

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

ПРАЦІ

Таврійського державного
агротехнологічного
університету



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

Випуск 23, том 1
Наукове фахове видання
Технічні науки



Запоріжжя – 2023 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYI TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



ПРАЦІ

**Таврійського державного
агротехнологічного університету**
Технічні науки

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**
Technical sciences

*Виходить 3 рази на рік
Видається з 1998 р.*

**Випуск 23, том 1
Issue 23, volume 1**

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

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1

Запоріжжя – 2023



УДК [631.3+621.3+664](058)
Т 13

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. 219 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, AGRIS, «Україна наукова», НБУ ім. В. І. Вернадського

Головний редактор

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

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)

Відповідальний секретар

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

Технічний секретар

Погорельцева Д. О. (Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Белосев Христо, д-р техн. наук, проф. (Болгарія)
Даманаускас Відас, д-р техн. наук, проф. (Литва)
Івановс Семенс, д-р техн. наук, доц. (Латвія)
Ольт Юрі, PhD, д-р техн. наук, проф. (Естонія)
Паскуцці Сімоне, 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)

**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)
Гриб О. Г., д-р техн. наук, проф. (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)

Editor in chief

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

Deputy editors in chief

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

Executive secretary

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

Technical secretary

Pogoreltseva D. (Ukraine)

SECTORAL MACHINE BUILDING

Belojev Hristo, Dr. Sci. Tech., Prof. (Bulgaria)
Damanauskas Vidas, Dr. Sci. Tech. (Lithuania)
Ivanovs Semjons, Dr. Sci. Tech. (Latvia)
Olt Jüri, 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)
Sclyar O., Cand. Sci. Tech, Prof. (Ukraine)
Sclyar R., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Titova O., Dr. Sci. Ped., Prof. (Ukraine)

**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)
Gryb O., Dr. Sci. Tech., 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)
Лясковська С.Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Малкіна В. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мацулевич О. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Холодняк 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)

ПРАЦІ**Таврійського державного
агротехнологічного університету****Випуск 23, том 1****Засновник**

Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 1998 році

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ №24285-14125ПР від 27.12.2019 р.
Виходить 3 рази на рік

Рекомендовано до друку вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного
університету
імені Дмитра Моторного
Протокол № 3 від 31.10..2023 р.

«Праці ТДАТУ» включено до **Категорії Б**
Переліку наукових фахових видань України
(науки: технічні), в яких можуть
публікуватися результати дисертаційних
робіт на здобуття наукових ступенів
доктора наук і доктора філософії /
кандидата наук (наказ МОН України від
17.03.2020 р. № 409)

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: 10.31388/2078-0877-2023-23-1

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)

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY****Issue 23, volume 1****Founder**

Dmytro Motorny Tavria State
Agrotechnological University

Founded in 1998

Certificate of governmental registration
KB No. 24285-14125ПР dated December 27, 2019
Published 3 times a year

Recommended for publication by the Academic
Board of Dmytro Motorny Tavria State
Agrotechnological University
Record No. 3 dated October 31, 2023

Proceedings of TSATU is included in the List of
scientific professional editions of Ukraine
(technical sciences), category B, in which the
results of theses for obtaining scientific degrees
of Doctor of Sciences and Doctor of Philosophy /
Candidate of Sciences can be published (order of
the Ministry of Education and Science of Ukraine
dated March 17, 2020, No. 409)

Address of the Editorial office

Legal address: 72312, Zaporizhzhia region
Melitopol, 18, B. Khmel'nitskyi Ave.
Actual address: 69600, Zaporizhzhia region
Zaporizhzhia, 66, Zhukovskyy Str.
<https://oj.tsatu.edu.ua>
DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1



