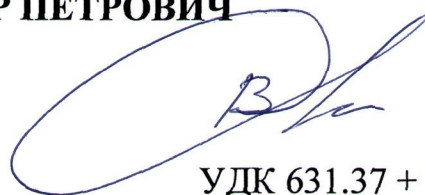


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

КУВАЧОВ ВОЛОДИМИР ПЕТРОВИЧ



УДК 631.37 + 631.3.076

МЕХАНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ
ШИРОКОКОЛІЙНИХ ЗАСОБІВ МЕХАНІЗАЦІЇ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА

Спеціальність 05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Мелітополь – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: член-кореспондент НААН України,
доктор технічних наук, професор
Надикто Володимир Трохимович,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, професор кафедри
машиновикористання в землеробстві

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Погорілий Сергій Петрович,
Національний науковий центр «Інститут механізації
та електрифікації сільського господарства», завідувач
відділу багатофункціональних тягово-транспортних
засобів

доктор технічних наук, професор
Артьомов Микола Прокопович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка,
завідувач кафедри оптимізації технологічних
систем імені Т.П. Євсюкова

доктор технічних наук, професор
Шейченко Віктор Олександрович,
Полтавський державний аграрний університет, професор
кафедри технологій та засобів механізації аграрного
виробництва

Захист відбудеться « 23 » квітня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 18.819.01 в Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного за адресою: 72310, Запорізька обл., м. Мелітополь, проспект Б. Хмельницького 18, ауд. 1.111.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного за адресою: 72310, Запорізька обл., м. Мелітополь, проспект Б. Хмельницького 18.

Автореферат та дисертація розміщені в мережі Internet за адресою <http://www.tsatu.edu.ua/nauka/n/specializovani-vcheni-radu/specializovana-vchena-rada-d-18-819-01/>

Автореферат розісланий « 19 » 03 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Вовк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз стану та проблем підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва свідчить про те, що сучасні технології вирощування культурних рослин, які побудовані на основі традиційних тракторно-комбайнових технологій, вичерпали можливість свого подальшого вдосконалення. Їх повсюдне застосування у сільському господарстві створює низку серйозних проблем, основними з яких є низький енергетичний коефіцієнт корисної дії, деградація ґрунтів внаслідок їх ущільнення та руйнування рушіями традиційних енергетичних засобів та самохідних машин, складність або неможливість автоматизації виробничих процесів, виснаження природних запасів палива і т.і. Водночас створення «нovoї» техніки для сільського господарства шляхом удосконалення традиційних принципів і ускладнення базових конструкцій, їх подорожчання досягається ціною послідовного зростання затрат на одиницю корисного ефекту, тобто в напрямку, яке вичерпало свій потенціал. А безальтернативне застосування традиційних тракторно-комбайнових технологій є перешкодою підвищення ефективності рослинництва.

Перспективним напрямком подальшого розвитку сільського господарства не тільки в Україні, а і у світі, є впровадження інноваційних технологій, до яких слід віднести колійну систему землеробства. Остання створює основу для автоматизації і роботизації більшості технологічних процесів у рослинництві, забезпечує ефективне впровадження «точного» та «цифрового» землеробства та надає інші суттєві переваги.

Практична реалізація основних принципів колійної системи землеробства традиційними тракторно-комбайновими засобами механізації сільськогосподарського виробництва ускладнена певними проблемами при їх використанні. До них слід віднести узгодження параметрів ходових систем серійних машинно-тракторних і комбайнових агрегатів параметрам постійної технологічної колії, тягових властивостей енергозасобів із шириною захвату сільськогосподарських машин (знарядь) тощо.

Обумовлена цим низька техніко-економічна ефективність виконання технологічних операцій вирощування сільськогосподарських культур традиційними тракторно-комбайновими засобами механізації в колійній системі землеробства породжує **народногосподарську проблему** підвищення ефективності роботи ширококолійних засобів механізації сільськогосподарського виробництва, які функціонують за принципами колійної системи землеробства. Їх упровадження у сільськогосподарське виробництво дозволяє отримати максимальну ефективність в процесах обробітку ґрунту і догляду за культурними рослинами.

Ефективність практичного використання ширококолійних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства (далі агрозасобів) залежить від обґрунтованої наукової бази або теоретичних основ оптимізації їх схем та параметрів.

Питання з цього погляду науковцями вивчені не достатньо, а ефективна практична реалізація потенційних технологічних властивостей ширококолійних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства нині відсутня. Тому, з позиції вирішення продовольчої проблеми в країні, а також розробки ресурсозберігаючих технологій, які ґрунтуються на принципах колійної системи землеробства, відповідно до тенденцій науково-технічного прогресу в обла-

сті механізації, які полягають, зокрема, у підвищенні рівня функціонування технічних засобів за рахунок комплексної механізації, електрифікації, автоматизації й роботизації, даний напрямок досліджень є актуальним.

Саме тому розв'язання вказаної народногосподарської проблеми практично неможливе без вирішення відповідної **науково-технічної проблеми**. Суть її полягає в розробленні механіко-технологічних основ функціонування ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства.

Відома нині методологія вибору конструктивних схем, обґрунтування параметрів та режимів роботи машинно-тракторних агрегатів на основі традиційних енергетичних засобів практично не підходить для розв'язання вищезазначеної науково-технічної проблеми з причини нетипової компоновальної схеми ширококоліїних агрегатів, специфіки їх використання та умов функціонування.

Конструктивно-технологічні особливості ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства вимагають розробки принципово нової системи їх функціонування.

Наукова гіпотеза дисертаційної роботи полягає в тому, що використання потенційних техніко-експлуатаційних та технологічних властивостей ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва на новому науково-обґрунтованому рівні дозволить підвищити ефективність застосування колійної системи землеробства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, що склали основу дисертаційної роботи, виконувались у Таврійському державному агротехнологічному університеті імені Дмитра Моторного за державними програмами наукових досліджень НДІ Механізації землеробства півдня України «Розробити адаптовані до умов півдня України енергоощадні технології і комплекси машин на основі нових енергетичних засобів» (2012-2015 рр. № державної реєстрації 0111U002562), «Розробити технічні засоби для реалізації новітніх технологій вирощування сільськогосподарських культур в умовах півдня України» (2016-2020 рр. № державної реєстрації №0116U002718). Робота виконана відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» № 5460-VI від 16.10.2012 р., Державною цільовою програмою розвитку українського села на період до 2015 року, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України № 1158 від 19.09.2007 р., концепцією Державної цільової програми розвитку аграрного сектору економіки на період до 2022 року, яка схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1437-р від 30 грудня 2015 р.

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження* є підвищення ефективності роботи ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва шляхом розроблення і впровадження механіко-технологічних основ їх функціонування в умовах колійної системи землеробства.

Задачі дослідження:

– провести аналіз сучасного стану досліджень щодо використання потенційних переваг ширококоліїних засобів механізації с.-г. виробництва, які функціонують за принципами колійного землеробства;

– дослідити вплив конструктивних та режимних параметрів ширококолієних засобів механізації с.-г. виробництва на їх енергетичні і тягово-зчіпні властивості, а також коефіцієнт землевикористання при облаштуванні поля постійною технологічною колією, та удосконалити методику вибору параметрів рушіїв з урахуванням специфіки їх руху по ній;

– розробити математичні моделі плоско-паралельного руху ширококолієних засобів механізації с.-г. виробництва на поворотній смугі і оцінити вплив їх конструктивних та режимних параметрів на показники поворотності;

– розробити математичні моделі плоско-паралельного руху ширококолієних засобів механізації с.-г. виробництва і оцінити вплив їх схем, конструктивних параметрів, режимів роботи та параметрів керуючого впливу на керованість і стійкість у горизонтальній площині, а також ймовірність пошкоджуваності рослин у рядку робочими органами внаслідок їх поперечних зміщень;

– розробити математичні моделі функціонування ширококолієних засобів механізації с.-г. виробництва в поздовжньо-вертикальній площині і на їх основі дослідити вплив конструктивних і силових параметрів на динаміку руху та особливості їх агрегування з навісними машинами та знаряддями;

– дослідити вплив характеристик ґрунтової поверхні слідів постійної технологічної колії на тягово-зчіпні властивості та енергетичні витрати ширококолієного засобу механізації с.-г. виробництва при його русі по ній;

– оцінити технічну здійсненність і виробничу ефективність функціонування та використання ширококолієних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства в технологічних процесах обробітку ґрунту та внесенні технологічних матеріалів у ґрунт;

– здійснити техніко-економічну оцінку ефективності застосування ширококолієних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства;

– розробити науково-методичні рекомендації з використання ширококолієних засобів механізації с.-г. виробництва в умовах колійної системи землеробства, які забезпечують підвищення ефективності їх роботи.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування ширококолієних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства як динамічних та технологічних систем.

Предмет дослідження – закономірності впливу схем, параметрів і режимів роботи ширококолієних засобів механізації сільськогосподарського виробництва на ефективність їх функціонування в умовах колійної системи землеробства.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження, синтез конструктивних схем, параметрів і режимів роботи агрегатів на основі ширококолієних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства здійснювали шляхом моделювання на персональному комп'ютері умов їх функціонування. В основу методів дисертаційного дослідження покладено положення теоретичної механіки, теорії трактора, статистичної динаміки та теорії автоматичного регулювання лінійних динамічних систем при відтворенні ними статистично випадкових керуючих та збурювальних вхідних впливів.

Експериментальні дослідження проводили як за загальноприйнятими, так і за розробленими методиками і передбачали використання сучасного тензометричного, акселерометричного та спеціально створеного обладнання для електричних вимірювань неелектричних величин. Оброблення дослідних даних здійснювали на персональному комп'ютері із застосуванням теорії ймовірності, регресійного та кореляційно-спектрального аналізів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розв'язанні науково-технічної проблеми розробки механіко-технологічних основ функціонування ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства.

Вперше:

– розроблені нові способи поворотів ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва на поворотній смузі за кінематичним або силовим принципом їх здійснення, що дало можливість оцінити вплив їх конструктивних, кінематичних і силових параметрів на критерії статичної та динамічної повороткості;

– розроблені математичні моделі плоско-паралельного руху ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва за кінематичним або силовим принципом здійснення ними повороту, які дозволяють здійснювати достовірне обґрунтування нових схем, конструктивних параметрів, режимів роботи та параметрів керуючого впливу з огляду на їх прийнятну керованість і стійкість руху у горизонтальній площині, а також обґрунтовують вимоги до параметрів постійної технологічної колії;

– розроблені математичні моделі функціонування ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва у поздовжньо-вертикальній площині, застосування яких дозволяє уточнити вимоги до характеристик поздовжнього профілю нерівностей агрофону в слідах технологічної колії, підвищити плавність руху з урахуванням кінематичних і силових взаємозв'язків їх енергетичної та технологічної частин;

– розроблені математичні моделі кочення пневматичного колеса ширококоліїного засобу механізації сільськогосподарського виробництва по ґрунтовій поверхні слідів постійної технологічної колії, які дозволяють оцінити вплив характеристик останніх на його тягово-зчіпні властивості.

Набуло подальшого розвитку:

– методи статистичної динаміки у системах нелінійних диференціальних рівнянь плоско-паралельного руху ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва у поздовжньо-горизонтальній та вертикальній площинах, які базуються на побудові амплітудних та фазових частотних характеристик відпрацювання динамічною системою керуючих і збурювальних впливів, застосування яких дозволяє обґрунтовувати нові схеми, параметри та режими роботи з огляду на їх прийнятну керованість, стійкість та плавність руху;

– методологія обґрунтування схем і параметрів ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва при облаштуванні інженерної зони поля, що дозволяє оцінювати їх енергетичні і тягово-зчіпні властивості за умов функціонування в колійній системі землеробства;

– методологія оцінювання економічної ефективності від упровадження колійної системи землеробства та використання спеціалізованих ширококолієвих агрозасобів, які дозволяють обчислювати економію коштів за рахунок економії енергетичних витрат, посівного матеріалу і підвищенні врожайності вирощуваної культури в залежності від ступеню ущільнення ґрунту;

– методика вибору параметрів рушіїв ширококолієвих засобів механізації сільськогосподарського виробництва з урахуванням специфіки їх руху по слідах постійної технологічної колії.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблені науково-методичні та практичні рекомендації з використання ширококолієвих засобів механізації с.-г. виробництва в умовах колійної системи землеробства, які рекомендовано до впровадження у виробництво і навчальний процес аграрних вищих навчальних закладів України.

Практичні рекомендації з використання ширококолієвих засобів механізації с.-г. виробництва в умовах колійної системи землеробства впроваджені у ТОВ «Дніпро» Генічеського району Херсонської області.

Результати досліджень з розробки механіко-технологічних основ функціонування ширококолієвих засобів механізації сільськогосподарського виробництва прийняті АТ «Харківський тракторний завод» для створення на підприємстві нових технічних ширококолієвих енергетичних засобів.

Основні положення виконаного дослідження використані в навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного (м. Мелітополь), де протягом 5 років викладаються в межах дисциплін «Аграрна інженерія», «Обґрунтування технологічних процесів в рослинництві» і «Експлуатація машин та обладнання».

Особистий внесок здобувача.

Основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи здобувачем отримані самостійно.

У наукових роботах, виконаних у співавторстві, особистий внесок полягає в такому: [6, 9, 10] – проведено теоретичні та експериментальні дослідження енергетичних і тягово-зчіпних властивостей ширококолієвих агрозасобів, а також оцінювання втрат площі поля під інженерну зону; [2, 3, 7, 8, 17, 26, 27, 32-35, 43, 52, 54-56] – розроблені математичні моделі для теоретичного дослідження керованості, стійкості, плавності руху і повороткості ширококолієвого агрозасобу та проведено їх аналізи; [5, 48, 57] – розроблено методологічні основи оцінки технологічних властивостей і економічної ефективності використання ширококолієвих засобів механізації с.-г. виробництва в колійній системі землеробства; [1, 4, 30, 36-40] – проведено експериментальні дослідження і узагальнено отримані дані; [59-69, 72-77] – складання формул винаходів та схем.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційної роботи були висвітлені та викладені в тезах доповідей на щорічних міжнародних науково-практичних конференціях Таврійського ДАТУ (м. Мелітополь, 2010-2019 рр.); Міжнародній науково-технічній Інтернет конференції «Задачі землеробської механіки у ХХІ столітті» (До-

слідницьке – Мелітополь, 2011 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Житомирський НАУ, 2014 р.), XVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, НУБіП, 2015 р.), XVIII Міжнародній науковій конференції, присвяченої 117-річниці від дня народження академіка П.М. Василенка (м. Кам'янець-Подільський, Подільський ДАУ, 2017 р.), 16 International Scientific Conference (Jelgava, Latvia, 2017), 28th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation (Zadar, Croatia, 2017), V International scientific-technical conference «Agricultural Machinery» (Sofia, Bulgaria, 2017), II International scientific conference «Conserving Soils AND Water» (Burgas, Bulgaria, 2017), Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя» (НУБіП, м. Київ, 2018 р.), XIX Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» присвяченої 120-й річниці з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П.М. Василенка та 118-й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка (НУБіП, м. Київ, 2018 р.), III International scientific conference «Conserving Soils and Water» (Burgas, Bulgaria, 2018), 29th DAAAM International symposium on intelligent manufacturing and automation (Zadar, Croatia, 2018), V Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва» (м. Умань, 2019 р.), Міжнародному науково-практичному форуму «Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції» (ТДАТУ, м. Мелітополь, 2019 р.), XX Міжнародній науковій конференції, присвяченої 119-й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка, (м. Миколаїв, 2019 р.), 30th International DAAAM Symposium on intelligent manufacturing and automation, (Zadar, Croatia, 2019), V Міжнародній науково-практичній конференції «Імпортозамінні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва» (м. Умань, 2019 р.), I Міжнародній науково-технічній Інтернет конференції «Перспективи розвитку машин, обладнання, технічних систем та технологій в агропромисловому комплексі» (ТДАТУ, м. Мелітополь, 2020 р.), а також на багатьох інших всеукраїнських наукових конференціях.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 77 наукових працях, серед яких 11 у періодичних виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, 24 статті у фахових виданнях, 11 закордонних публікацій, 11 тез доповідей, 6 патентів на винаходи та 14 на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 247 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 504 сторінки тексту, з яких на 385 сторінках викладено основний текст роботи, на 72 сторінках – додатки, на 24 сторінках – список використаних джерел. Дисертація включає 173 рисунки (графіки, схеми і фотографії) та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проаналізовано стан наукової проблеми, її значущість, обґрунтовано актуальність теми, відображено зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та основні задачі дослідження, висвітлено наукове і практичне значення одержаних результатів, наведено наукову новизну, відомості про апробацію роботи та публікації.

