рН (зниження кислотності), що може свідчити про покращену стабільність білкового комплексу молока цього типу. Однак цей зв'язок не виявився статистично значущим і потребує додаткових досліджень на більшій вибірці.

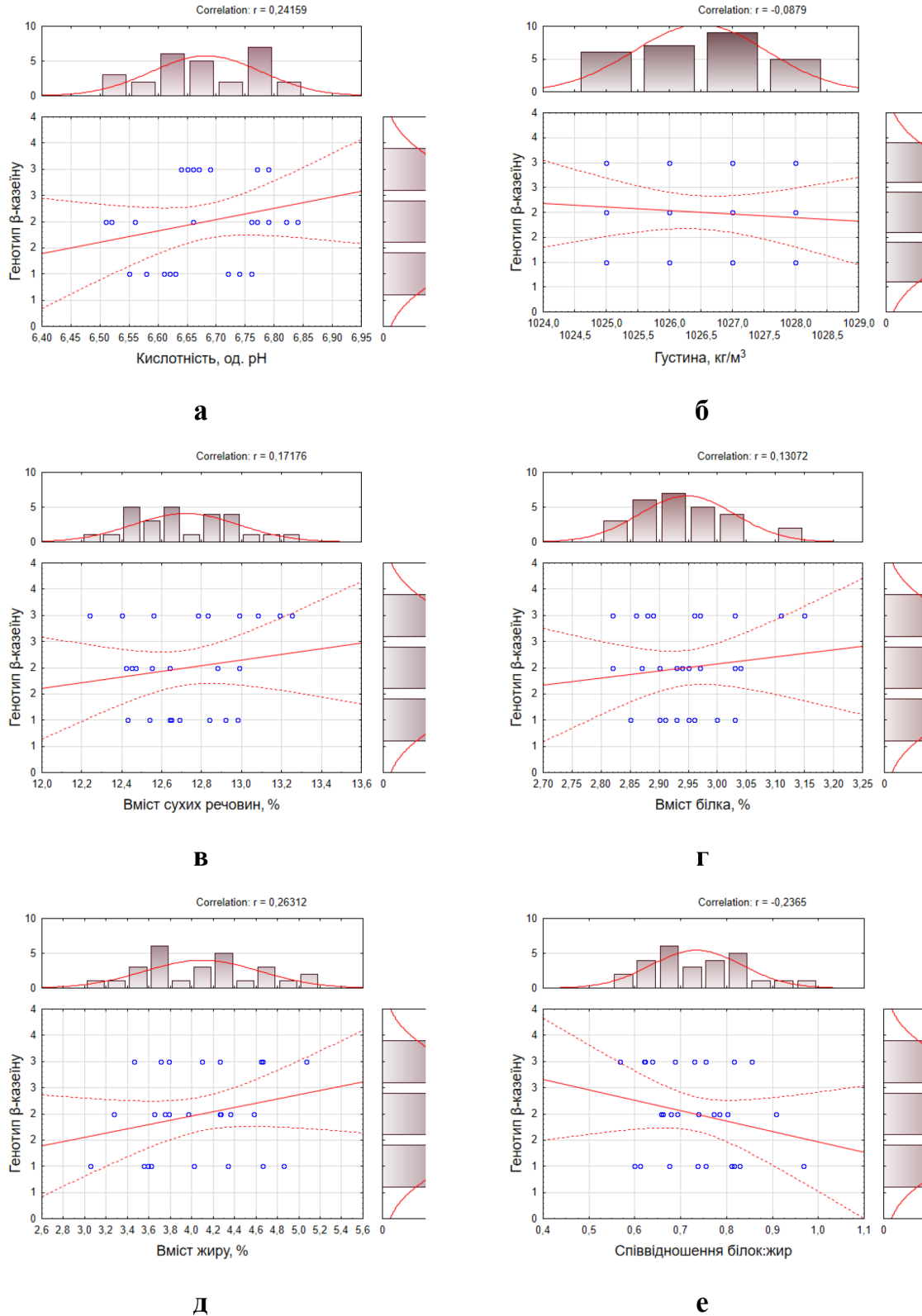


Рис. 3. Кореляційний аналіз залежності між фізико-хімічними показниками молока-сировини та генотипом  $\beta$ -казеїну у корів (1 – А1А1, 2 – А1А2, 3 – А2А2):