ЗМІСТ / CONTENTS

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- 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 6
Panchenko A., Voloshina A., Mitkov V., Voloshin A. Influence of design features of planetary hydromotors on changing dynamic characteristics of hydraulic drives of mechatronic systems of self-propelled vehicles
- Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ялпачик В. Ф.** Розробка експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора молока 27
Kiurchev S., Samoichuk K., Yalpachyk V. Development of the experimental sample of the pulsation milk homogenizer
- Mikulionok I.** Classification and analysis of polymer and rubber waste shredder designs 41
Мікульонюк І. Класифікація та аналіз конструкцій різальних подрібнювачів полімерних і гумових відходів
- Zhuravel D.** Determination of linear dimensions of boxes and thirds of individual castor varieties 63
Журавель Д. Встановлення лінійних розмірів коробочок і третинок окремих сортів ріцини
- Самойчук К. О., Ломейко О. П., Ковальов О. О., Червоткіна О. О.** Зниження енергетичних витрат диспергування за рахунок явища ежекції 77
Samoichuk K., Lomeiko A., Kovalyov A., Chervotkina A. Reduction of energy costs of dispersion due to the ejection phenomenon
- Гриценко О. П., Степаненко С. П.** Дослідження коефіцієнта корисної дії дискової борони від навантаження на сферичний диск 85
Gritsenko O., Stepanenko S. Investigation of the coefficient of the useful effect of a disk harrow from the load on spherical disc
- Юрченко О. Ю., Склабінський В. І., Гусак О. Г.** Вплив гідродинамічних та механічних чинників на формування гранул у грануляційній башті з використанням обертового вібраційного гранулятора 96
Yurchenko O., Sklabinskyi V., Gusak O. Influence of hydrodynamic and mechanical factors on the formation of granules in a granulation tower using a rotating vibrating granulator
- Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар А. С.** Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів 104
Skliar O., Skliar R., Komar A. Theoretical aspects of modeling of machine technology of organic waste disposal
- Дереза О. О., Водяницький І. О.** Вдосконалення конструкції вертикального ножового млина 116
Dereza O., Vodyanitskyi I. Improvement of the design of the vertical knife mill



Сушко С. Л., Чижиков І. О. Методика розрахунку параметрів пристрою на основі інжектора вентурі для фертигації плодкових насаджень 126
Sushko S., Chyzhykov I. Method for calculating device parameters based on venturi injector for fruit plant fertigation

Фучаджи Н. О., Ковальов О. О., Кузьмінська І. М., Червоткіна О. О. Дослідження апаратних схем переробки гречки 136
Fuchadzy N., Kovalev O., Kuzminska I., Chervotkina O. Research of vehicle charts of processing of buckwheat

Коробка С.В., Кригуль Р.Є., Бабич М.І., Стукалець І.Г., Сиротюк С.В., Болтянський Б.В. Опис виробничої геліосушарки з тепловим насосом 145
Korobka S., Babych M., Krygul R., Stukalets I., Syrotyuk S., Boltianskyi B. Description of the manufactured helio dryer with heat pump

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Кідалов В.В., Дяденчук А.Ф. Одержання та вивчення властивостей гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si 153
Kidalov V., Dyadenchuk A. Obtaining and studying the ZnO/SiC/porous-Si/Si heterostructure properties

Галько С. В., Мірошник О. О., Shchur Т., Markowska А. Моделювання автономної сонячної електростанції для дослідження режимів її роботи 164
Halko S., Miroshnik O., Syvenko M., Shchur T., Markowska A. Simulation of an autonomous solar power plant to study the modes of its operation

Попова І. О., Квітка С. О., Вовк О. Ю. Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження 179
Porova I., Kvitka S., Vovk O. Investigation of an unbalanced mode in a distribution network with a dynamic inductive load

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Priss O. P., Bulhakov P. O., Kolisnychenko T. O., Gazzavi-Rogozina L. V. Using protective coating for reduction of losses while storing asparagus 188
Прісс О., Булгаков П., Колісниченко Т., Газзаві-Рогозіна Л. Скорочення втрат при зберіганні спаржі зі захисним покриттям

Зарецька Д. К., Сердюк М. Є., Кривонос І. А., Бандура В. М. Заморожений напівфабрикат з додавання обліпихи, як сировина для продуктів функціонального призначення 199
Zaretska D., Serdyuk M., Kryvonos I., Bandura V. Frozen semi-finished product with the addition of sea buckthorn as a raw material for products with a functional purpose

Воробець М. М., Євлаш В. В., Кобаса І. М., Кондрачук І. В. Формування якості хліба пшеничного з добавкою «клітковина гречана» 207
Vorobets M., Evlash V., Kobasa I., Kondrachuk I. Formation of the quality of wheat bread with the addition of «buckwheat fiber»



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187

УДК 621. 316. 929

І. О. Попова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5429-8269

С. О. Квітка¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9234-9274

О. Ю. Вовк¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0154-6972

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*e-mail: iryana.popova@tsatu.edu.ua, тел: +380983765519