У першому розділі «Аналіз проблеми та постановка задач досліджень» виконано системний аналіз стану проблеми, наведено огляд досліджень, подано результати аналізу об'єкта та предмета досліджень.

Проведений аналіз наукових праць таких видатних вчених, як Тімонін В.Д., Жалнін Е.В., Муфтеев Р.С., Жук В.Я., Погорілий Л.В., Улексін В.О. та ін. щодо стану і тенденцій розвитку засобів механізації землеробства і рослинництва свідчить, що повсюдне застосування традиційних тракторно-комбайнових технологій створило ряд серйозних проблем, вирішення яких неможливе в рамках загальноприйнятих способів вирощування культурних рослин. На їх думку перспективним напрямком усталеного розвитку сільського господарства є впровадження передових технологій і технічних засобів, до яких слід віднести колійну систему землеробства.

Серед науковців, які внесли вагомий внесок в розвиток колійної системи землеробства можна віднести Черепухіна В.Д., Медведєва В.В., Євтушенка В.О., Жолобецького Г.І., Улексіна В.О., Надикто В.Т., Кюрчева В.М., Chamen W.C.T., Gasso V., Sørensen C., Pedersen H., Kingwell R., Yuxia L, Tullberg J.N., Freebairn D., Williford J. та ін. Але невирішені певні проблеми в реалізації традиційними тракторно-комбайновими технологіями принципів колійної системи землеробства змушують науковців шукати нові ефективні шляхи їх розв'язання.

На думку таких вчених, як Pedersen H.H., Chamen W.C.T., Onal I., Улексін В.О. та ін., реалізувати вказану стратегію землеробства можна іншим радикальним шляхом, через створення так званого «wide span vehicle (gantry)», або ширококолісного агрозасобу (полехіда мостового типу). Типовими представниками вказаних ширококолісних агрозасобів є «мостовий» трактор Даулера, BIOTRAC, ASA-Lift WS 9600, агрозасіб ТДАТУ та інші. З аналізу праць цих науковців щодо актуальності і перспективності впровадження ширококолісних агрозасобів в колійній системі землеробства встановлено, що їх використання характеризується високими потенційними техніко-експлуатаційними та технологічними властивостями. Зробивши певний внесок в роз'яснення перспективності та обґрунтування ефективності використання ширококолісних засобів механізації попередники не завжди враховують можливість практичної реалізації пропонованих ними рішень. У тому числі ними не здійснювалося розроблення відповідної методології, щодо вибору та обґрунтування схем, параметрів та режимів роботи вказаних ширококолісних засобів механізації за принципами їх функціонування в колійній системі землеробства, виходячи із предметного аналізу стійкості, керованості, повороткості та плавності їх робочого руху по слідах постійної технологічної колії. Проведеним аналізом слід констатувати, що механіко-технологічні основи функціонування ширококолісних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства взагалі відсутні.

Математичні моделі функціонування традиційних машинно-тракторних агрегатів, розроблені свого часу Василенком П.М., Габаєм Є.В., Кутьковим Г.М., Надиктою В.Т. та ін., не можуть бути використаними для розв'язання зазначеної проблеми. Переважно з причин нетипової компоувальної схеми ширококолісного агросасобу, специфіки його агрегатування та умов функціонування в колійній системі землеробства. У зв'язку з цим з позиції ефективного використання вказаних ширококолісних засобів механізації виникають невирішені питання щодо вивчення умов, які накладаються на їх конструктивні та інші параметри.

З урахуванням вищезначених проблем були сформульовані мета і задачі дослідження.

В другому розділі «Теоретичні основи обґрунтування параметрів ширококолісних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства» отримано рівняння балансу їх потужності, яке враховує не тільки вплив тягового навантаження, додатковий відбір потужності і умови його функціонування, але і розподіл зчпної ваги, яка припадає на його лівий і правий борт:

$$N_e = \frac{f \cdot g \cdot V}{\eta_t} \left[\frac{M_l}{1 - \delta_l} + \frac{M_r}{1 - \delta_r} \right] + \frac{\lambda \cdot \varphi \cdot g \cdot V}{\eta_t} \left[\frac{M_l \cdot \delta_l}{1 - \delta_l} + \frac{M_r \cdot \delta_r}{1 - \delta_r} \right] + \frac{g \cdot V (\lambda \cdot \varphi - f)}{\eta_t} \left[\frac{M_l}{1 - \delta_l} + \frac{M_r}{1 - \delta_r} \right] + \frac{N_{PTO}}{\eta_{PTO}}, \quad (1)$$

де V – швидкість руху ширококолісного агросасобу, м/с; f – коефіцієнт опору кочення; g – прискорення вільного падіння, м/с²; λ – коефіцієнт навантаження ведучих коліс; φ – коефіцієнт зчеплення рушіїв ширококолісного агросасобу з опорною поверхнею слідів постійної технологічної колії; δ_l , δ_r – коефіцієнти буксування рушіїв лівого і правого бортів ширококолісного агросасобу; M_l і M_r – маси ширококолісного агросасобу, що припадають на його лівий і правий борт, кг; η_t – ККД трансмісії; N_{PTO} , η_{PTO} – додатковий відбір потужності (Вт), що витрачається на активний привід робочих органів машин/знарядь або роботу технологічного обладнання агросасобу, та ККД приводу.

Математичним аналізом виразу (1) встановлено, що для повної реалізації тягово-енергетичних властивостей ширококолісних агросасобів при робочих швидкостях руху до 5 км/год їх енергонасиченість має бути рівною 12,5 кВт/т, а в межах до 10 км/год – 23,5 кВт/т. У зв'язку з цим в реальних умовах експлуатації зменшення швидкісного режиму вказаних агросасобів є шляхом до скорочення енерговитрат на технологічні процеси в колійному землеробстві. За умов достатнього зчеплення рушіїв ширококолісного агросасобу з опорною поверхнею ґрунтового сліду постійної технологічної колії дозволяє розвивати йому тягове зусилля на рівні 6,37 кН на кожен тону його експлуатаційної маси. Це в 1,4 разів більше, ніж здатний розвивати традиційний колісний трактор при його русі по стерньовому агрофону. Рух агросасобу по ґрунтовому сліду постійної технологічної колії на відміну від с.-г. агрофона дозволяє підвищити його коефіцієнт зчеплення до $\varphi = 0,55$. При цьому максимальна дотична сила тяги, що розвивається його колесами, досягається при меншій величині буксування $\delta = 0,15...0,17$. Практично це означає, що рух агросасобу по вирівня-

ному ущільненому ґрунтовому сліду постійної технологічної колії дозволяє підвищити його тягово-зчіпні властивості щонайменше на 30%.

Розроблений та апробований новий науково-методологічний підхід в обґрунтуванні параметрів рушіїв ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства надав можливість розробити алгоритм практичного вибору основних параметрів їх пневматичних коліс (рис. 1). За яким при виборі параметрів шини колеса ширококоліїного агрозасобу постає головне концептуальне питання, або створювати нову шину, або використовувати серійну тракторну. Для якої за представленою методикою можна визначити раціональні параметри спочатку ширини шини, а потім її діаметру, шляхом пошуку компромісного рішення:

$$\frac{\partial \eta_k}{\partial (D_0, b_0, p_w)} \rightarrow 0, \quad (2)$$

де η_k – коефіцієнт корисної дії колеса (цільова функція); D_0 – статичний діаметр шини, м; b_0 – ширина шини, м; p_w – тиск повітря в шині, Па.

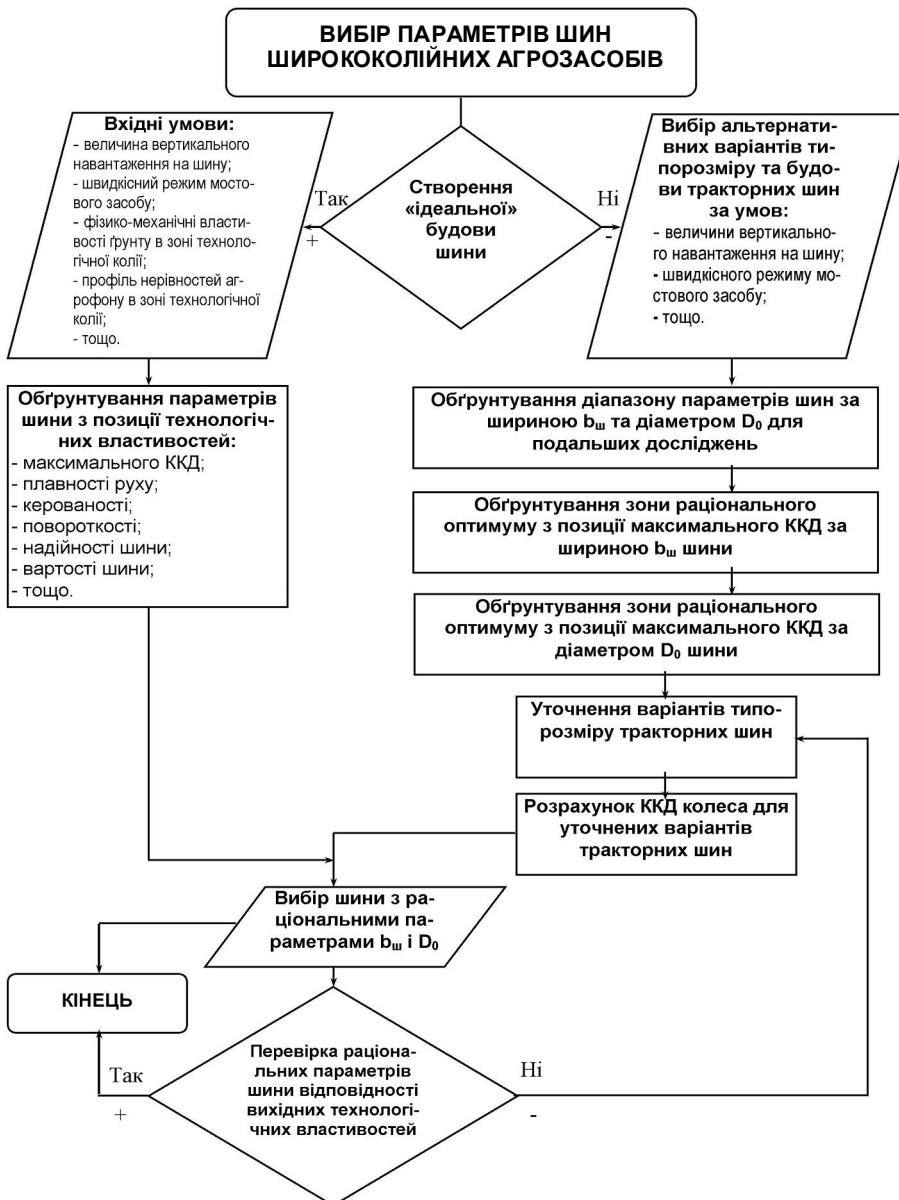


Рис. 1 – Алгоритм вибору параметрів шин ширококоліїних агрозасобів

Розв'язання поставленої задачі показало, що для ширококоліїного агрозасобу ТДАТУ, який обрано в якості фізичного об'єкту досліджень, раціональні оптимуми основних параметрів його шин припадають на величину діаметра 1,245 м та ширину 0,250 м. Практичній реалізації вказаних параметрів відповідають шини типорозміру 9.5R32, розрахункове значення коефіцієнту корисної дії роботи яких дорівнює 0,86. Отримане відносно невелике значення коефіцієнту корисної дії роботи колеса ширококоліїного агрозасобу пояснюється її тракторною приналежністю. Через це обґрунтування параметрів нової шини, спеціально призначеної для агрозасобів, які рухаються по слідах постійної технологічної колії, є предметом окремих

подальших досліджень. З позиції максимального коефіцієнта корисної дії роботи колеса агрозасобу ТДАТУ з шинами 9.5R32 бажаним є встановлення максимального тиску повітря в них, що становить 160 кПа. В умовах експлуатації це також сприяє збільшенню несучої здатності шин ширококолієвих агрозасобів.

Планування земельної ділянки поля під колійну систему землеробства з використанням ширококолієвих агрозасобів має враховувати ширину колії останніх і параметри транспортної системи. Отримана нова залежність дозволяє дослідити вплив конструктивних параметрів ширококолієвих засобів механізації с.-г. виробництва (ширину його колії і рушіїв), стійкого його руху (що враховано величиною технологічного допуску при визначенні ширини колії) та параметрів земельної ділянки поля (довжина, ширина) для її облаштування постійною технологічною колією на коефіцієнт втрат площі поля під інженерну зону w_i :

$$w_i = \frac{b_c + c}{L \cdot A} \cdot \left([L - 2(K + b_c + c)] \cdot \left[\frac{A - b_c - c}{K} + 1 \right] + 4A + \pi[A - b_c - c] \right), \quad (3)$$

де b_c – ширина сліду від шин рушіїв агрозасобу, м; c – ширина технологічного допуску, м; K – ширина колії ширококолієвого агрозасобу, м; L і A – довжина і ширина поля, м.

Проведеними дослідженнями визначено, що втрати площі поля під інженерну зону w_i суттєво залежать від ширини колії K для руху ширококолієвих агрозасобів, що визначається шириною шин їх коліс. Розрахунками встановлено, що за критерієм мінімального коефіцієнта втрат площі поля під інженерну зону раціональна величина ширини колії останніх припадає на $K = 7,5$ м. (рис. 2). На практиці це означає, що використання на ширококолієвих агрозасобах шин з шириною $0,393 \dots 0,429$ м, дозволяє мати величину втрат площі поля під інженерну зону не більше 6%. Водночас, при збільшенні ширини колії агрозасобів до 9,6 м, прикладом є мостовий трактор ASA-Lift WS 9600, величина втрат площі зменшується до 5%.