а) кислотності; б) густини; в) вміст сухих речовин; г) вмісту білка; д) вмісту жиру; е) співвідношення білок:жир



На діаграмі розсіювання (рис. 3, б) продемонстровано взаємозв'язок між генотипом  $\beta$ -казеїну та густиною молока, який характеризується слабкою негативною кореляцією ( $r = -0,0879$ ). Середній показник густини становив  $(1026,48 \pm 1,05)$  кг/м<sup>3</sup>, варіюючи в межах 1025–1028 кг/м<sup>3</sup>. Це свідчить про незначний вплив генетичних варіантів  $\beta$ -казеїну на густину молока, який більше залежить від інших фізико-хімічних властивостей молока, зокрема від співвідношення жиру та сухих речовин.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, в) представлено кореляційний аналіз між генотипом  $\beta$ -казеїну та вмістом сухих речовин, де коефіцієнт кореляції становив 0,1718, що вказує на слабкий позитивний зв'язок. Згідно з отриманими даними, тварини з генотипом А2А2 демонстрували дещо вищий рівень сухих речовин у молоці (в межах 13,0–13,25 %) порівняно з представниками, які мали генотипи А1А1 та А1А2. Середнє значення концентрації сухих речовин у вибірці склало  $(12,72 \pm 0,26)$  %. Отже, можна зробити висновок, що алель А2  $\beta$ -казеїну позитивно сприяє підвищенню загального вмісту сухих речовин у молоці, що має важливе значення для його подальшої переробки.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, г) наведено результати кореляційного аналізу, який виявив слабкий позитивний зв'язок між генотипом  $\beta$ -казеїну та вмістом білка в молоці ( $r = 0,1307$ ). Це свідчить про тенденцію до незначного збільшення рівня білка в молоці у тварин із генотипом А2А2 порівняно з А1А1 та А1А2. Середній показник вмісту білка склав  $(2,95 \pm 0,08)$  %, а його значення коливались у межах від 2,82 до 3,15 %. Отже, можна припустити, що наявність алеля А2  $\beta$ -казеїну частково пов'язана з підвищенням білковості молока, хоча сила цього взаємозв'язку залишається статистично низькою.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, д) представлено слабку позитивну кореляцію ( $r = 0,2631$ ) для вмісту жиру в молоці. Це вказує на те, що тварини з генотипом А2А2 демонстрували тенденцію до вищого рівня жиру в молоці порівняно з іншими генотипами. Середній показник вмісту жиру становив  $(4,09 \pm 0,54)$  %, а його варіації знаходилися в межах від 3,05 до 5,07 %. Отримані дані узгоджуються з висновками наукових досліджень, які свідчать, що  $\beta$ -казеїн типу А2 може бути пов'язаний із покращеними технологічними характеристиками молока, зокрема його жирністю.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, е) зазначено, що кореляційний коефіцієнт між генотипом  $\beta$ -казеїну і співвідношенням білка до жиру становив  $(-0,2365)$ , що свідчить про слабкий негативний зв'язок. Середнє співвідношення білка до жиру складало  $(0,73 \pm 0,10)$ . Найнижче співвідношення зафіксовано у тварин із генотипом А2А2, що пов'язано з підвищеним вмістом жиру за стабільного рівня білка. Ці результати вказують на потенціал використання генотипу  $\beta$ -казеїну А2А2 як маркера для збільшення жирності молока, тоді як баланс білкових компонентів може залишатись практично незмінним.