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО РЕЖИМУ НА РОБОТУ ДИНАМІЧНОГО ІНДУКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. В роботі проаналізовано причини виникнення несиметрії напруг у електричній мережі напругою до 1000 В. Запропоновано методику розрахунку фазних струмів при несиметрії напруг мережі при одночасному включенні однофазних і симетричних трифазних споживачів динамічного індукційного характеру (асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором). Дослідження передбачає еквівалентне перетворення, при якому несиметричне трифазне навантаження замінено на еквівалентне симетричне навантаження; симетрична лінія електропередачі з однаковими опорами замінена несиметричною лінією електропередачі з різними опорами. Режим мережі описано системою рівнянь згідно методу симетричних складових, законів Кірхгофа і комплексних чисел. Наведені рівняння розрахунку фазних струмів динамічного індуктивного навантаження в залежності від напруг і опорів прямої і зворотної послідовностей і математичні рівняння розрахунку опорів прямої і зворотної послідовностей динамічного індуктивного навантаження в залежності від частоти обертання (ковзання). Приведені рівняння ковзання динамічного навантаження в залежності від коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності, моментів прямої і зворотної послідовності та моменту опору робочої машини для різних коефіцієнтів, що характеризують механічну характеристику робочої машини. Приведена методика аналізу дозволяє розрахувати фазні струми динамічного індуктивного навантаження в несиметричному режимі.

Ключові слова: симетричні складові, фазний струм, динамічне індуктивне навантаження, опір, коефіцієнт завантаження, коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності.

Постановка проблеми. Останнім часом з'явилася значна кількість навантажень (електроприймачів), що досить відчутно впливають на режим роботи інших споживачів (плавильні печі, асинхронні двигуни великої потужності тощо), які, в більшості випадків, погіршують якість електроенергії, оскільки ці приймачі характеризуються великими одиночними потужностями, викликають несиметрію низьковольтної мережі до 1000 В [1]. В побуті застосування великої



кількості різних однофазних побутових електроприймачів (електроплит, комп'ютерної техніки, однофазних індуктивних асинхронних двигунів тощо), їх випадковий характер роботи, порушують симетрію трифазної системи, що призводить до додаткових втрат як в системі електропостачання, так в системі електроспоживання, викликають значну несиметрію напруг та струмів навантажень фаз електричних мереж. Це призводить до зниження техніко-економічних показників мереж і електроприймачів, до зміни у їхніх режимах роботи [2].

Така ситуація характерна для розподільних мереж промислових підприємств зі значною частиною однофазних навантажень, головними навантаженнями яких є трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненими роторами, які є динамічними індуктивними навантаженнями [3-4].

Ще гірше стан справ у сільських електромережах, які характеризуються значною довжиною ліній електропередач, нерівномірним розподілом навантажень, тому в них несиметричний режим напруг є правилом, ніж виключенням.

Аналіз останніх досліджень. Сучасна промисловість випускає двигуни серії 4А, 4АМ, АІР, які задовольняють всім вимогам міжнародних стандартів. Однак, не зважаючи на все те позитивне, що було закладено в конструкцію асинхронних двигунів, аварійність їх у важких умовах роботи доволі висока. Фактичний ресурс асинхронних двигунів в агропромисловому комплексі в 2–3 рази менше необхідного: в тваринництві становить 3,5 року, рослинництві – 4 роки, а на підсобних підприємствах – 5 років. Відмови електроприводів через низьку якість асинхронних двигунів не перевищують 2–5 %. Основна причина виведення їх з ладу – аварійні режими. Однією з головних причин, що викликає їхню велику аварійність є низька якість напруги в мережі, зокрема її несиметрія [5].

Несиметрія напруги проявляється в різкому погіршенні техніко-економічних характеристик асинхронних двигунів (збільшення втрат електричної енергії, підвищення нагріву їх складових частин), зниженні експлуатаційної надійності і скорочення їхнього терміну служби. Причиною великої аварійності асинхронних двигунів при несиметричному режимі роботи є підвищення фазних струмів за рахунок залежності опорів фаз статора та ротора від завантаження робочої машини, що призводить до значного збільшення швидкості теплового зносу їх ізоляції. [6-7].