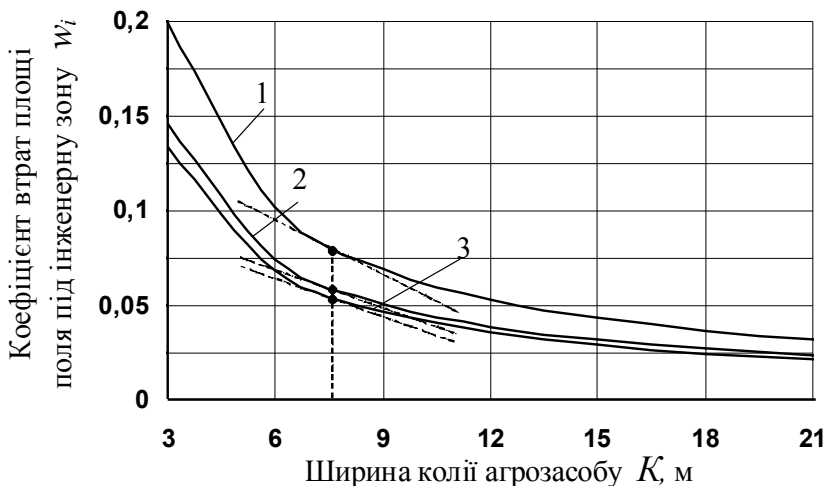


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта втрат площі поля під інженерну зону w_i від ширини колії K ширококолієвого агрозасобу в залежності від ширини b_c шин його рушіїв: 1 – 0,586 м; 2 – 0,429 м; 3 – 0,394 м

Коефіцієнт втрат w_i площі поля під інженерну зону практично не залежить від його довжини L . Доказом цього є той факт, що при гіпотетичному зменшенні довжини поля з 1000 м до 100 м ця величина теоретично змінюється не більше 2% в діапазоні варіювання ширини колії агрозасобів до 30 м. Тому на практиці розмір поля при його облаштуванні під колійну систему землеробства суттєво не впливає на величину коефіцієнта втрат площі поля під інженерну зону. За великих поперечних відхиленнях агрозасобу від заданої прямолінійної траєкторії його руху збільшення ширини технологічного допуску постійної технологічної колії лише на 0,3 м збільшує втрати площі поля під інженерну зону в 1,5...1,75 разів. Практично це означає, що використання широко-

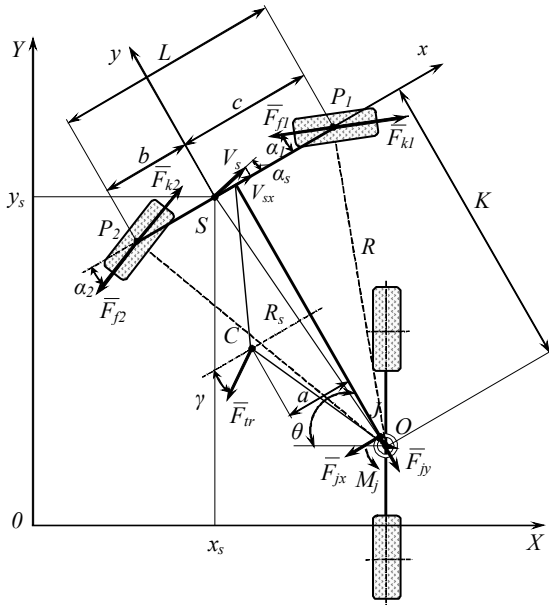


Рис. 3 – Еквівалентна схема повороту (правостороннього) ширококолієного агрозасобу з керованими колесами лівого борту

$$\left. \begin{aligned} m_b \ddot{x}_S &= (F_{k1} - F_{f1}) \cdot \cos(\theta + \alpha_1) + (F_{k2} - F_{f2}) \cdot \cos(\theta - \beta_1) - F_{tr} \cdot \cos(\theta - \gamma); \\ m_b \ddot{y}_S &= -(F_{k1} - F_{f1}) \cdot \sin(\theta + \alpha_1) + (F_{k2} - F_{f2}) \cdot \sin(\theta - \beta_1) - F_{tr} \cdot \sin(\theta - \gamma); \\ J_{zS} \ddot{\theta} &= c \cdot (F_{k1} - F_{f1}) \cdot \sin \alpha_1 + b \cdot (F_{k2} - F_{f2}) \cdot \sin \beta_1 - F_{tr} \cdot \sin \gamma \cdot [0,5L + a] - M_R. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де F_{k1} і F_{k2} та F_{f1} і F_{f2} – рушійні сили та опір кочення переднього і заднього керованих коліс агрозасобу, Н; F_{tr} – тяговий опір машин/знарядь, Н; θ – кут повороту агрозасобу, град; γ – кут напрямку вектора тягового опору машин/знарядь, град; α_1 і β_1 – кути повороту переднього і заднього колеса, град; J_{zS} – момент інерції агрозасобу відносно вертикальної осі z , яка проходить через т. S , кг·м²; M_R – сумарний момент опору повороту, Н·м; a , b , c і L – конструктивні параметри агрозасобу, м.

Розв'язання системи рівнянь (4) показало, що маневр виконання повороту спеціалізованим ширококолієним агрозасобом на малій швидкості руху (0,5 м/с) дозволяє мати кут його повороту у фазі розгону навіть меншим за 10 град. А от при збільшенні швидкості руху агрозасобу до 1,0 м/с кут фази його розгону на повороті при цьому збільшується до 30 град. Реалізація швидкісного режиму агрозасобу на повороті близько 2,0 м/с вже стає проблематичною. Оскільки потребує збільшити фазу його розгону до кута повороту щонайменше в 140 град. На практиці це означає, що майже весь шлях на повороті ширококолієний агрозасіб повинен рухатися із прискоренням з усіма його наслідками, що є небажаним.

Для запропонованої нової схеми повороту ширококолієного агрозасобу розроблений показник режиму його повороткості K_n :

$$K_{n2} = \frac{K \cdot \varepsilon_{\max} \cdot (\mu^2 + 4)}{2\mu}, \quad (5)$$

де ε_{\max} – максимальний кут повороту агрозасобу у момент завершення ним входу в поворот, рад; μ – узагальнений характеристичний параметр агрозасобу, чисельно рівний відношенню його колісної бази L до ширини колії K .

колієних агрозасобів в колійній системі землеробства вимагає обґрунтування принципів їх паралельного водіння, що, за рахунок покращення стійкості їх руху, дозволить максимально зменшити втрати площі поля під інженерну зону щонайменше в 1,5 разів.

Запропонована нами нова схема розвороту ширококолієного агрозасобу на поворотній смузі, шляхом повороту його шасі керованими колесами з одного борту навколо центру, розташованого в центрі міжколієного простору з іншого борту, дозволяє одночасно з поворотом переміщати його на наступну робочу позицію з кращими кінематичними параметрами. За складеною еквівалентною схемою повороту ширококолієного агрозасобу (рис. 3) отримані рівняння його плоско-паралельного руху на поворотній смузі, які дозволяють оцінити вплив його конструктивних, кінематичних і силових параметрів на критерії статичної та динамічної повороткості:

Проведеними дослідженнями виразу (5) встановлено, що здійснення повороту ширококоліїним агрозасобом в оптимальному режимі досягається при такому його конструктивному виконанні, за яким відношення його колісної бази до ширини колії є якомога меншим. За вказаною умовою щонайменшим є і кут повороту його керованих коліс. Для отримання оптимального режиму повороткості ширококоліїних агрозасобів зі збільшенням величини їх колії від 3 м до 12 м кінематичний показник режиму повороту K_n також збільшується з 5,8 м/рад до 30 м/рад і більше. Практично це вимагає збільшення швидкісного режиму при їх русі на повороті, що потребує збільшення енерговитрат на цей процес.

При агрегуванні ширококоліїного агрозасобу першочергову роль відіграють питання його керованості та стійкості руху в складі сільськогосподарських машин/знарядь. Гіпотетично, при цьому, його керування може бути реалізовано за кінематичним або силовим принципом здійснення повороту. Для моделювання плоско-паралельного руху ширококоліїного агрозасобу в горизонтальній площині для кожного із вказаних способів його керування було складено еквівалентні схеми (рис. 4) та зроблені наступні припущення: крен і диферент агрозасобу відсутні; агрозасіб розглядається як фізичне тверде тіло, що має повздовжню площину симетрії, яка проходить через центр його мас; коливання тягового опору сільськогосподарських знарядь суттєво не впливає на швидкість поступального руху агрозасобу, в силу цього вона приймається постійною; бокова взаємодія шин агрозасобу з поверхнею, що деформується, розглядається в рамках гіпотези «бокового уводу»; гіроскопічні і стабілізуючі моменти шин і моменти опору їх скручування відносно вертикальної осі в силу їх незначності не враховуються.

У диференціальній формі запису математична модель функціонування ширококоліїного агрозасобу в горизонтальній площині, як динамічної системи, при силовому (бортовому) способу його керування має наступний вигляд:

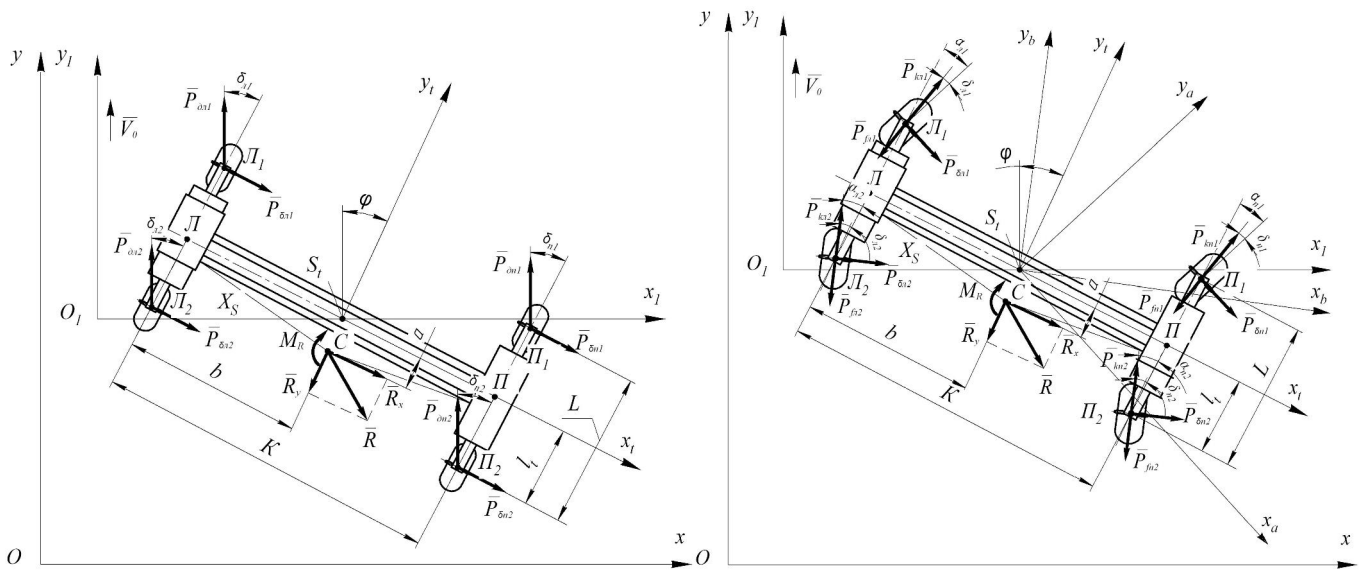
$$\left. \begin{aligned} A_{11} \cdot \ddot{x}_s + A_{12} \cdot \dot{x}_s + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi &= R_x; \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \varphi + A_{24} \cdot \dot{X}_s &= M_R - R_x \cdot a + (P_{dn1} + P_{dn2}) \cdot b - (P_{dn1} + P_{dn2}) \cdot (K - b), \end{aligned} \right\} (6)$$

а у операторній формі запису система рівнянь (6) є такою:

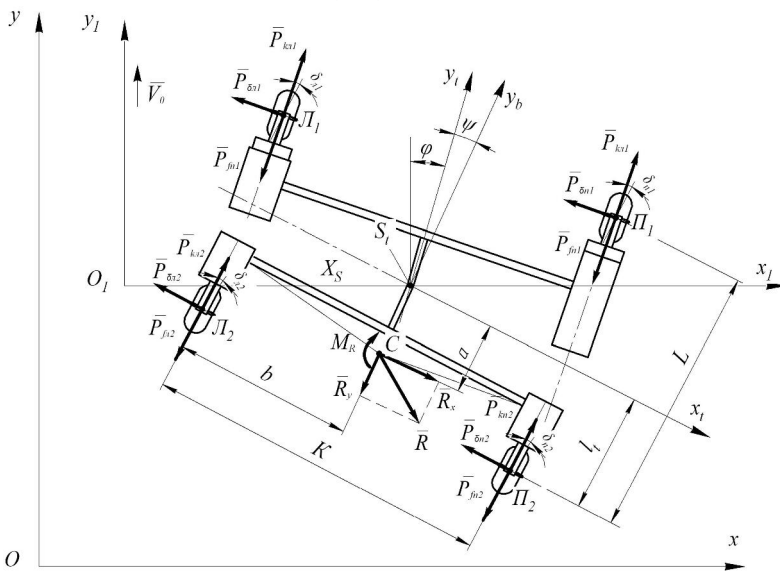
$$\left. \begin{aligned} K_{11} \cdot x_s(s) + K_{12} \cdot \varphi(s) &= F_{11} \cdot P_{dn1} + F_{12} \cdot P_{dn2} + F_{13} \cdot P_{dn1} + F_{14} \cdot P_{dn2} + F_{15} \cdot R_x + F_{16} \cdot M_R, \\ K_{21} \cdot x_s(s) + K_{22} \cdot \varphi(s) &= F_{21} \cdot P_{dn1} + F_{22} \cdot P_{dn2} + F_{23} \cdot P_{dn1} + F_{24} \cdot P_{dn2} + F_{25} \cdot R_x + F_{26} \cdot M_R, \end{aligned} \right\}, (7)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad K_{12} &= A_{13} \cdot s + A_{14}, & A_{11} &= M_b; \\ K_{11} &= A_{11} \cdot s^2 + A_{12} \cdot s, & K_{22} &= A_{21} \cdot s^2 + A_{22} \cdot s + A_{23}, & A_{12} &= (k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}) / V_0; \\ K_{21} &= A_{24} \cdot s, & F_{12} &= 0, & A_{13} &= [(L - l_t) \cdot (k_{n1} + k_{n1}) - l_t \cdot (k_{n2} + k_{n2})] / V_0; \\ F_{11} &= F_{13} = F_{16} = 0, & F_{22} &= b, & A_{14} &= - (k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}); \\ F_{21} &= b, & F_{23} &= -(B - b), & A_{21} &= J_b; \\ F_{14} &= 0, & F_{15} &= F_{26} = 1, & A_{22} &= [(k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t)^2 + (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t^2] / V_0; \\ F_{24} &= -(B - b), & F_{25} &= -a, & A_{23} &= [(k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t - (k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t)]; \\ & & & & A_{24} &= [(k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t) - (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t] / V_0 = A_{13}. \end{aligned}$$

$p = d/dt$ – оператор диференціювання.



а) б)



в)

Рис. 4 – Еквівалентні схеми ширококолієного агрозасобу при його плоско-паралельному русі в горизонтальній площині за силовим (бортовим) способом його керування (а) і кінематичним шляхом повороту коліс (б) і напіврам (в)

Вхідними змінними в системі рівнянь (7) виступають: керуючий вплив у вигляді коливань рушійної сили P_δ на колесах одного із бортів агрозасобу, збурювальний вплив збоку сили R_x , сумарний збурювальний момент M_R .

Математична модель плоско-паралельного руху ширококолієного агрозасобу в горизонтальній площині при кінематичному способі його керування шляхом повороту коліс в диференціальній формі запису має наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \cdot \ddot{x}_s + A_{12} \cdot \dot{x}_s + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi &= f_{11} \cdot \alpha + f_{12} \cdot \beta + R_x, \\ A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \varphi + A_{24} \cdot \dot{x}_s &= f_{21} \cdot \alpha + f_{22} \cdot \beta - R_x \cdot a + M_R - \\ &- (K - b) \cdot (P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2}) + b \cdot (P_{kn1} - P_{fn1} + P_{kn2} - P_{fn2}), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

а в операторній формі запису система рівнянь (8) є такою:

$$\left. \begin{aligned} K_{11} \cdot x_s(s) + K_{12} \cdot \varphi(s) &= F_{11} \cdot \alpha + F_{12} \cdot \beta + F_{13} \cdot R_x + F_{14} \cdot M_R + F_{15}, \\ K_{21} \cdot x_s(s) + K_{22} \cdot \varphi(s) &= F_{21} \cdot \alpha + F_{22} \cdot \beta + F_{23} \cdot R_x + F_{24} \cdot M_R + F_{25}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де

$$K_{11} = A_{11} \cdot s^2 + A_{12} \cdot s; \quad A_{11} = M_i; \quad A_{12} = (k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}) / V_0;$$

$$\begin{aligned}
K_{12} &= A_{13} \cdot s + A_{14}; & A_{13} &= ((k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t) - (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t) / V_0; \\
F_{11} &= f_{11}; & A_{14} &= -(k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}); \\
F_{12} &= f_{12}; & f_{11} &= (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}} + P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}}) + k_{n1} + k_{n1}; \\
F_{13} &= F_{24} = 1; & f_{12} &= k_{n2} + k_{n2} - (P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}); \\
F_{14} &= F_{15} = 0; & A_{21} &= J_i; \\
K_{21} &= A_{24} \cdot s; & A_{22} &= ((k_{n1} - k_{n1}) \cdot (L - l_t)^2 + (k_{n2} - k_{n2}) \cdot l_t^2) / V_0; \\
K_{22} &= A_{21} \cdot s^2 + A_{22} \cdot s + A_{23}; & A_{23} &= -(k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t) + (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t; \\
F_{21} &= f_{21}; & A_{24} &= (k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t) - (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t / V_0; \\
F_{22} &= f_{22}; & f_{21} &= (L - l_t) \cdot ((P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}}) + (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}}) + k_{n1} + k_{n1}); \\
F_{23} &= -(l_t + a); & f_{22} &= l_t \cdot ((P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) - (P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) - k_{n2} - k_{n2}); \\
F_{25} &= -(K - b) \cdot (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) + b \cdot (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}); \\
p &= d/dt - \text{оператор диференціювання.}
\end{aligned}$$

Вхідними змінними в системі рівнянь (9) виступають: керуючий вплив у вигляді середніх кутів повороту передніх α та/або задніх β коліс агрозасобу, а також R_x та M_R .