Результати дослідження показують, що генотип  $\beta$ -казеїну має незначний, але помітний вплив на окремі якісні характеристики молока. Зокрема, у тварин з генотипом А2А2 спостерігається тенденція до підвищеного вмісту жиру, білка та сухих речовин. Ця особливість може стати важливим чинником при реалізації селекційних програм, спрямованих на покращення хімічного складу молока. Водночас низькі значення кореляційних коефіцієнтів ( $r = 0,13-0,26$ ) вказують на поліфакторну природу формування якісних показників молока.

Для комплексної оцінки впливу генотипу  $\beta$ -казеїну на склад молока проведено тривимірний аналіз (рис. 4) взаємозв'язків між вмістом білка, вмістом жиру та генотипом  $\beta$ -казеїну (А1А1, А1А2, А2А2). Поверхню побудовано із застосуванням методу зважених найменших квадратів (Distance Weighted Least Squares), що забезпечує ефективне згладжування експериментальних даних і дає змогу точніше відобразити узагальнені тенденції. Такий підхід дає змогу виявити нелінійні залежності між основними компонентами молока та генетичними варіантами, що зумовлюють особливості білково-жирового комплексу.

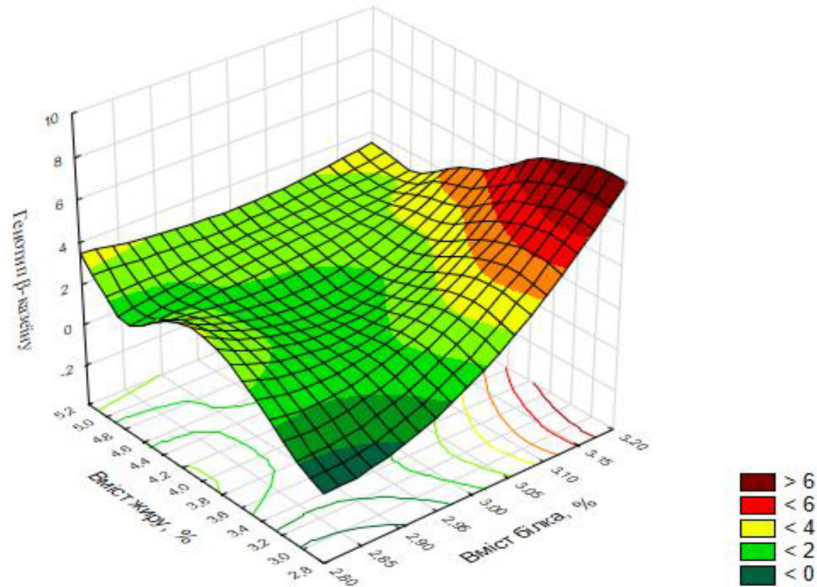


Рис. 4. Тривимірна поверхня взаємозв'язку між вмістом білка, вмістом жиру та генотипом β-казеїну у корів

(1 – A1A1, 2 – A1A2, 3 – A2A2)

На рис. 4 видно, що хвилюподібна структура поверхні свідчить про складну нелінійну взаємодію між рівнем білка та жиру, яка залежить від генотипу β-казеїну. Такий вплив може пояснюватися генетично обумовленими особливостями синтезу фракцій казеїну, які визначають здатність молока утримувати жирові глобули та формувати білково-жирові комплекси. Статистична модель (Distance Weighted Least Squares) здатна пояснити близько 65–70 % варіації показників ( $R^2 \approx 0,68$ ), що свідчить про високий рівень якості апроксимації і дозволяє виявити основні закономірності без суттєвих спотворень даних.

У зонах із високим рівнем білка (понад 3,1 %) та помірним вмістом жиру (близько 4,5–5,0 %) спостерігаються максимальні значення поверхні (червоні ділянки), що, ймовірно, властиво тваринам із генотипом A2A2. Водночас у зонах із нижчим рівнем білка та жиру (зелені ділянки) зазвичай переважають тварини з генотипом A1A1. Отримані дані підтверджують тенденцію до поліпшення білково-жирового складу молока у тварин, які є носіями алеля A2. Такий склад має високу технологічну цінність, оскільки забезпечує більший вихід продукції та покращує структурно-механічні властивості молочних білків під час коагуляції. Це відкриває вагомні перспективи для селекції, орієнтованої на поліпшення технологічних параметрів молока.