Існуючі методи дослідження режимів роботи асинхронних двигунів як динамічного індуктивного навантаження, як правило, не враховують залежності їх від несиметрії напруги електромережі, завантаження робочих машин та особливостей їх механічних

характеристик. Це обумовлено складнощами у визначенні параметрів обмоток асинхронного двигуна.

Формулювання цілей статті. Дослідити несиметричні режими в розподільчій мережі з динамічним індуктивним навантаженням, визначити вплив несиметрії на фазні струми і напруги при різному ступені завантаження робочих машин та особливостей їх механічних характеристик.

Основна частина. При дослідженні використано метод симетричних складових трифазної системи величин, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл. Для визначення залежності фазних струмів АД від несиметрії напруг мережі проаналізовано електричне коло, яке складається з джерела симетричної трифазної електрорушійної сили, симетричної лінії електропередачі (ЛЕП) з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ та несиметричного навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c : статичного навантаження (несиметричного побутового) і симетричного динамічного навантаження (досліджуваний і інші АД) [8]. Несиметрія напруг у споживача залежить від ступеню несиметрії напруг у конкретного динамічного індуктивного навантаження (тобто АД), несиметрії струмів ЛЕП, яка з'єднує даний споживач із джерелом живлення. Розглянемо випадок, коли до мережі підключено несиметричне статичне навантаження і симетричне динамічне навантаження – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (рисунок 1).

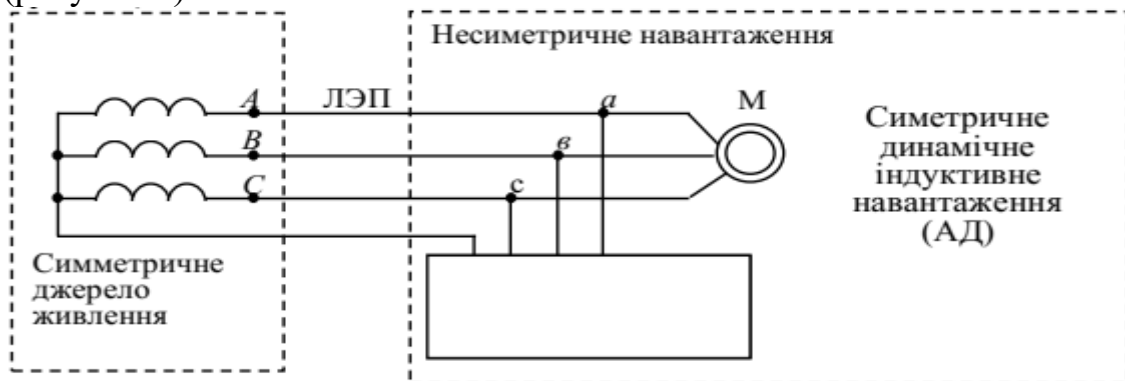


Рис. 1. Принципова схема трифазного кола з несиметричним навантаженням

Складемо розрахункову схему (рис. 2) досліджуваного трифазного кола з несиметричним навантаженням, в якому проведемо еквівалентне перетворення:

- несиметричне навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c замінено на еквівалентне симетричне навантаження з фазними опорами Z_{ea} , Z_{eb} , Z_{ec} ;
- симетричну ЛЕП з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ замінено

несиметричною ЛЕП з опорами $Z_{елA}$, $Z_{елB}$, $Z_{елC}$.

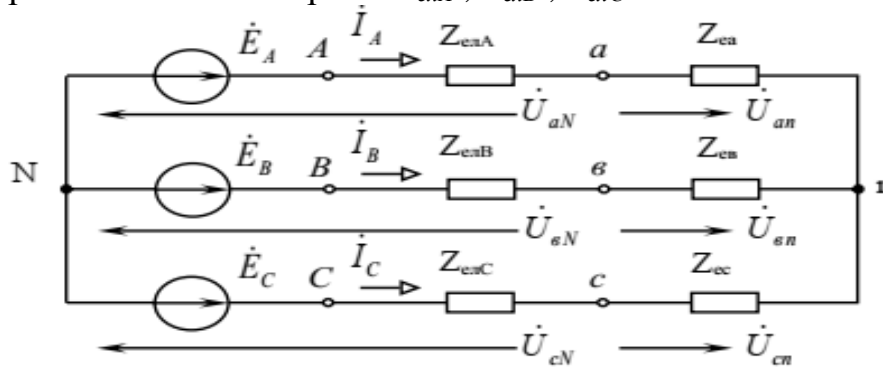


Рис. 2. Розрахункова еквівалентна схема трифазного кола

Введемо наступні позначення співвідношень

$$\frac{\dot{U}_{aN}}{\dot{E}_A} = m; \quad \frac{\dot{U}_{бN}}{\dot{E}_B} = n; \quad \frac{\dot{U}_{сN}}{\dot{E}_C} = p; \quad (1)$$