Математична модель плоско-паралельного руху ширококолісного агрозасобу в горизонтальній площині при кінематичному способі його керування, шляхом повороту напіврам в диференціальній формі запису має наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
A_{11} \cdot \ddot{x}_s + A_{12} \cdot \dot{x}_s + A_{13} \cdot \dot{\varphi} + A_{14} \cdot \varphi &= f_{11} \cdot \dot{\psi} + f_{12} \cdot \psi + R_x, \\
A_{21} \cdot \ddot{\varphi} + A_{22} \cdot \dot{\varphi} + A_{23} \cdot \varphi + A_{24} \cdot \dot{x}_s &= f_{21} \cdot \dot{\psi} + f_{22} \cdot \psi - R_x \cdot a + M_R - \\
-(K - b) \cdot (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) + b \cdot (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) &
\end{aligned} \right\} \quad (10)$$

а в операторній формі запису система рівнянь (11) є такою:

$$\left. \begin{aligned}
K_{11} \cdot x_s(s) + K_{12} \cdot \varphi(s) &= F_{11} \cdot \psi(s) + F_{12} \cdot R_x + F_{13} \cdot M_R + F_{14}, \\
K_{21} \cdot x_s(s) + K_{22} \cdot \varphi(s) &= F_{21} \cdot \psi(s) + F_{22} \cdot R_x + F_{23} \cdot M_R + F_{24},
\end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned}
K_{11} &= A_{11} \cdot s^2 + A_{12} \cdot s; & A_{11} &= M_i; \\
K_{12} &= A_{13} \cdot s + A_{14}; & A_{12} &= (k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}) / V_0; \\
F_{11} &= f_{11} \cdot s + f_{12}; & A_{13} &= ((k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t) - (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t) / V_0; \\
F_{12} &= 1; & A_{14} &= -(k_{n1} + k_{n2} + k_{n1} + k_{n2}); \\
F_{13} &= F_{14} = 0; & f_{11} &= (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t / V_0; \\
K_{21} &= A_{24} \cdot s; & f_{12} &= (k_{n2} + k_{n2}) + (P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) - R_x; \\
K_{22} &= A_{21} \cdot s^2 + A_{22} \cdot s + & A_{21} &= J_i; \\
A_{23}; & & A_{22} &= ((k_{n1} - k_{n1}) \cdot (L - l_t)^2 + (k_{n2} - k_{n2}) \cdot l_t^2) / V_0; \\
F_{21} &= f_{21} \cdot s + f_{22}; & A_{23} &= -(k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t) + (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t; \\
F_{22} &= -a; & A_{24} &= (k_{n1} + k_{n1}) \cdot (L - l_t) - (k_{n2} + k_{n2}) \cdot l_t / V_0; \\
F_{23} &= 1; & f_{21} &= -l_t \cdot (k_{n2} + k_{n2}); \\
F_{24} &= -(K - b) \cdot (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) + b \cdot (P_{k_{n1}} - P_{f_{n1}} + P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}); & f_{22} &= -l_t \cdot ((k_{n2} + k_{n2}) + (P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}}) - (P_{k_{n2}} - P_{f_{n2}})) + R_x \cdot a. \\
p &= d/dt - \text{оператор диференціювання.}
\end{aligned}$$

Вхідними змінними в системі рівнянь (10) виступають: керуючий вплив у вигляді кутового зміщення ψ напіврам агрозасобу, а також R_x та M_R .

У системах рівнянь (5-10) M_i , V_0 – маса (кг) і швидкість руху агрозасобу, м/с; k_{n1} , k_{n2} і k_{n1} , k_{n2} – коефіцієнти опору уводу коліс відповідно лівого і правого бортів

агрозасобу, кН/рад.; $P_{\partial l1}, P_{\partial l2}, P_{\partial n1}, P_{\partial n2}$ – рушійні сили коліс лівого і правого бортів агрозасобу кН; P_{fn1}, P_{fn1} і P_{fn2}, P_{fn2} – сили опору коченню передніх і задніх коліс агрозасобу; J_t – момент інерції повороту агрозасобу у горизонтальній площині відносно вертикальної осі, яка проходить через точку S_t , кН·м·с²; K, L, a, b, l_t – конструктивні параметри ширококолісного агрозасобу, м (див. рис. 4).

Вихідними параметрами функціонування розглядуваної динамічної системи (див. рис. 4), якою є ширококолісний агрозасіб, виступають: курсовий кут (φ) та поперечне зміщення його центру мас (X_S).

Стійкість та керованість ширококолісного агрозасобу, як слідкуючої динамічної системи, оцінювали за допомогою амплітудних та фазових частотних характеристик відпрацювання нею вхідних впливів. При цьому в робочому діапазоні частот ω ідеальні (або бажані) амплітудні і фазові частотні характеристики вихідних величин за керуючим впливом повинні бути близькими до одиниці, або мати достатній ступінь його підсилення, а фазовий зсув прагнув до нуля. По збурювальному впливу амплітудні характеристики повинні дорівнювати нулю, а фазові навпаки – мають бути якомога більшими (прагнув до нескінченності).

Розрахунок амплітудних і фазових частотних характеристик коливань курсового кута (φ) та поперечного зміщення центру мас (X_S) ширококолісного агрозасобу здійснювали на основі відповідних передавальних функцій (W_j), вирази яких склалися шляхом розв’язання визначників, побудованих з коефіцієнтів лівих і правих частин рівнянь (7), (9) і (11) в операторній формі запису.

Аналіз результатів математичного моделювання показав, що для забезпечення найкращої стійкості ширококолісного агрозасобу ТДАТУ швидкість його робочого руху має бути близькою до 1 м/с (рис. 5). При збільшенні швидкості руху агрозасобу до 3 м/с амплітудно-частотні характеристики відпрацювання динамічною системою збурювального впливу погіршуються (тобто небажано зростають). Водночас, максимальна амплітуда його курсового кута φ на частотах близьких до нуля становить 0,08 рад на 1 кН коливань тягового опору, а на частотах $\omega > 3$ с⁻¹ збільшення швидкісного режиму руху агрозасобу практично не погіршує стійкості його руху в горизонтальній площині. Збільшення швидкісного режиму руху агрозасобу до 3 м/с на частотах збурювального впливу близьких до нуля негативно відображається на величині його поперечного відхилення. Практично це означає, що на 1кН коливань тягового опору с.-г. знаряддя амплітуда поперечного відхилення агрозасобу наближається до 50 мм, що вимагає більшої ширини постійної технологічної колії за рахунок збільшення величини технологічного допуску. В кінцевому підсумку це небажано збільшує втрати площі поля під інженерну зону.

При двократному збільшенні ширини колії ширококолісного агрозасобу з 3 м до 6 м, як показали теоретичні розрахунки, амплітудні характеристики відпрацювання агрозасобом збурювального впливу (коливань тягового опору) також збільшуються. Але різниця амплітудних значень при цьому не перевищує 7%, що можна компенсувати, наприклад, зміною швидкісного режиму руху агрозасобу, або величиною коефіцієнту опору уводу його коліс.

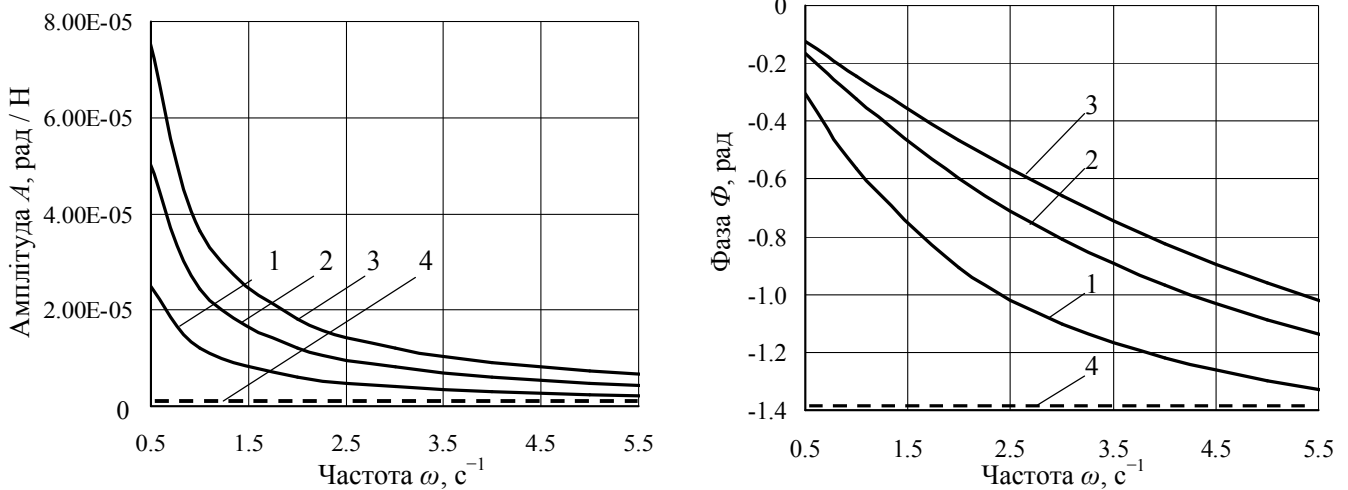
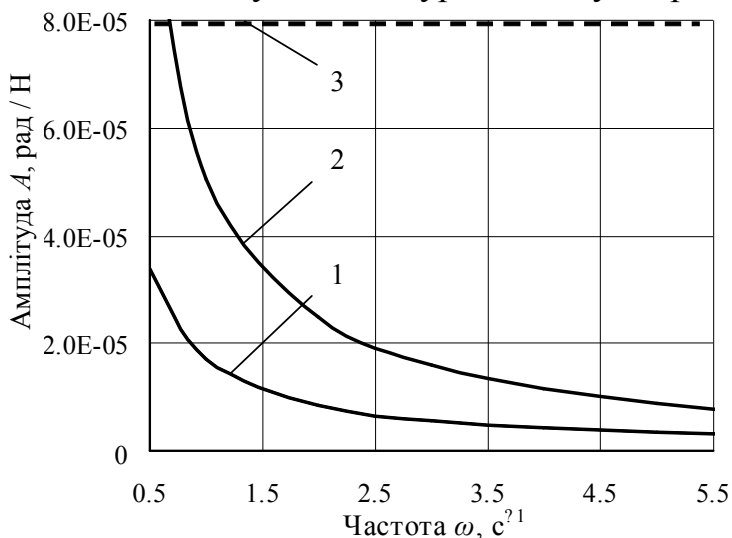


Рис. 5 – Амплітудні (а) і фазові (б) частотні характеристики коливань відповідно курсового кута φ агрозасобу при відпрацюванні ним збурювального впливу при різних швидкостях V_0 його руху: 1 – 1 м/с; 2 – 2 м/с; 3 – 3 м/с; 4 – бажана характеристика

Також проведеними теоретичними дослідженнями встановлено, що з позицій задовільної стійкості руху ширококолісного агрозасобу місце приєднання технологічної частини до нього повинно розміщуватися усередині його колісної бази. Доказом цього є той факт, що в діапазоні частот $\omega = 0,5 \dots 5,5 \text{ s}^{-1}$ амплітудні характеристики наближаються до ідеальних.

З позиції забезпечення кращої керованості ширококолісного агрозасобу при силовому (бортовому) способі його керування збільшення ширини його колії дозволяє збільшувати коефіцієнт підсилення реакції динамічної системи на керуючий вплив, яким є рушійна сила на колесах одного із його бортів. Найбільш відчутно цей процес проявляється на частотах коливання рушійної сили близьких до нуля. Практично це означає, що при ширині колії агрозасобу $K = 9 \text{ м}$ на 1 кН коливань рушійної сили амплітуда його курсового кута зростає до $4,5$ град, а поперечні відхилення



сягають $0,4 \text{ м}$, що може призвести до перегулювання динамічної системи і погіршення керованості агрозасобу (рис. 6).

Рис. 6 – Амплітудно-частотні характеристики коливань курсового кута φ агрозасобу при відпрацюванні ним керуючого впливу (рушійна сила коліс одного із бортів $P_{ол}$) при силовому способі його керування і різних значеннях величини колії K : 1 – 3 м; 2 – 9 м; 3 – бажана характеристика

Бажане зменшення запізнення реакції ширококолісного агрозасобу на вхідний керуючий сигнал при силовому способі керування досягається зі зменшенням ширини його колії та інтенсивності швидкісного режиму руху. Доказом цього є те, що

при розрахунках фазово-частотних характеристик із зменшенням ширини колії агрозасобу до 3 м та швидкості його руху до 1 м/с вони наближаються до ідеальних.

Силовий (бортовий) спосіб керування агрозасобом є малоефективним при малому його швидкісному режимі і на частотах керуючого впливу більших за $2,5 \text{ с}^{-1}$, де динамічна система практично не реагує на керуючий вплив. За таких умов доведено, що тільки ефективна система керування агрозасобом дозволить мати задовільну його керованість.

При кінематичному способі керування агрозасобом на малих швидкостях руху ($V_0 = 1 \text{ м/с}$) бажана частота коливань кута повороту α передніх коліс має знаходитися на рівні $0,5 \text{ с}^{-1}$ (рис. 7). Водночас при збільшенні швидкості руху агрозасобу до 3 м/с на низьких частотах ($\omega < 1,3 \text{ с}^{-1}$) маємо факт перерегулювання динамічної системи, а на частотах $\omega > 1,3 \text{ с}^{-1}$ навпаки – незначне недорегулювання відносно ідеальної характеристики. В умовах експлуатації це означає, що при великому швидкісному режимі агрозасобу (близькому до 3 м/с) в діапазоні частот $\omega = 0,5 \dots 5,5 \text{ с}^{-1}$ інтенсивності керуючого впливу, тільки ефективна система його керування дозволить мати задовільну керованість.

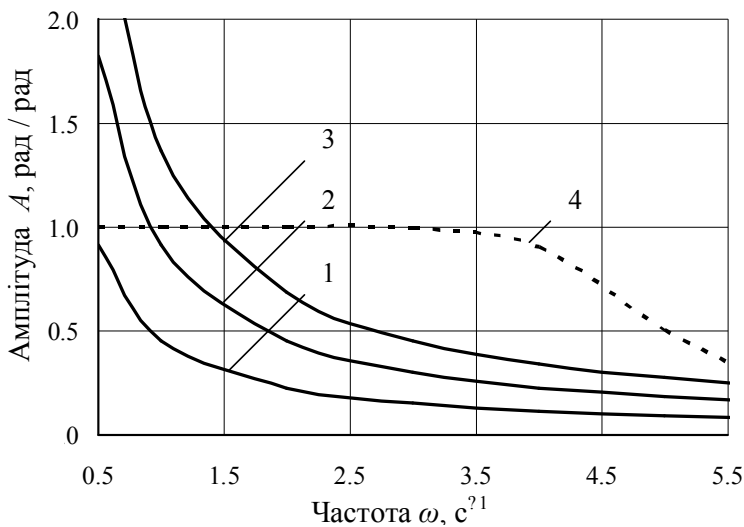


Рис. 7 – Амплітудно-частотні характеристики коливань курсового кута φ агрозасобу при відпрацюванні ним керуючого впливу (кута повороту α передніх коліс) за кінематичним способом його керування і різних швидкостях V_0 руху:

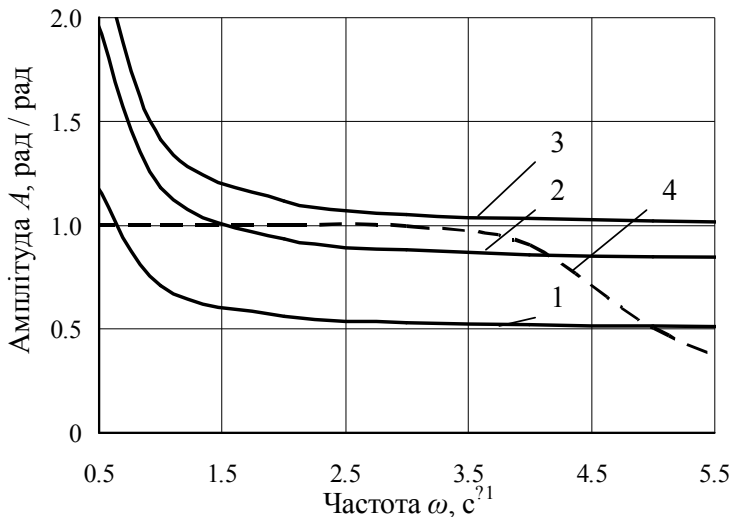
1 – 1 м/с; 2 – 2 м/с; 3 – 3 м/с; 4 – ідеальна характеристика

З аналізу математичних моделей плоско-паралельного руху агрозасобу в горизонтальній площині за кінематичним способом його керування шляхом повороту коліс доведено, що його керованість практично не залежить від того якими колесами здійснюється поворот (будь то за допомогою передніх або задніх). Тому, для практичного функціонування ширококолісного агрозасобу можна проектувати його з одними, наприклад, тільки передніми керованими колесами. Водночас майже однаковою буде його керованість, як при прямому, так і реверсивному русі.