**Висновки.** Молоко корів з різними генотипами β-казеїну (A1A1, A1A2, A2A2) за основними фізико-хімічними характеристиками відповідає стандартам ДСТУ 3662:2018, що підтверджує його високу якість як сировини для подальшої переробки.

Встановлено, що генотип β-казеїну суттєво впливає на білково-жировий склад молока. У корів із генотипом A2A2 спостерігаються вищі рівні білка, жиру та сухих речовин, що сприяє підвищеній концентрації казеїнових міцел і покращує здатність молока до коагуляції. Молоко від корів із генотипом A2A2 вирізняється оптимальним співвідношенням білка до жиру, яке є ідеальним для формування сирного згустку з високим вмістом сухої речовини. Це свідчить про кращу придатність такого молока для виробництва сиру.

У молоці-сировині з генотипом β-казеїну A1A1 спостерігається знижений вміст білка та жиру, що може негативно позначатися на швидкості зсідання та щільності сирного згустку.

Кореляційний аналіз виявив позитивні зв'язки між генотипом  $\beta$ -казеїну і такими показниками, як вміст білка ( $r = 0,13$ ), жиру ( $r = 0,26$ ) та сухих речовин ( $r = 0,17$ ). Це підтверджує вплив алеля A2 на формування високоякісного білково-жирового комплексу, що є важливим для виробництва сирів.

Тривимірною моделлю взаємозв'язку між вмістом білка, жиру та генотипом  $\beta$ -казеїну у корів показує нелінійну залежність із концентрацією максимумів у зоні генотипу A2A2. Це демонструє високу технологічну придатність молока цього типу для виробництва сиру.

Результати дослідження свідчать про те, що застосування у племінній роботі корів з генотипом A2A2  $\beta$ -казеїну є багатообіцяючим напрямком селекції для виробництва високоякісної молочної сировини. Це сприяє підвищенню сиропридатності й забезпечує стабільні технологічні характеристики.

Зважаючи на вплив генотипу  $\beta$ -казеїну на білково-жировий склад і придатність молока для виробництва сиру, подальші дослідження зосереджені на аналізі його технологічних властивостей під час переробки на кисломолочні продукти, м'які та тверді сири. Особливу увагу приділено оцінці виходу продукції та органолептичним характеристикам кінцевих виробів, що дозволяє всебічно визначити придатність молока з різними генотипами  $\beta$ -казеїну для цільового використання в сиробстві.