$$\frac{Z_{ад}}{Z_{еа}} = \alpha; \quad \frac{Z_{бд}}{Z_{еб}} = \beta; \quad \frac{Z_{сд}}{Z_{еc}} = \gamma, \quad (2)$$

де $Z_{ад}$, $Z_{бд}$, $Z_{сд}$ – комплекси повних фазних опорів АД, Ом.

Опори несиметричної еквівалентної ЛЕП у залежності від несиметрії напруг мережі визначаються наступним чином [9]

$$Z_{елA} = \frac{Z_a(1-m)}{\alpha m}; \quad Z_{елB} = \frac{Z_b(1-n)}{\beta n}; \quad Z_{елC} = \frac{Z_c(1-p)}{\gamma p}. \quad (3)$$

Використовуючи метод симетричних складових і розклавши напруги \dot{U}_{Aa} , \dot{U}_{Bb} , \dot{U}_{Cc} на симетричні складові \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_0 , прийняв фазу А за основну, для розрахункових схем прямої, зворотної і нульової послідовностей кола складено систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1; \\ 0 &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \\ a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2); \\ a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де \dot{E}_1 – комплекс ЕРС фази джерела живлення, яка прийнята за модулем рівною номінальній фазній напрузі АД, В;

Z_1 , Z_2 – повні опори обмоток прямої й зворотної послідовностей АД, Ом;

a – фазний множник.

Визначимо із системи рівнянь (4) струми прямої \dot{I}_1 і зворотної \dot{I}_2 послідовностей, а також напруги прямої \dot{U}_1 , зворотної \dot{U}_2 і нульової



\dot{U}_0 послідовностей, знайдено сили фазних струмів $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ АД

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2. \quad (5)$$

Оскільки фазні струми АД різні за величиною та із збільшенням несиметрії напруги мережі різниця між ними лише збільшиться, то використаємо середньквдратичне значення струму

$$I_{c.ф.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}, \quad (6)$$

Аналізуючи системи рівнянь (4) виявлено, що фазні струми динамічного індуктивного навантаження залежать від несиметрії напруг мережі (симетричних складових напруг прямої U_1 і зворотної U_2 послідовностей) і повних опорів прямої і зворотної послідовностей динамічного навантаження, тобто

$$I = f(U_1, U_2, Z_1, Z_2). \quad (7)$$

Слід відмітити, що із збільшенням несиметрії фазних напруг розбіжності між фазними струмами зростають.

У загальному випадку для динамічного навантаження (оберткових машин) $Z_1 > Z_2$. Використаємо параметри спрощеної Г-подібної схеми заміщення, тоді комплекси повних опорів струмам прямої й зворотної послідовностей навантаження визначимо так [10]

$$Z_1 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r1})}{Z_m + Z_s + Z_{r1}}; \quad Z_2 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r2})}{Z_m + Z_s + Z_{r2}}, \quad (8)$$

де повний опір намагнічуючого контуру Z_m , повний опір обмотки статора Z_s , опори обмотки ротору для прямої Z_{r1} і зворотної послідовності Z_{r2} визначаються за математичними виразами

$$Z_m = r_1 + j(x_1 + x_{\mu}); \quad Z_s = r_1' + jx_1'; \quad Z_{r1} = r_2''/s + jx_2''; \\ Z_{r2} = r_2''/(2-s) + jx_2''. \quad (9)$$

Повні опори фаз індуктивного динамічного навантаження є функцією ковзання s . Для визначення залежності ковзання від несиметрії напруг мережі приймемо

$$M = M_1 - M_2; \quad (10)$$

$$M = M_c, \quad (11)$$

де M_1, M_2 – моменти, що залежать від напруг прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей, які прикладені до фаз динамічного індуктивного навантаження, Н·м;

M_c – момент опору робочої машини, Н·м.