З позиції забезпечення кращої керованості ширококолісного агрозасобу при кінематичному способі його керування шляхом повороту напіврам, бажана частота коливань кута ψ їх зміщення знаходиться на рівні $1,7 \text{ с}^{-1}$. При цьому характер амплітудних і фазових частотних характеристик суттєво залежить від ширини поздовжньої бази агрозасобу (рис. 8) і швидкості його руху. За таким способом керування агрозасобом небажано його проектувати як із надто великою, так і малою його колісною базою. Оскільки в частотному діапазоні коливань керуючого впливу $\omega = 0,5 \dots 5,5 \text{ с}^{-1}$ динамічна система практично не може досягти ідеальних характеристик.

При роботі агрозасобу на швидкостях руху близьких до 3 м/с при його керуванні шляхом повороту напіврам маємо амплітуди поперечних відхилень більших за 16 м/рад. На практиці це може призвести до перерегулювання динамічної системи і

складності керування агрозасобом, а також до розширення технологічної колії за рахунок збільшення величини технологічного допуску, що збільшує втрати площі під інженерну зону. Але ж за наявності ефективної системи його керування за таким

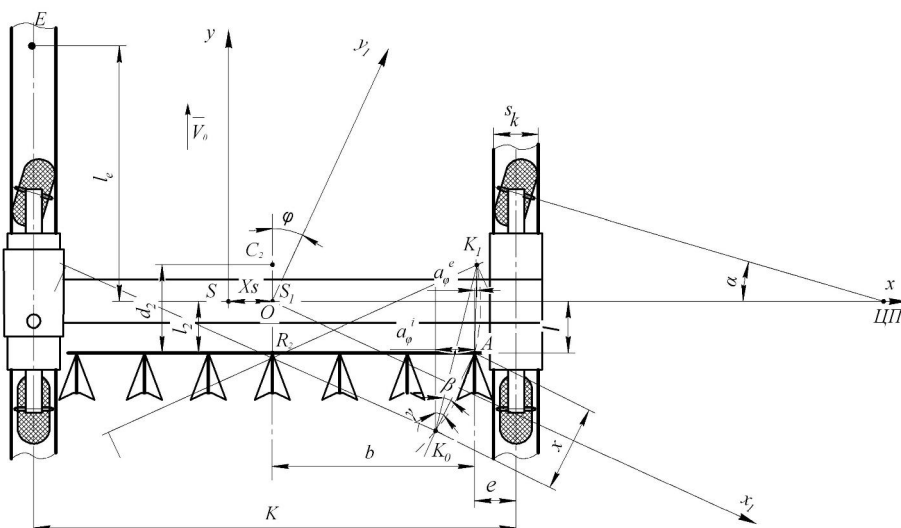


способом дозволить мати непогані показники його керованості, які є не гіршими за характеристики його роботи з поворотними колесами.

Рис. 8 – Амплітудно-частотні характеристики коливань курсового кута φ агрозасобу при відпрацюванні ним керуючого впливу (кута повороту напіврам ψ) за різної величини його поздовжньої бази L : 1 – 4 м; 2 – 2,4 м; 3 – 2 м; 4 – ідеальна характеристика

Також іншим вхідним параметром функціонування сільськогосподарського агрегату на основі ширококолієного агрозасобу є кут повороту машин/знарядь у горизонтальній площині. З аналізу результатів проведених теоретичних досліджень випливає, що для забезпечення задовільної керованості агрозасобу ТДАТУ частота коливань кута повороту його коліс має становити $0,8 \dots 0,9 \text{ с}^{-1}$. В іншому випадку амплітудні і фазові частотні характеристики відпрацювання динамічною системою керуючого впливу наближаються до ідеальних тільки тоді, коли миттєвий центр повороту навісного механізму агрозасобу знаходиться в зоні центра його мас. Але практично ця відстань має бути настільки малою, що відповідає зближенню нижніх тяг до $0,02 \text{ м}$ при куті їх збіжності – 85 град . Це означає, що з позиції проектування універсального навісного пристрою для ширококолієних агрозасобів слід передбачити можливість його налаштування, як за трьохкрапковою, так і за двокрапковою схемами.

При кінематичному способі керування ширококолієного агрозасобу величина кутів α повороту його передніх коліс повинна постійно коригуватися в залежності від курсового φ і поперечного X_S відхилень (рис. 9) таким чином, щоб відновити рух його центра (т. S_t) в заданому напрямку. Для вирівнювання положення остову агрозасобу в процесі його поворотів навколо центру повороту (ЦП) «зовнішнє» і «внутрішнє» по-



перечне зміщення одного і того ж його робочого органу відносно геометричної осі рядка будуть нерівні між собою (рис. 9).

Рис. 9 – Еквівалентна схема ширококолієного агрозасобу в горизонтальній площині при дослідженні поперечних зміщень робочих органів (на прикладі крайнього правого)

За рис. 9 зв'язок параметрів ширококоліяного агрозасобу з абсолютною величиною внутрішнього (α_φ^i) і зовнішнього (α_φ^e) поперечних зміщень крайнього робочого органу матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}\alpha_\varphi^i &= l \cdot \sin\varphi + (0,5K - 0,5s_k - c) \cdot (1 - \cos\varphi); \\ \alpha_\varphi^e &= l \cdot \sin\varphi - (0,5K - 0,5s_k - c) \cdot (1 - \cos\varphi),\end{aligned}\quad (12)$$

де c – величина захисної зони, м; l , K , s_k , φ – параметри агрозасобу, природа яких зрозуміла з рис. 9.

Проведеними дослідженнями встановлено, що при розстановці робочих органів (особливо культиваторних) для ширококоліяного агрозасобу слід враховувати фактор різниці їх зміщень. При цьому величина захисної зони для рядка культурної рослини повинна бути різною з її лівого та правого боків (приблизно на 3 см). Через асиметричність щільності розподілу ймовірності поперечних зміщень робочих органів, розміщених по обидва боки рядка культурної рослини, ймовірність потрапляння лівого робочого органу у зону Z_l не дорівнює ймовірності появи правого робочого органу у зоні Z_r (рис. 10). Тому для визначення ймовірності пошкодження рослин лівим і правим робочим органом відносно осі рядка використано закон, що враховує ексцес і асиметричність розподілу:

$$p_A(D_{Z_l}) = \left\{ \begin{aligned} & \left[F(n)_{X_l} - \frac{r_3}{6} f^{(2)}(n)_{X_l} + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}(n)_{X_l} \right] - \\ & \left[F\left(\frac{C - n\sigma_{X_r}}{\sigma_{X_l}}\right) - \frac{r_3}{6} f^{(2)}\left(\frac{C - n\sigma_{X_r}}{\sigma_{X_l}}\right) + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}\left(\frac{C - n\sigma_{X_r}}{\sigma_{X_l}}\right) \right] \end{aligned} \right\}^\times, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \times \left\{ \begin{aligned} & \left[F\left(-\frac{C - n\sigma_{X_l}}{\sigma_{X_r}}\right) - \frac{r_3}{6} f^{(2)}\left(-\frac{C - n\sigma_{X_l}}{\sigma_{X_r}}\right) + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}\left(-\frac{C - n\sigma_{X_l}}{\sigma_{X_r}}\right) \right] - \\ & \left[F(-n)_{X_l} - \frac{r_3}{6} f^{(2)}(-n)_{X_l} + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}(-n)_{X_l} \right] \end{aligned} \right\} \\ p_A(D_{Z_r}) &= \left\{ \begin{aligned} & \left[F\left(-\frac{C - n\sigma_{X_r}}{\sigma_{X_l}}\right) - \frac{r_3}{6} f^{(2)}\left(-\frac{C - n\sigma_{X_r}}{\sigma_{X_l}}\right) + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}\left(-\frac{C - n\sigma_{X_r}}{\sigma_{X_l}}\right) \right] - \\ & \left[F(-n)_{X_l} - \frac{r_3}{6} f^{(2)}(-n)_{X_l} + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}(-n)_{X_l} \right] \end{aligned} \right\}^\times, \quad (14) \end{aligned}$$

$$\times \left\{ \begin{aligned} & \left[F(n)_{X_l} - \frac{r_3}{6} f^{(2)}(n)_{X_l} + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}(n)_{X_l} \right] - \\ & \left[F\left(\frac{C - n\sigma_{X_l}}{\sigma_{X_r}}\right) - \frac{r_3}{6} f^{(2)}\left(\frac{C - n\sigma_{X_l}}{\sigma_{X_r}}\right) + \frac{r_4 - 3}{24} f^{(3)}\left(\frac{C - n\sigma_{X_l}}{\sigma_{X_r}}\right) \right] \end{aligned} \right\}$$

де $F(X)$ – нормальна функція щільності розподілу; $f^{(j)}(X)$ – j -ті похідні нормальної функції щільності розподілу; r_3, r_4 – основні моменти.

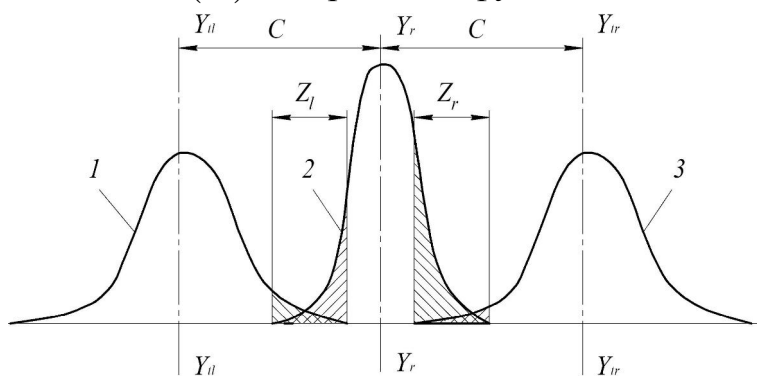
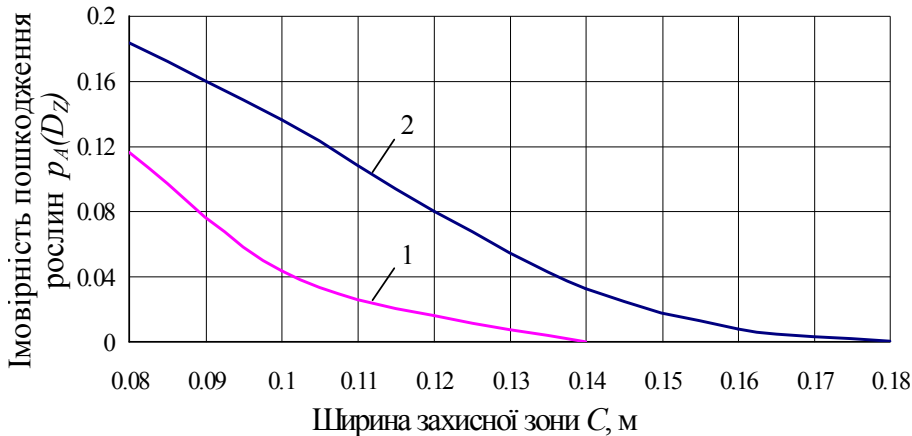


Рис. 10 – Схема щільності асиметричного розподілу ймовірності зміщень робочих органів з лівого 1 і правого 3 боків рядка від заданого напрямку руху і розміщення рослин 2

З аналізу результатів обчислення ймовірності пошкоджуваності рослин робочими органами ширококолієного агрозасобу з шириною колії 9,6 м залежно від величини захисної зони рядка (рис. 11) впливає, що при однаковій величині останньої, пошкоджуваність рослин робочим органом, розміщеним зовні відносно геометричної осі рядка і центра агрозасобу (крива 2), і всередині (крива 1) різна. Так, наприклад, при захисній зоні 13 см ймовірність пошкодження зовнішнім робочим органом становить 5,5%, внутрішнім – 1%. При цьому ширина колії агрозасобу, амплітуди його кутових курсових коливань та віддаленість робочих органів від його кінематичного центру мають бути якомога меншими.

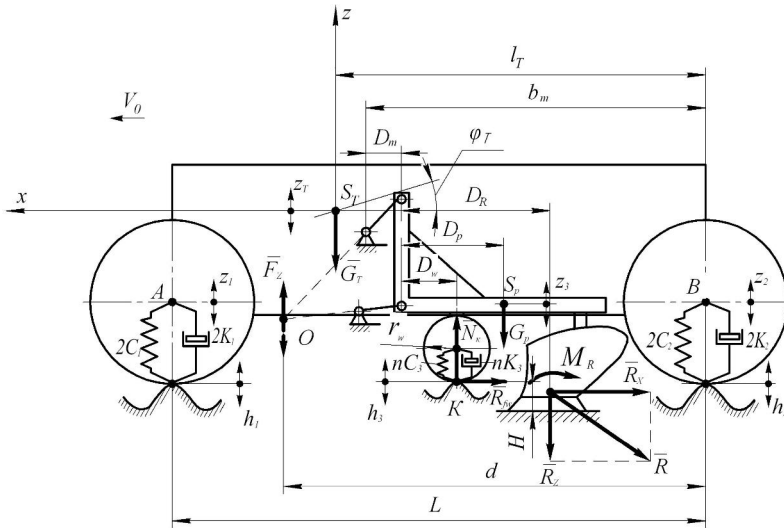


матичного центру мають бути якомога меншими.

Рис. 11 – Ймовірність $p_A(D_Z)$ пошкодження рослин крайнім робочим органом в залежності від величини захисної зони C : 1 – усередині; 2 – назовні

Доказом цього є той факт, що при ширині колії агрозасобу на рівні $K = 6$ м і його амплітудах кутових коливань до 8 град величина поперечних зміщень крайніх робочих органів становить 0,38...0,48 м. Практично це означає, що в процесі роботи робочі органи будуть потрапляти в зону розміщення рядка культурної рослини та знищувати їх при цьому. Через це ефективна система керування рухом агрозасобу сприятиме зменшенню сукупності всіх кутових відхилень від заданого напрямку руху, що дозволить практично зменшити амплітуди поперечних зміщень робочих органів до 0,05 м, і, як наслідок, зменшити ймовірність пошкодження рослин у рядку робочими органами, особливо крайніми. Кріплення знаряддя для прокладання постійної технологічної колії має бути жорстким, а оптимальна зона його розміщення і робочих органів агрозасобу – зосереджені на мінімально можливій поздовжній відстані від його кінематичного центра. Тільки в цьому випадку величина взаємного відхилення траєкторій постійної технологічної колії і робочих органів становить не більше за 1 мм. При цьому оптимальна поздовжня відстань від кінематичного центра агрозасобу до точки стеження за траєкторією руху має бути рівною 3...4 м, що є прийнятним для зору людини-оператора.