#### Список використаних джерел

1. Invited review: Understanding the behavior of caseins in milk concentrates / M. Corredig et al. *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 102, no. 6. P. 4772–4782. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15943>
2. Analysis of the Frequency of the A1 and A2 Alleles in the Beta-Casein Gene and the A, B and E Alleles in the Kappa-Casein Gene in Local Cattle Breeds: Polish Red and Polish White-Backed / W. Sawicka-Zugaj et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 26, no. 5. P. 2212. <https://doi.org/10.3390/ijms26052212>
3. Genetic variability of alpha-casein, beta-casein, and kappa-casein genes in Holstein-Friesian, Simmental and Brown Swiss cattle / B. Çak et al. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*. 2025. Vol. 76, no. 1. P. 8589–8596. <https://doi.org/10.12681/jhvms.35573>
4. Influence of  $\beta$ -CN Genotype on Physicochemical Properties and Functionality of Bovine Milk / N. Gai et al. *Journal of Dairy Science*. 2023. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23687>
5. Effect of Adding Winemaking By-Product on the Characteristics of Petit Suisse Cheese Made with A2A2 Milk and Probiotic / C. M. S. C. Weis et al. *Fermentation*. 2024. Vol. 10, no. 11. P. 570. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110570>
6. Influence of the  $\beta$ -Casein Genotype of Cow's Milk (A1, A2) on the Quality and  $\beta$ -Casomorphin-7 (BCM-7) Content of a Semi-Hard Cheese During Production / L. Zinbius et al. *Foods*. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 463. <https://doi.org/10.3390/foods14030463>
7. Difficulties in Establishing the Adverse Effects of  $\beta$ -Casomorphin-7 Released from  $\beta$ -Casein Variants—A Review / M. L. de Vasconcelos et al. *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 17. P. 3151. URL: <https://doi.org/10.3390/foods12173151>
8. Effects of A1 and A2 variants of  $\beta$ -casein on human health—is  $\beta$ -casomorphin-7 really a harmful peptide in cow milk? / R. Semwal et al. *Nutrire*. 2022. Vol. 47, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s41110-022-00159-7>
9. BCM-7: Opioid-like Peptide with Potential Role in Disease Mechanisms / E. Bolat et al. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 9. P. 2161. <https://doi.org/10.3390/molecules29092161>
10. Relationship between  $\beta$ -casein genotypes (A1A1, A1A2, and A2A2) and coagulation properties of milk and the fatty acid composition and sensory characteristics of dairy products (soft cheese, sour cream, and butter) / K. de Vitte et al. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science*. 2022. P. 1–12. <https://doi.org/10.1080/09064702.2022.2141308>
11.  $\beta$ -Casein A1 and A2: Effects of polymorphism on the cheese-making process / V. Vigolo et al. *Journal of Dairy Science*. 2023. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23072>
12.  $\beta$ -Casein variants differently affect bulk milk mineral content, protein composition, and technological traits / V. Vigolo et al. *International Dairy Journal*. 2021. P. 105221. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105221>



13. The  $\beta$ -casein (CSN2) A2 allelic variant alters milk protein profile and slightly worsens coagulation properties in Holstein cows / V. Bisutti et al. *Journal of Dairy Science*. 2022. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21537>

14. Borş A., Borş S.-I., Floriștean V.-C. Health-Related Outcomes and Molecular Methods for the Characterization of A1 and A2 Cow's Milk: Review and Update. *Veterinary Sciences*. 2024. Vol. 11, no. 4. P. 172. URL: <https://doi.org/10.3390/vetsci11040172>

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



**T. Synenko, N. Bolgova, O. Koshel**  
**Sumy National Agrarian University**

## **DETERMINING QUALITY INDICATORS OF RAW MILK FROM COWS WITH DIFFERENT B-CASEIN GENOTYPE**

### *Summary*

The article presents the results of a study of milk from Ukrainian Black-and-White cows with different  $\beta$ -casein genotypes (A1A1, A1A2, A2A2) kept in the Sumy region. Samples were taken between 2023 and 2025. It was found that the acidity (pH 6.51–6.84) and density (1025–1028 kg/m<sup>3</sup>) of milk are stable and almost independent of the  $\beta$ -casein genotype. Milk with the A2A2 genotype has higher levels of protein (up to 3.15 %), fat (up to 5.07 %), and dry matter (up to 13.25 %), which indicates its better nutritional and technological value. In A1A1 and A1A2 milk, protein and fat levels are lower. The correlation between the  $\beta$ -casein genotype and milk composition is weak: protein ( $r = 0.13$ ), fat ( $r = 0.26$ ), and dry matter ( $r = 0.17$ ). Acidity and density do not show a significant effect. The three-dimensional “protein-fat-genotype” model confirmed better indicators for A2A2. The results can be used in the selection of high-yielding cattle herds.

**Keywords:** milk raw materials,  $\beta$ -casein, quality indicators, functional indicators, technological properties, sustainable development, statistical analysis, correlation analysis.

## НОТАТКИ

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**Таврійського державного агротехнологічного університету**

*Наукове фахове видання*

**Випуск 15, том 2**

Коректура • *Н. Ігнатова*

Комп'ютерна верстка • *Т. Клименко*

Відповідальний за випуск • к.т.н., професор Склад О. Г.

Підписано до опублікування 22.12.2025.

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»  
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1  
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 7623 від 22.06.2022