Лінійні напруги прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей мережі, а також коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності визначаємо за виразами



$$\dot{U}'_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_{ab} + a\dot{U}_{bc} + a^2\dot{U}_{ca}); \quad (12)$$

$$\dot{U}'_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_{ab} + a^2\dot{U}_{bc} + a\dot{U}_{ca}); \quad (13)$$

$$\kappa_{U2\%} = (U_2' / U_{нл}) \cdot 100, \quad (14)$$

де \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} , \dot{U}_{ca} – комплекси лінійних напруг мережі, В;
 $U_{нл}$ – номінальна лінійна напруга мережі, В.

Рівняння системи «робоча машина–АД» наступне

$$M_0 + (k_3 M_{с.н.} - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x = M_1 - M_2, \quad (15)$$

де M_0 – момент опору тертя частин робочої машини, Н·м;

$M_{с.н.}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

s_H – номінальне ковзання;

k_3 – коефіцієнт завантаження;

x – коефіцієнт, який характеризує механічну характеристику робочої машини.

Тобто ковзання динамічного індуктивного навантаження

$$s = f(U_1, U_2, M_0, M_{с.н.}, s_H, x). \quad (16)$$

Одержимо математичні рівняння ковзання у функції несиметрії напруг мережі та коефіцієнта завантаження робочої машини в залежності від коефіцієнта, що характеризує механічну характеристик робочої машини

$$\text{при } x = 0 \quad s = \frac{\kappa_3}{\frac{u_1}{s_H} - u_2^2 m_{II}}; \quad (17)$$

$$x = 1 \quad s = \frac{m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H}}{\frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H} + \frac{1}{s_H} u_1^2 - m_{II} u_2^2}; \quad (18)$$

$$x = 2 \quad s_{1,2} = \frac{-e \pm \sqrt{e^2 - 4dc}}{2d}, \quad (19)$$

де $d = \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2}$; $e = m_{II} u_2^2 - \frac{1}{s_H} u_1^2 - 2 \frac{(\kappa_3 - m_0)}{(1 - s_H)^2}$; $c = m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2}$;

$$m_0 = \frac{M_0}{M_H}; \quad \kappa_3 = \frac{M_c}{M_{с.н.}}; \quad m_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}; \quad u_1 = \frac{U'_1}{U_{нл}}; \quad u_2 = \frac{U'_2}{U_{нл}} \quad (20)$$

З системи рівнянь (4) комплекси фазних напруг динамічного індуктивного навантаження (АД) визначаються за формулами [11]

$$\dot{U}_{an} = Z_1 \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 ; \tag{21}$$

$$\dot{U}_{bn} = a^2 Z_1 \dot{I}_1 + a Z_2 \dot{I}_2 ; \tag{22}$$

$$\dot{U}_{cn} = a Z_1 \dot{I}_1 + a^2 Z_2 \dot{I}_2 . \tag{23}$$

Проведено розрахунок фазних струмів динамічного навантаження 4A90L4УЗ з $I_n = 5 \text{ A}$ (рис. 3) для різних типів робочих машин $x = (0, 1, 2)$, при різних коефіцієнтах завантаження $K_3 = (0,2...1,0)$, в залежності від коефіцієнта напруги зворотної послідовності мережі $K_{U2\%} = (0...10 \%)$ (рис. 3).