Динаміку вертикальних коливань ширококолієного агрозасобу з його технологічною частиною оцінювали на основі аналізу плавності руху. Для цього реальний ширококолієний агрозасіб був представлений еквівалентною йому динамічною моделлю (рис. 12) та прийняті наступні положення і припущення: кутові коливання технологічної частини ширококолієного агрозасобу не розглядаються; коливання тягового опору с.-г. знарядь не здійснюють впливу на швидкість його поступального руху, через це вона приймається постійною; нерівності профілю постійної технологічної колії представляють собою випадкову ергодичну стаціонарну функцію шляху; нахил ширококолієного агрозасобу у поздовжньо-поперечній площині відсутній;



сили опору у шинах опорних коліс приймаються пропорційними швидкості коливань, а характеристики пружних елементів – лінійними.

Рис. 12 – Еквівалентна динамічна модель ширококолісного агрозасобу у поздовжньо-вертикальній площині

Математична модель руху ширококолісного агрозасобу у поздовжньо-вертикальній площині є такою:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \cdot \ddot{z}_1 + A_{12} \cdot \dot{z}_1 + A_{13} \cdot z_1 + A_{14} \cdot \ddot{z}_2 &= f_{11} \cdot \dot{h}_1 + f_{12} \cdot h_1 + f_{13} \cdot R_x + f_{14} \cdot R_z + f_{15} \cdot M_R + f_{16}; \\ A_{21} \cdot \ddot{z}_2 + A_{22} \cdot \dot{z}_2 + A_{23} \cdot z_2 + A_{24} \cdot \ddot{z}_1 &= f_{21} \cdot \dot{h}_2 + f_{22} \cdot h_2 + f_{23} \cdot R_x + f_{24} \cdot R_z + f_{25} \cdot M_R + f_{26}; \\ A_{31} \cdot \ddot{z}_3 + A_{32} \cdot \dot{z}_3 + A_{33} \cdot z_3 &= f_{31} \cdot \dot{h}_3 + f_{32} \cdot h_3 + f_{33} \cdot R_x + f_{34} \cdot R_z + f_{35} \cdot M_R + f_{36}, \end{aligned} \right\} (15)$$

$$\begin{aligned} A_{11} &= (M_t \cdot l_T^2 + J_T) / L^2; & A_{12} &= 2K_1; & A_{13} &= 2C_1; & A_{21} &= (M_t \cdot (L - l_T)^2 + J_T) / L^2; \\ A_{14} &= 2(M_t \cdot l_T \cdot (L - l_T) - J_T) / L^2; & A_{22} &= 2K_2; & A_{23} &= 2C_2; & A_{24} &= 2(M_t \cdot l_T \cdot (L - l_T) - J_T) / L^2; \\ A_{31} &= M_c; & A_{32} &= nK_3; & A_{33} &= nC_3; & f_{21} &= 2K_2; & f_{22} &= 2C_2; & f_{31} &= nK_3; & f_{32} &= nC_3; \\ f_{11} &= 2K_1; & f_{12} &= 2C_1; & f_{13} &= \frac{0,5 \cdot H \cdot d}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{14} &= \frac{d \cdot (D_R - D_w)}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{23} &= \frac{0,5 \cdot H \cdot (1 - d)}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{24} &= -\frac{(1 - d) \cdot (D_R - D_w)}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; \\ f_{15} &= \frac{d}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{25} &= \frac{(1 - d)}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{16} &= \frac{d \cdot G_p \cdot (D_p - D_w + f_w \cdot r_w)}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{26} &= \frac{(1 - d) \cdot G_p \cdot (D_p - D_w + f_w \cdot r_w)}{L(d - b_m + D_m + D_w)}; \\ f_{33} &= \frac{0,5 \cdot H}{(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{34} &= \frac{(D_R - D_w)}{(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{35} &= -\frac{1}{(d - b_m + D_m + D_w)}; & f_{36} &= \frac{G_p \cdot (D_p - D_w + f_w \cdot r_w)}{(d - b_m + D_m + D_w)}. \end{aligned}$$

У системі рівнянь (15) M_t , J_T – маса ширококолісного агрозасобу (кг) і його момент інерції відносно осі, яка проходить через т. S_T , $\text{кН} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ (рис. 12); K_1 , K_2 , K_3 і C_1 , C_2 , C_3 – приведені коефіцієнти опору деформації ($\text{кН} \cdot \text{с} / \text{м}$) і коефіцієнти жорсткості систем підресорювання відповідно передніх, задніх коліс агрозасобу та його технологічної частини ($\text{кН} / \text{м}$). Природа інших силових і конструктивних параметрів, які входять до цієї системи рівнянь, зрозуміла із рис. 12.

Основними збуреннями, які спричинюють вертикальні переміщення ширококолісного агрозасобу у поздовжньо-вертикальній площині, є коливання нерівностей поздовжнього профілю постійної технологічної колії під передніми (h_1) і задніми (h_2) колесами та нерівностей профілю агрофону (h_3) під опорними колесами його технологічної частини, а також коливання тягового опору с.-г. знаряддя (R_x і R_z) та головний момент (M_R) (див. рис. 12).

У результаті математичного моделювання встановлено, що з точки зору бажаності відпрацювання спеціалізованим ширококоліїним агрозасобом коливань нерівностей слідів постійної технологічної колії збільшення коефіцієнта жорсткості шин його коліс є ефективним при частотах цього збурення, більших за $7,0 \text{ c}^{-1}$ (рис. 13). При цьому дисперсії коливань нерівностей профілю постійної технологічної колії мають зосереджуватися в частотних діапазонах $\omega = (0 \dots 7 \text{ і } 13 \dots 20) \text{ c}^{-1}$, оскільки в них наближають амплітудно-частотні характеристики до ідеальних.

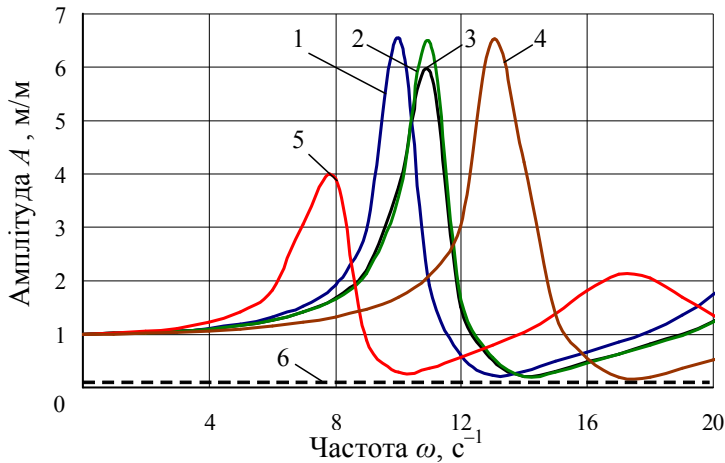
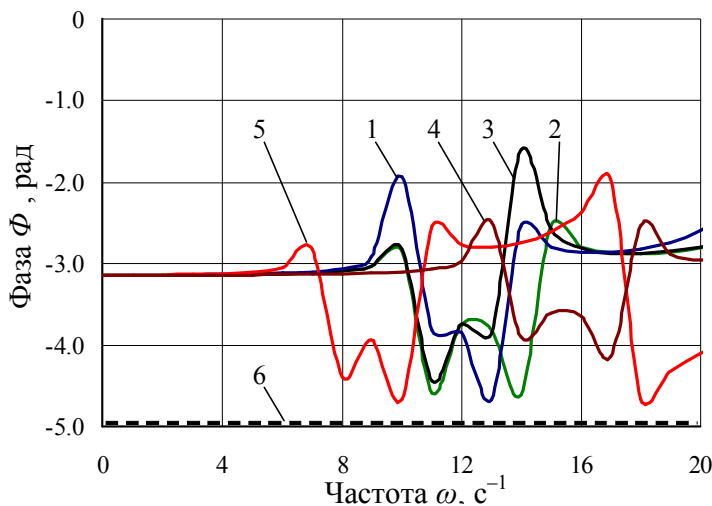


Рис. 13 – Амплітудно-частотні характеристики відпрацювання остовом агрозасобу коливань профілю шляху з різним типорозміром та жорсткістю шин його коліс:
 1 – 11,2R20 ($C_{ш2} = 254 \text{ кН/м}$);
 2 – 9,5R32 ($C_{ш2} = 292 \text{ кН/м}$);
 3 – 11,2R32 ($C_{ш2} = 296 \text{ кН/м}$);
 4 – $C_{ш2} = 450 \text{ кН/м}$; 5 – $C_{ш2} = 150 \text{ кН/м}$;
 6 – ідеальна характеристика

Практично досягти такого профілю нерівностей шляху можна відповідною технологією формування слідів постійної технологічної колії або зміною жорсткості пневматичної шини. В умовах експлуатації останнє можна досягнути шляхом підбору такого тиску повітря в ній, який би забезпечував мінімальне реагування динамічної системи на вхідне збурювання.



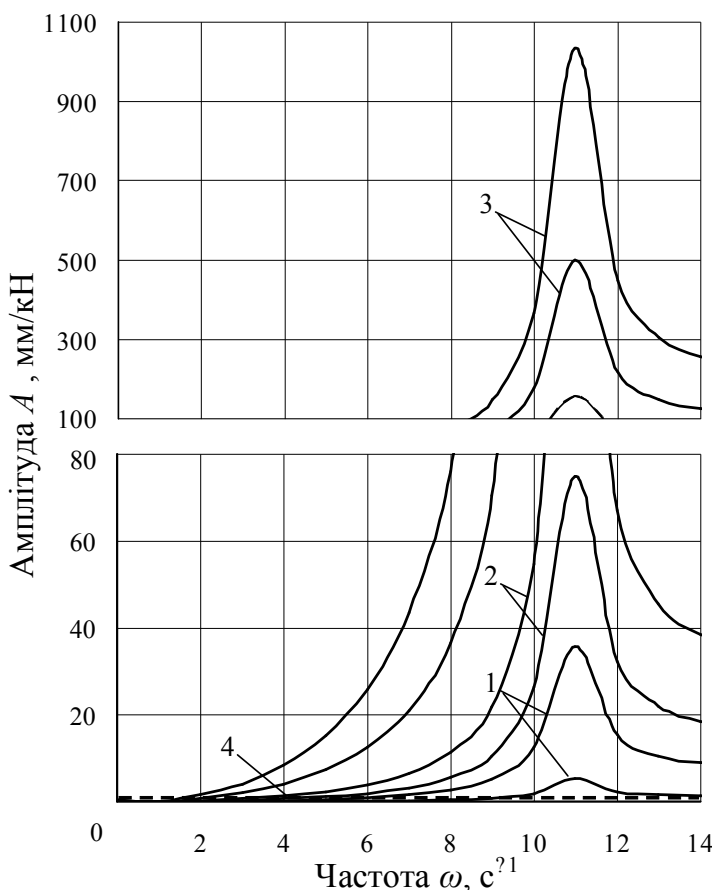
Натомість затримка реакції динамічної системи на вхідне збурювання практично не залежить від жорсткості пневматичної шини і становить приблизно рівню 3 рад (рис. 14).

Рис. 14 – Фазово-частотні характеристики відпрацювання остовом агрозасобу коливань профілю шляху з різним типорозміром та жорсткістю $C_{ш}$ шин його коліс: 1 – 11,2R20 (254 кН/м); 2 – 9,5R32 (292 кН/м); 3 – 11,2R32 (296 кН/м); 4 – 450 кН/м; 5 – 150кН/м; 6 – бажана характеристика

З точки зору бажаності відпрацювання технологічною частиною агрозасобу ТДАТУ коливань нерівностей профілю агрофону збільшення її маси з 300 до 500 кг призводить до небажаного підйому амплітудно-частотних характеристик разом із зміщенням резонансних піків у бік низьких частот. При цьому необхідна жорсткість шин опорних коліс технологічної частини агрозасобу суттєво залежить від спектру частот коливань нерівностей поздовжнього профілю агрофону. Якщо спектр вказаних частот зосереджений у високочастотному діапазоні $\omega > 13 \text{ c}^{-1}$, то зменшення ко-

ефіцієнта жорсткості шини до 25 кН/м наближає амплітудно-частотні характеристики до ідеальних. Але практично досягти такої жорсткості пневматичної шини дуже проблематично. Натомість, якщо спектр вказаних частот зосереджений в діапазоні $\omega = 0 \dots 20 \text{ с}^{-1}$, то використання шин з коефіцієнтом жорсткості більшим за 200 кН/м дозволяє мати величину коефіцієнта підсилення не більше 2, і це лише тільки на більш високій частоті.

У порівнянні з поздовжнім профілем нерівностей слідів постійної технологічної колії колювання тягового опору с.-г. знаряддя здійснюють значно менший вплив на вертикальні переміщення агрозасобу. Останні суттєво залежатимуть від місця розміщення технологічної частини відносно зони його міжколісного простору. Аналізом розрахованих амплітудно-частотних характеристик (рис. 15) встановлено, що у варіанті центрального навішування с.-г. знарядь на агрозасіб динаміка його руху у



вертикальній площині суттєво гірша, в порівнянні із варіантом їх навішування позаду агрозасобу. Так, підсилення збурювального впливу для горизонтальної та вертикальної складових тягового опору на резонансній частоті $\omega = 11 \text{ с}^{-1}$ сягає 20 і 30 разів, що не є бажаним. Тому, тільки варіант компонування агрозасобу за яким місце розміщення навісного механізму знаходиться позаду нього позитивно наближає амплітудно-частотні характеристики до ідеальних.

Рис. 15 – Амплітудно-частотні характеристики відпрацювання остовом агрозасобу колювань горизонтальної R_x (менша амплітуда) і вертикальної R_z (більша амплітуда) складових тягового опору технологічної частини за різними варіантами її розміщення: 1 – позаду агрозасобу; 2 – над задніми колесами; 3 – в зоні міжколісного простору; 4 – ідеальна характеристика

З позиції максимального зменшення опорними колесами технологічної частини агрозасобу ущільнюючого впливу на ґрунт в плодоносній зоні поля кут нахилу центральної тяги його навісного механізму повинен перебувати в межах $\theta_1 = 25 \dots 35$ град, а нижніх тяг θ_2 – мати від'ємне значення (рис. 16). За таким налаштуванням тяг навісного механізму агрозасобу величина нормальної реакції на опорних колесах технологічної частини зменшена майже вдвічі. Однак при цьому небажано, але допустимо (до 30%), знижується і вертикальне навантаження на передніх колесах агрозасобу.

Зміною кутів нахилу верхньої і нижньої тяги навісного механізму агрозасобу можна змінювати (бажано зменшувати) величину реакції на опорних колесах технологічної частини, але не більше ніж на 50%. У такій ситуації на практиці додаткове вико-

ристання регулятора для коригування нормального навантаження на опорних колесах технологічної частини агрозасобу дозволить досягти практично повного виключення ущільнюючого впливу на ґрунт його ходових систем в плодоносній зоні поля.

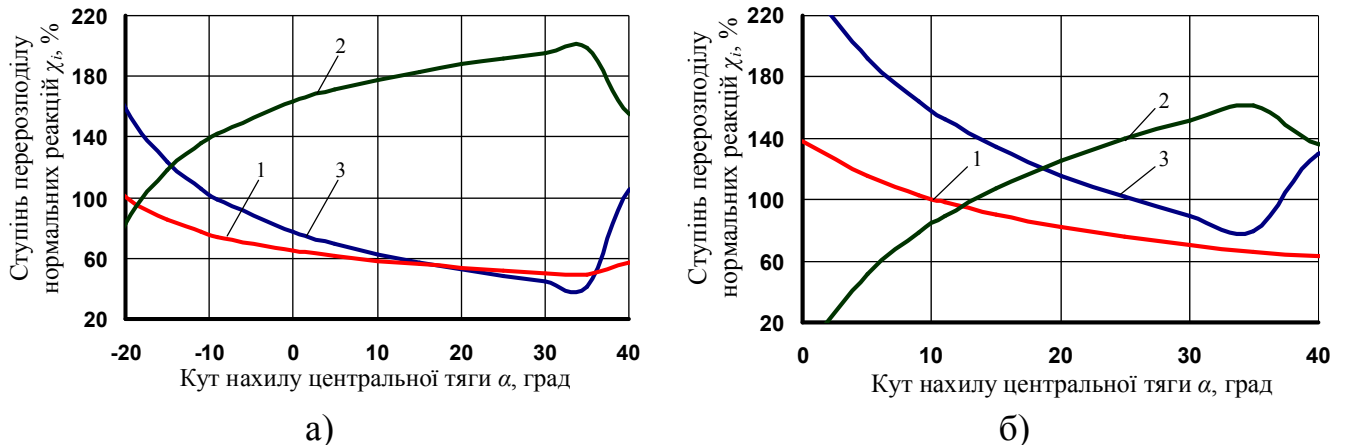


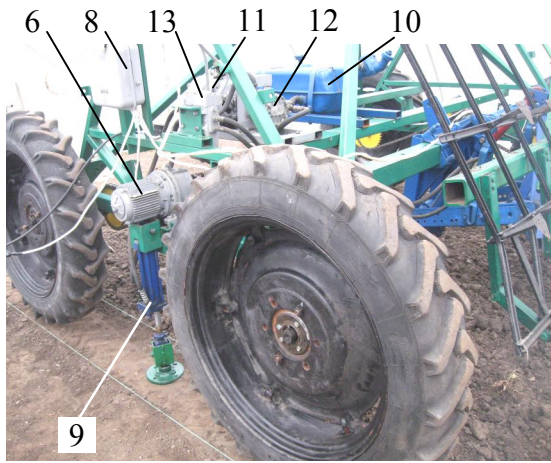
Рис. 16 – Ступінь перерозподілу нормальних реакцій на передніх (1), задніх (2) колесах агрозасобу ТДАТУ і опорних колесах технологічної частини (3) від кута нахилу θ_1 центральної тяги навісного пристрою при від'ємному ($\theta_2 = -10$ град) (а) і позитивному ($\theta_2 = 10$ град) (б) нахилі нижніх тяг

В третьому розділі «Технічна оснащеність та методологічне забезпечення експериментальних досліджень» викладено програму і методику проведення лабораторно-польових експериментальних досліджень.