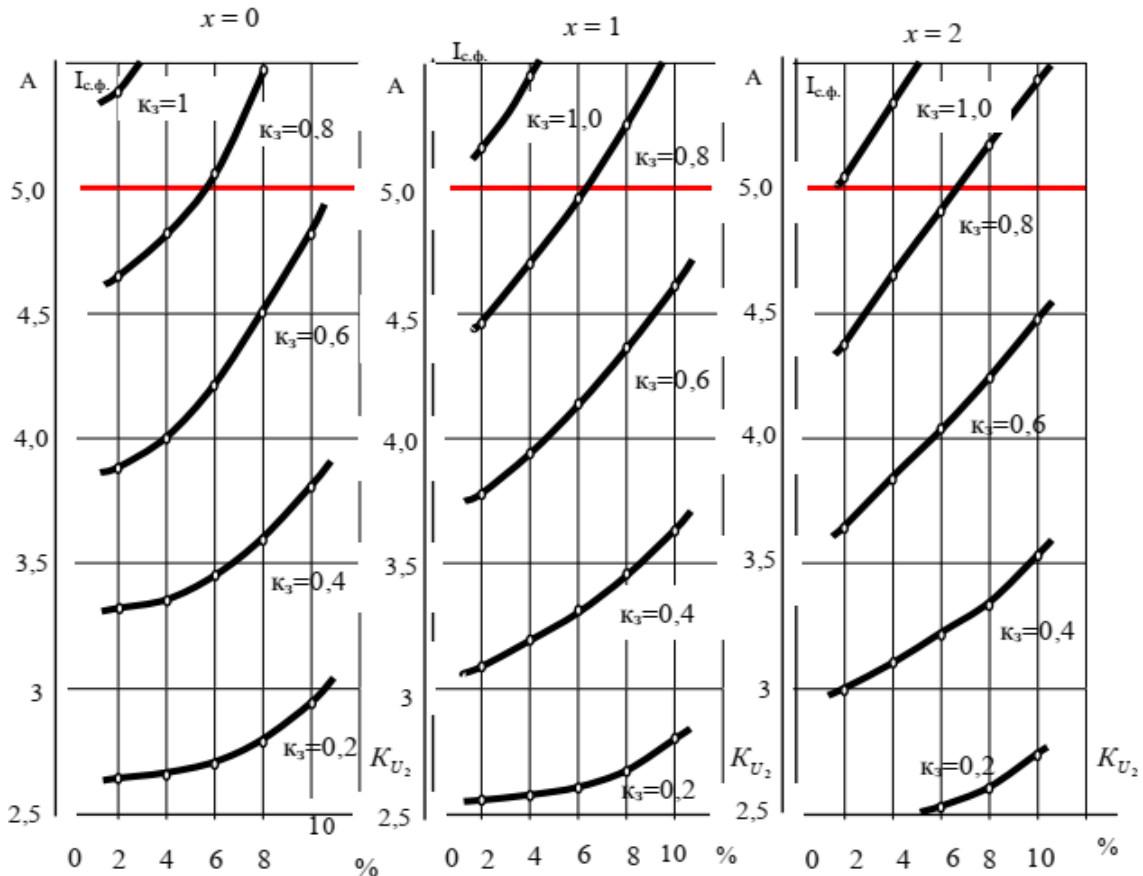


Рис. 3. Графічні залежності $I_{c.ф.} = f(K_{U2}, K_3)$ при $x = (0, 1, 2)$ динамічного навантаження 4A90L4УЗ

Виявлено, що із збільшенням коефіцієнта завантаження K_3 і несиметрії напруги мережі середньквдратичне фазне значення струму збільшується, оскільки ковзання динамічного навантаження збільшується, в наслідок чого змінюються повні опори прямої та зворотної послідовностей, при чому: опір прямої послідовності зменшується, а опір зворотної послідовності збільшується. Причому при рівних умовах коефіцієнту несиметрії напруги зворотної послідовності $K_{U2\%}$, та коефіцієнту завантаження робочої машини K_3 середньквдратичне значення струму досягає більших значень при $x=0$ і менших при $x=2$. При збільшенні коефіцієнту завантаження робочої машини і коефіцієнта несиметрії напруг зворотної послідовності



збільшується ще і напруга зміщення нейтралі, яка і є причиною зміни фазних струмів.

Висновки. Несиметрія напруг мережі, коефіцієнт завантаження робочої машини та коефіцієнт, що характеризує механічну характеристику робочої машини впливають на фазні струми динамічного навантаження. Наведена методика дозволить провести розрахунок фазних струмів і фазних напруг динамічного індуктивного навантаження не тільки для визначених коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній послідовності мережі, а і враховуючи коефіцієнт механічної характеристики робочої машини, приводним двигуном якої він є, та коефіцієнт завантаження робочої машини.