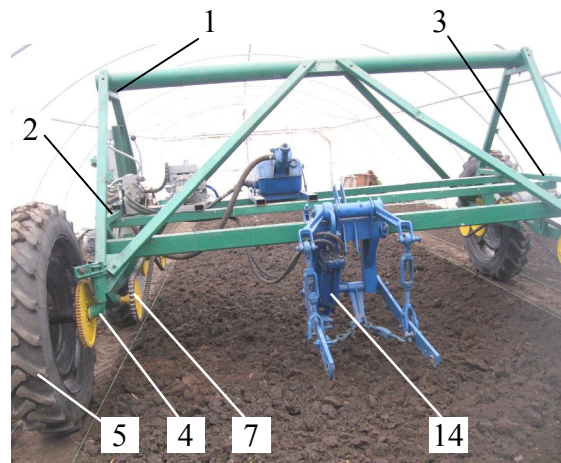
У процесі виконання експериментів передбачалося: визначення масово-геометричних і кінематичних характеристик ширококолісного агрозасобу ТДАТУ; перевірка математичних моделей його функціонування на адекватність; визначення характеристик ґрунтової поверхні слідів постійної технологічної колії та їх вплив на тягово-зчіпні та енергетичні властивості агрозасобу при його русі по ній; визначення статистичних характеристик вхідних збурювань, що сприймаються агрозасобом у процесі його роботи; вивчення закономірностей впливу параметрів агрозасобу і системи його водіння по слідам постійної технологічної колії на показники його поворотності і керованості; визначення технічної ефективності використання с.-г. агрегатів, побудованих на основі ширококолісного агрозасобу ТДАТУ, при реалізації ними принципово нових технологічних процесів з обробітку ґрунту і внесення технологічних матеріалів в ґрунт в умовах колійної системи землеробства; вивчення впливу параметрів і режимів роботи ширококолісного агрозасобу ТДАТУ на енергетичні показники роботи с.-г. агрегатів для обробітку ґрунту і внесення мінеральних добрив та встановлення відповідності його функціонування основним принципам ефективного впровадження колійного землеробства; вивчення закономірностей впливу параметрів ширококолісних агрозасобів на економічну ефективність їх функціонування в умовах колійної системи землеробства.

Експериментальні дослідження проводилися у тепличному комплексі, на базі якого була спеціально обладнана лабораторія для випробування ширококолісного агрозасобу ТДАТУ з довжиною залікової ділянки рівною 50 м.

Фізичними об'єктами досліджень були с.-г. агрегати, призначені для проведення обробітку ґрунту і внесення мінеральних добрив в ґрунт, які побудовані на основі ширококолісного засобу ТДАТУ (рис. 17).



а) вид збоку



а) вид ззаду

Рис. 17 – Будова ширококолісного агрозасобу ТДАТУ: 1 – остов-рама; 2, 3 – ліва і права платформи; 4 – кронштейни; 5 – колеса; 6 – мотор-редуктори; 7 – механізми приводу коліс; 8 – блок-шафа з пристроями керування; 9 – силові домкрати; 10 – бак для гідрорідини; 11 – електричний двигун приводу технологічного обладнання; 12 – гідронасос; 13 – гідророзподільник; 14 – навісний механізм

Коротка технічна характеристика агрозасобу ТДАТУ

Експлуатаційна маса – 1158 кг
 Потужність приводних двигунів – 3,0 кВт
 Мотор-редуктори – 1МПз2-40-35,5-110У3
 Тип двигуна – АИР80В6

Ширина колії коліс – 3,5 м
 Поздовжня колісна база – 2,3 м
 Шини коліс – 9,5R32
 Спосіб повороту – силовий (бортовий)

В процесі проведення експериментальних досліджень агрозасіб ТДАТУ агрегувався з с.-г. машинами та знаряддями, представленими на рис. 18.



а)



б)



в)



д)

Рис. 18 – Ширококолісний агрозасіб ТДАТУ в складі с.-г. машин/знарядь під час проведення досліджень: а) зубові борони (типу БЗСС-1,0); б) ротаційна борона; в) S-подібний розпушувач; д) електрифікований розкидувач мінеральних добрив

Керування роботою всіх силових механізмів агрозасобу ТДАТУ для його руху по слідам постійної технологічної колії здійснювалося в ручному режимі за допомогою оператора та безоператорному режимі. Ручне керування агрозасобом ТДАТУ здійснювалося з пульта керування, який був під'єднаний до пристроїв його живлення, які розміщувалися у його блок-шафі. Безоператорне паралельне водіння агрозасобу ТДАТУ з бортовим (силовим) способом його повороту по слідам постійної технологічної колії здійснювалося за допомогою лазерного променя в якості задатчика траєкторії.

Для реєстрації частини вимірюваних параметрів, таких як тяговий опір агреатованих с.-г. машин/знарядь (R_p); оберти ведучих коліс агрозасобу (n_k); тривалість ($\tau_{p\partial l}$) та частота керуючого впливу при зміні обертів на колесах агрозасобу з одного його борта для відновлення прямолінійного руху внаслідок відхилення від нього використовували вимірювально-реєстраційний комплекс, основу якого складала аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) та ПК (рис. 19).

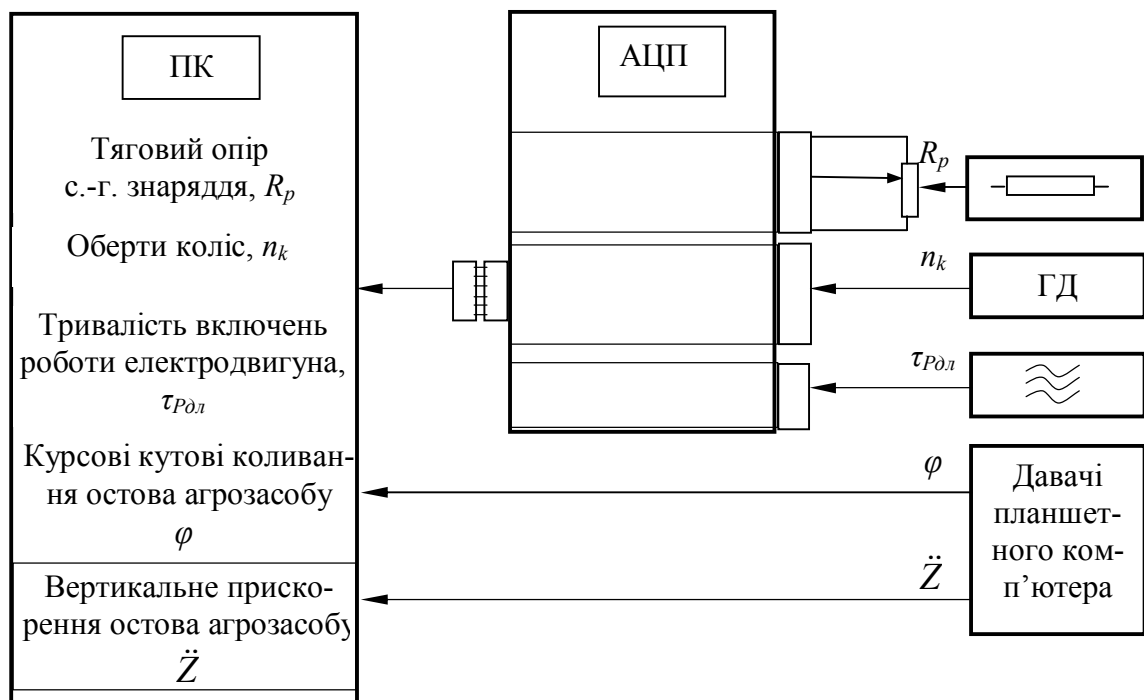


Рис. 19 – Блок схема вимірювально-реєстраційного комплексу: ПК – комп'ютер; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ГД – герконовий давач; R_p – тяговий опір агреатованих с.-г. машин/знарядь; n_k – оберти ведучих коліс агрозасобу; $\tau_{p\partial l}$ – тривалість подачі живлення на електродвигун приводу коліс з одного борту; φ і \ddot{Z} – курсовий кут коливань і вертикальні прискорення остова агрозасобу

Перед основними лабораторно-польовими дослідженнями було проведено попередні експерименти. Аналіз отриманих реалізацій на ПК підтвердив гіпотезу про стаціонарність досліджуваних випадкових процесів: коливань курсового кута ширококолісного агрозасобу та його поперечних зміщень, вертикальних коливань нерівностей ґрунтових слідів постійної технологічної колії, коливань тягового опору агреатованих знарядь тощо. Стосовно ергодичності цих процесів, то в умовах прове-

дення лабораторно-польових досліджень на рівному і практично однорідному по щільності ґрунті дослідної ділянки їх приймали апіорі.

Із отриманих в процесі лабораторно-польових досліджень реалізацій досліджуваних параметрів, у вигляді аналогово-цифрової реалізації сигналів, набирали масив даних в часі. В подальшому за допомогою пакетів прикладних програм сучасних програмних середовищ Mathematica, Statistica, Mathcad, MS Excel розраховували наступні ймовірнісні характеристики для заданого масиву даних: середнє значення; середнє квадратичне відхилення (стандарт); дисперсія; коефіцієнт варіації; похибка вибіркової середньої; нормована кореляційна функція; нормована спектральна щільність.

Похибка безпосереднього вимірювання лінійних конструктивних параметрів та інших величин не перевищувала 0,5%. Погрішність вимірювання часу, а також вагових параметрів була меншою за 1%.

Точність опосередкованих вимірювань (швидкість руху агрозасобу, коефіцієнт буксування його рушіїв тощо) оцінювали за допомогою середньої квадратичної похибки. В цілому достовірність отриманих результатів є такою, при якій число випадків в яких відхилення від закономірностей, установлених в процесі експериментальних досліджень, не перевищувало 10%.

Перевірку математичних моделей функціонування ширококолісного агрозасобу на адекватність здійснювали двома методами. Зокрема, динамічні моделі горизонтальних коливань агрозасобу перевіряли шляхом порівняння теоретичних $A_T(\omega)$ та експериментальних $A_E(\omega)$ амплітудно-частотних характеристик коливань його курсового кута φ і поперечного зміщення x_s (як вихідних величин) при відпрацюванні ним (агрозасобом) вхідного керуючого впливу. А перевірку моделі вертикальних коливань агрозасобу здійснювали шляхом порівняння теоретичної $S_{Ta}(\omega)$ і експериментальної $S_{Ea}(\omega)$ нормованих спектральних щільностей вертикальних коливань остова ширококолісного агрозасобу при відпрацюванні ним нерівностей поздовжнього профілю слідів постійної технологічної колії.

Про кількісну статистичну оцінку адекватності порівнянних теоретичних та експериментальних даних робили висновок за F-критерієм Фішера. Згідно цього критерію перевірялася гіпотеза про рівність порівнюваних дисперсій (теоретичної та експериментальної) коливань вихідної величини. При цьому числа ступенів вільності обиралися рівними 10, оскільки за такою кількістю точок кореляції будувалися графіки спектральної щільності коливань розглядуваних вхідних та вихідних параметрів. В такому випадку критичне значення F-критерію Фішера на статистичному рівні значущості 0,05 становило 2,97, а на рівні 0,01 – відповідно дорівнювало 4,84.

Отримані в цьому розділі результати теоретичних досліджень були враховані при виборі параметрів та режимів роботи с.-г. агрегатів на основі ширококолісного агрозасобу ТДАТУ перед виконанням ними циклу лабораторно-польових досліджень та випробувань.

В четвертому розділі «Аналіз експериментальних досліджень функціонування ширококолісних засобів механізації сільськогосподарського виробництва в умовах колійної системи землеробства» викладено результати лабораторно-польових досліджень характеристик ґрунтових слідів постійної технологічної колії та роботи

комплексу сільськогосподарських машин/знарядь на основі ширококолісного агрозасобу ТДАТУ.

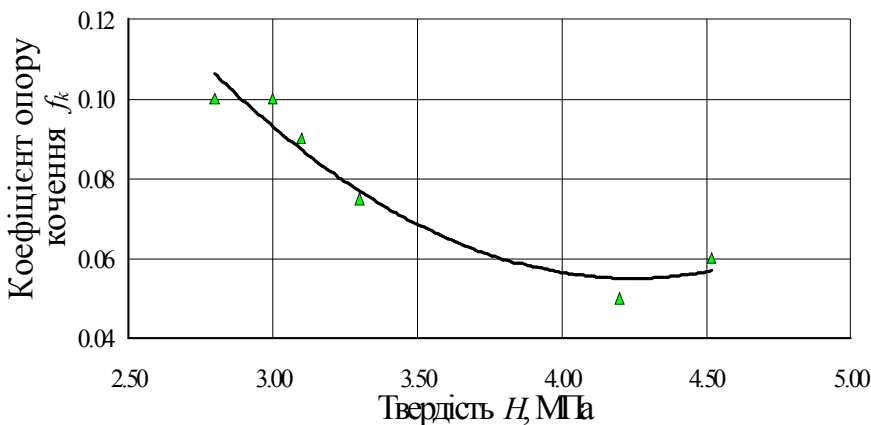
Проведеними експериментальними дослідженнями моніторингу властивостей постійної технологічної колії встановлено, що величина її щільності і твердості істотно залежать від вологості. Зокрема, зі збільшенням останньої з 10 до 28% величина щільності ґрунтового сліду колії зменшується з 1,60 до 1,30 г/см³, а твердості – з 4,5 до 2,8 МПа. Це напряму відображається на погіршенні тягово-зчіпних властивостей ширококолісного агрозасобу при його русі по ґрунтовим слідам постійної технологічної колії. Також при цьому збільшується коефіцієнт опору його кочення з 0,06 до 0,1 (тобто майже на 66%). На стільки ж відсотків зростають витрати потужності на подолання сил опору кочення агрозасобу.

Аналіз отриманих даних показує, що між твердістю і щільністю ґрунтового сліду постійної технологічної колії існує достатньо сильний нелінійний кореляційний зв'язок (квадрат коефіцієнта кореляції зв'язку між цими показниками становить $R^2 = 0,89$), що дозволяє на практиці оцінювати величину одного з них при вимірюванні іншого за виразом:

$$\rho = -0.0547 \cdot H^2 + 0.5592 \cdot H + 0.1629, \quad (16)$$

де ρ – щільність ґрунту в слідах постійної технологічної колії, г/см³; H – твердість ґрунту в слідах постійної технологічної колії, визначеної за системою Ревякіна, МПа.