Список використаних джерел

1. Pivnyak G. G., Zhezhenko I. V., Papaika Yu. A., Lysenko O. H. Interharmonics in power supply system. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017. № 6. P. 109–114.
2. Yang, X., Li, X., Ning, B., Tang, T. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016. Vol. 17(1). P. 2–13.
3. Sunderland K., Coppo M., Turri R. Correction current injection method for power flow analysis of unbalanced multiple-grounded 4-wire distribution networks. *Electric Power Systems Research*. 2017. Vol. 132. P. 30–38.
4. Охріменко В. М., Збітнєва М. В., Перепечений В. О. Дослідження несиметричних режимів чотири провідних розподільних мереж. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2018. Вип. 53, № 03. С. 76–80. <https://doi.org/10.33042/2079-424X-2018-3-53-76-81>.
5. Токарев О. В., Борягин Д. О., Шеремет О. І. Аналіз причин пошкодження асинхронних двигунів та засоби діагностування їх режимів роботи. *Науковий вісник ДГМА*. 2018. № 1(25Е). С. 39–45.
6. Bahrevar P., Esmaili M. Optimal Charging Strategy of Electric Vehicles in Unbalanced Three-Phase Distribution Network. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9(S1). P. 1–7.
7. Смолянінов В. Г., Сухопара О. М. Методика розрахунку струму споживачів при змінному активно-індуктивному навантаженні в радіоелектронних засобах. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2010. № 40. С. 61-25.
8. Pakkawe S, Nayamin V., Chaiyapon D. Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*. 2018. Vol. 26(3). P. 98–103.
9. Попова І. О. Попрядухін В. С. Параметри контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів для розробки ефективного захисту. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2019. Вип. 9, т. 1.



<https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-41>.

10. Kurashkin S. F., Popova I., Popryaduhin V. S., Kovalov O. V. Mathematical model of asynchronous motor diagnosis /Science progress in European countries: new concepts and modern solutions. *Proceedings of the 6th International conference. ORT Publishing. Stuttgart, Germany, 2019. P. 361-366.*

11. Попова І. О., Ковальов О. В. Визначення напруги зміщення нейтралі як діагностичного параметра режиму роботи асинхронного двигуна. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2(39). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-39>.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2023 р.

I. Popova, S. Kvitka, O. Vovk
Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

INVESTIGATION OF AN UNBALANCED MODE IN A DISTRIBUTION NETWORK WITH A DYNAMIC INDUCTIVE LOAD

Summary

The paper analyzes the causes of voltage asymmetry in the distribution network with a voltage of up to 1000 V. a method for assessing the state of asymmetry of a four-wire distribution network with simultaneous inclusion of single-phase and symmetrical three-phase consumers of a dynamic induction nature (asynchronous motors with a short-circuited rotor) is proposed. The study involves an equivalent transformation in which an unbalanced three-phase load is replaced by an equivalent symmetrical load; a symmetrical power line with the same resistances is replaced by an unbalanced power line with different resistances. The calculation of the coefficients of the ratios of Phase voltages between the neutral of the power supply to the terminals of a dynamic inductive load is provided for calculating the resistances of an unbalanced equivalent power line depending on the voltage asymmetry in the distribution network. The network mode is described by a system of equations according to the symmetric component method, Kirchhoff's laws, and complex numbers. Equations for calculating the phase currents of dynamic inductive load depending on the voltages and resistances of the forward and reverse sequences and mathematical equations for calculating the resistances of the forward and reverse sequences of dynamic inductive load depending on the speed of rotation (sliding) based on the parameters of a simplified asynchronous motor replacement scheme are given. Mathematical equations of the dependence of the sliding of a dynamic load (asynchronous motor) on the coefficient of asymmetry of the reverse sequence voltage, moments of the forward and reverse sequence depending on the asymmetry of the mains voltages and the moment of resistance of the working machine for various coefficients that characterize the mechanical characteristic of the working machine are given. The inverse sequence coefficient is calculated for linear network voltage complexes. The presented method makes it possible to calculate the phase currents and voltages of a dynamic inductive load, taking into account the voltage asymmetry coefficient of the reverse sequence, the load coefficient of the working machine.

Keywords: symmetric components, phase current, dynamic inductive load, resistance, load factor, reverse sequence voltage asymmetry coefficient. The presented analysis method makes it possible to calculate the phase currents of a dynamic inductive load in an unbalanced mode.

ПРАЦІ
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 23, том 1

Заснований у 1998 р
Виходить три рази на рік

Свідоцтво про державну реєстрацію
Друкованого засобу масової інформації
Міністерство юстиції
КВ 24285-14125 ПР від 27.12.2019 р.

Відповідальний за випуск – д.т.н., професор Панченко А.І.

Підписано до друку 01.11.2023 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум.-друк. арк. 15 Наклад 100.
ТОВ «Науково-виробнича компанія «Інтер-М»
Свідоцтво 33 № 26 від 23.06.2008 р.
69014, Україна, м. Запоріжжя, вул. Колерова,5