Кореляційний зв'язок твердості ґрунтового сліду постійної технологічної колії з коефіцієнтом опору кочення агрозасобу є більш сильнішим ($R^2 = 0,9395$), ніж зв'язок щільності ґрунтового сліду з ним (рис. 20). Це також дозволяє достатньо точно аналітичним шляхом визначати витрати потужності на кочення агрозасобу і показ-



ники слідоутворення по експериментально визначеній величині твердості ґрунтового сліду постійної технологічної колії.

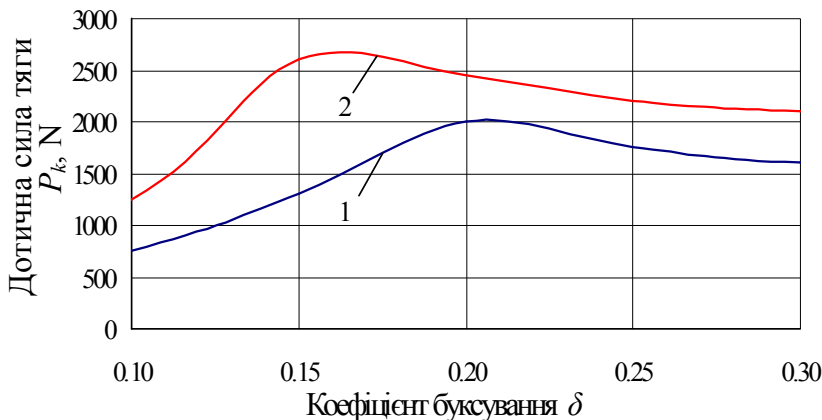
Рис. 20 – Залежність коефіцієнта опору кочення f_k коліс агрозасобу ТДАТУ від твердості H ґрунтового сліду постійної технологічної колії

Зі збільшенням твердості ґрунтового сліду постійної технологічної колії з 2,5 до 4,0 МПа інтенсивно збільшується і величина коефіцієнта об'ємного зминання ґрунту з 4,0 до 45,0 МПа. При подальшому збільшенні твердості ґрунтового сліду постійної технологічної колії збільшення коефіцієнта об'ємного зминання ґрунту практично не спостерігається. В умовах експлуатації з метою зниження коефіцієнта опору кочення коліс ширококолісного агрозасобу при його русі по ґрунтовому сліду постійної технологічної колії необхідно прагнути формувати її як поверхню, що не деформується. Це дозволяє зменшити опір коченню агрозасобу щонайменше удвічі.

З позиції забезпечення щонайкращих зчіпних властивостей і тягоутворення ширококолісного агрозасобу при його русі по ґрунтовому сліду постійної техноло-

гічної колії необхідно при її формуванні досягати якомога більшої твердості (не менше 2,25 МПа). Це дозволяє збільшувати тиск в шинах його коліс до максимально можливого. В іншому випадку максимальна ефективність руху агрозасобу по ґрунтовим слідам постійної технологічної колії може бути досягнута тільки в результаті правильно встановленого тиску повітря в шинах його коліс.

Тягово-зчіпні властивості агрозасобу ТДАТУ при його русі по слідах постійної технологічної колії характеризуються більшою величиною максимальної дотичної сили тяги (приблизно на 30%) та меншою величиною буксування (в межах 0,15...0,17) на відміну від його руху по агрофону, підготовленому під посів (тут величина буксування, за яким колесом агрозасобу реалізується максимальна дотична сила тяги, становила 0,22...0,24) (рис. 21). Це дозволяє збільшувати необхідну швидкість руху агрозасобу з меншою витратою енергії, а також підвищити його тягові



властивості в порівнянні з традиційним трактором в умовах його роботи по с.-г. агрофону.

Рис. 21 – Залежність дотичної сили тяги P_k колеса агрозасобу ТДАТУ від коефіцієнта буксування δ_{max} при його русі по агрофону поля, підготовленого під посів (1), і слідам постійної технологічної колії (2)

Рух ширококолісного агрозасобу по ущільненим слідам постійної технологічної колії супроводжується високими його зчіпними властивостями (величина коефіцієнта зчеплення при цьому збільшується з 0,43 до 0,55), у порівнянні з його рухом по с.-г. агрофону, підготовленому під посів. Цей факт надає можливість на практиці обмежити повсюдне застосування баластування вказаних агрозасобів, на відміну від традиційних тракторів, з метою покращення їх зчіпних властивостей.

Аналіз отриманих експериментальних даних показав (рис. 22), що профіль постійної технологічної колії істотно згладжений в порівнянні з профілем обробленого агрофону. Так, якщо середнє квадратичне відхилення нерівностей профілю обробленого агрофону становив $\pm (1,32...1,44)$ см, то для профілю колії цей показник дорівнює $\pm 0,84$ см, тобто в 1,6–1,8 разів менший.

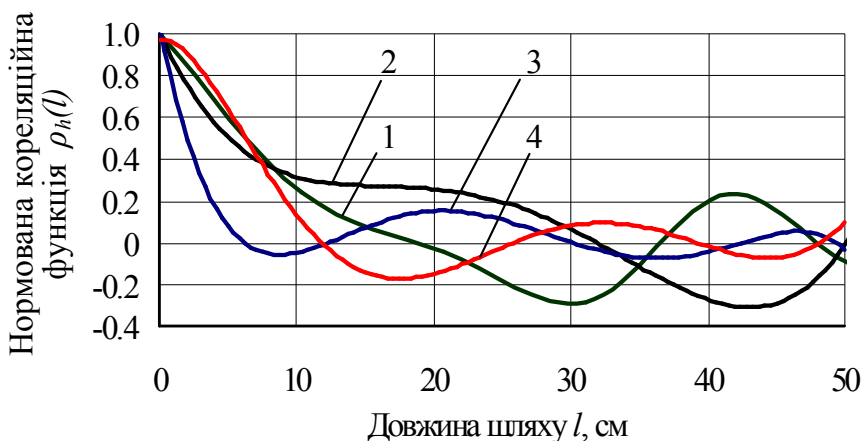


Рис. 22 – Нормовані кореляційні функції $\rho_h(l)$ профілів нерівностей фонів від довжини шляху l : 1 – сліди постійної технологічної колії; 2 – фону після зубової борони; 3 – фону після S-подібного пружинного розпушувача; 4 – фону після ротаційної борони

Основним генератором формування нерівностей поздовжнього профілю ґрун-

тових слідів постійної технологічної колії є параметри ґрунтозацепів шин коліс ширококолієвих агрозасобів. Так, в умовах випробувань агрозасобу ТДАТУ, основна частка дисперсій коливань нерівностей поздовжнього профілю слідів технологічної колії зосереджена в діапазоні частот $0 \dots 0,3 \text{ см}^{-1}$ (рис. 23), що узгоджується із висотою ґрунтозацепів його шин 9,5R32, величина яких дорівнює $0,03 \text{ м}$. Підтвердженням цього є той факт, за яким довжина кореляційного зв'язку ординат нерівностей профілю слідів постійної технологічної колії в умовах випробувань агрозасобу ТДАТУ становить близько $0,18 \text{ м}$, що відповідає кроку ґрунтозацепів його шин, рівному $0,175 \text{ м}$.

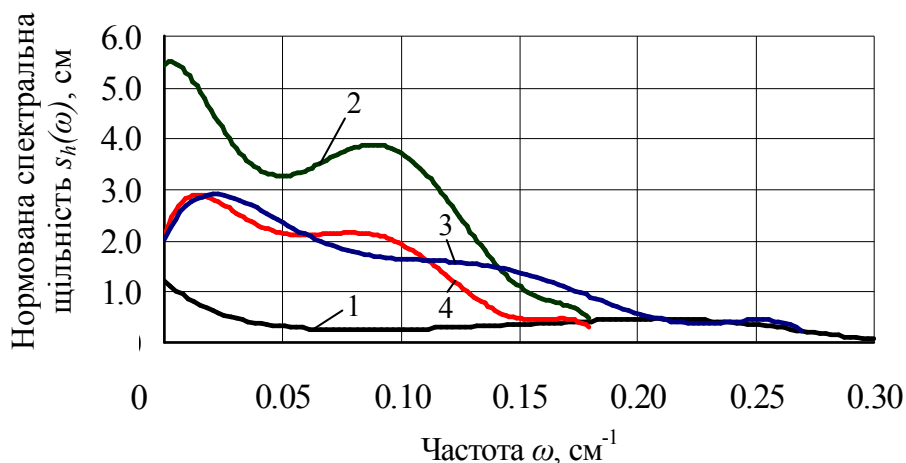


Рис. 23 – Нормовані спектральні щільності $s_h(\omega)$ профілів нерівностей фонів від частоти ω : 1 – сліди постійної технологічної колії; 2 – фонів після зубової борони; 3 – фонів після S-подібного пружинного розпушувача; 4 – фонів після ротаційної борони

Характер коливань нерівностей профілів оброблених агрофонів агрозасобом ТДАТУ із навішеними с.-г. знаряддями (зубовою бороною, S-образним пружинним розпушувачем і ротаційною бороною) є більш плавним, що є наслідком його руху по ущільненим слідам постійної технологічної колії. Основна частка дисперсій коливань нерівностей обробленого агрофону зосереджена в діапазоні частот $0 \dots 0,18 \text{ см}^{-1}$, а довжина їх кореляційного зв'язку приблизно в 2 рази більша за поздовжній профіль нерівностей постійної технологічної колії (див. рис. 23).

Коефіцієнт варіації коливань тягового опору с.-г. знарядь в складі агрегатів на основі агрозасобу ТДАТУ становить не більше 10%, основний спектр їх дисперсій зосереджений в діапазоні частот $0 \dots 8 \text{ с}^{-1}$, а нормовані кореляційні функції цих коливань не містять гармонійних складових. Це свідчить про високу стабільність (низьку варіабельність) процесів обробітку ґрунту ширококолієвим агрозасобом, який рухається по слідам постійної технологічної колії, що позитивно відбивається на його стійкому русі.

Основна продуктивність роботи ґрунтообробних агрегатів на основі агрозасобу ТДАТУ була приблизно однаковою і дорівнювала $1,08 \text{ га/год}$. При цьому питомі витрати енергії становили на рівні $1,66 \text{ кВт/га}$. В той час як для аналогічних традиційних машинно-тракторних агрегатів з такою же шириною захвату вони дорівнюють близько $2,77 \text{ кВт/га}$. З цього випливає, що питомі витрати енергії на 1 га оброблювальної площі новими агрегатами на основі агрозасобу ТДАТУ при цьому менші на 40%.

Якість обробітку ґрунту агрегатами на основі агрозасобу ТДАТУ приблизно така ж, як і у аналогічних традиційних машинно-тракторних агрегатів.

Спектр коливань керуючого впливу під час виконання агрозасобом робочого руху при силовому (бортовому) способі його повороту є низькочастотним. Основ-

ний спектр дисперсій цього параметра зосереджений в діапазоні частот $0 \dots 2,0 \text{ c}^{-1}$ (рис. 24). Практично в такому ж діапазоні частот зосереджена і дисперсія коливань вихідного параметру, тобто курсового кута φ агрозасобу ТДАТУ. Стандарт коливань цього параметру дорівнював $\pm 0,014$ рад.

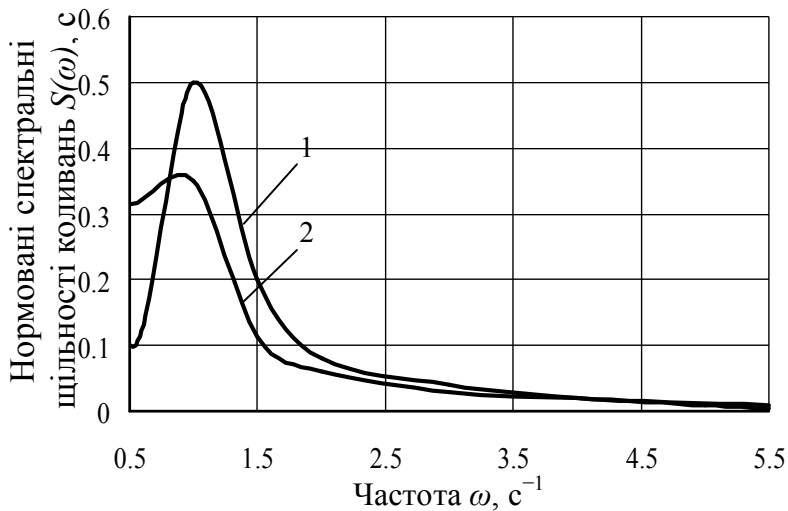


Рис. 24 – Нормовані спектральні щільності коливань керуючого впливу (1) та курсового кута (2) агрозасобу ТДАТУ

Коливання поперечного зміщення ширококолісного агрозасобу ТДАТУ в складі боронувального агрегату під час виконання ним робочого руху також є низькочастотними (рис. 25). Основний спектр дисперсій цих коливань зосереджений в діапазоні частот $0 \dots 2,0 \text{ c}^{-1}$. Стандарт коливань цього параметру дорівнював $\pm 0,05$ м.

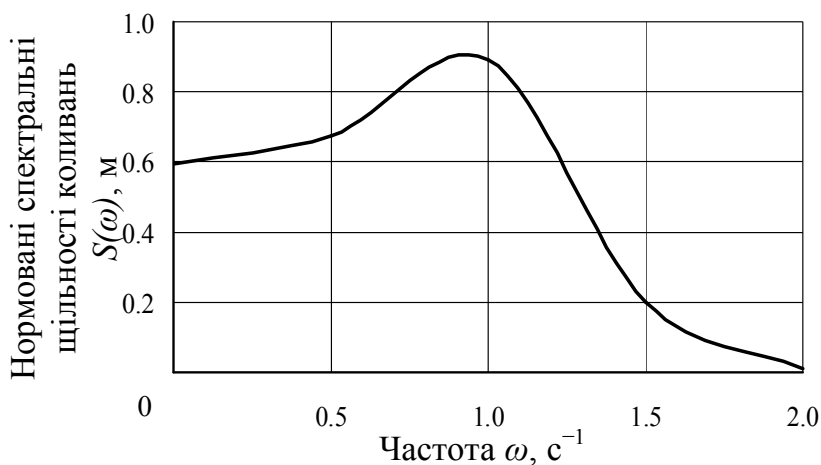


Рис. 25 – Нормовані спектральні щільності коливань лінійного поперечного зміщення x_s агрозасобу ТДАТУ

Проведеними дослідженнями встановлено, що реалізація ширококолісним агрозасобом з бортовим (силовим) способом його повороту вимагає значно меншої різниці моментів, підведених до коліс правого і лівого його бортів, в порівнянні з традиційним гусеничним трактором. Ця різниця пропорційна ширині колії агрозасобу при відносно меншій величині його колісної бази.

Отримання найменших енергетичних витрат на виконання бортового (силового) повороту ширококолісного агрозасобу можна досягти при рівності за абсолютною величиною, але протилежних за напрямком, бічних деформацій шин коліс його лівого і правого бортів. Для цього бортовий (силовий) поворот агрозасобу слід здійснювати таким чином, щоб миттєвий центр його повороту знаходився на осі поперечної симетрії його шасі.

Загальна тривалість часу на виконання маневру силового (бортового) повороту агрозасобу ТДАТУ становить близько 1 хв (0,0168 год), що знаходиться на рівні повороту традиційних широкозахватних машинно-тракторних агрегатів. За можливість здійснювати цей процес в автоматичному режимі отриману тривалість часу на виконання маневру повороту агрозасобом можна зменшити щонайменше вдвічі.

Експериментальними дослідженнями доведено, що режим роботи відцентро-

вого робочого органа розкидача добрив залежить від ширини колії агрозасобу за умови їх не потрапляння на технологічні колії під час виконання цього технологічного процесу. Встановлено, що для агрозасобу ТДАТУ з шириною колії 3,5 м кутова швидкість обертання однодискового відцентрового робочого органа має становити 15,5 рад/с. При такій кутовій швидкості обертання робочого органа розкидача мінеральні добрива, розсіюючись в агротехнічній зоні поля, не досягають транспортних доріжок постійної технологічної колії. Витрати потужності на привід електрифікованого розкидача добрив при цьому склали 0,35 кВт, що відповідає 14% відносних витрат ефективної потужності енергоустановок агрозасобу.

Також проведеними дослідженнями зазначено, що агрегування ширококолієного агрозасобу ТДАТУ, його ручне та безоператорне керування, а також виконання ним силового (бортового) способу повороту не створює будь-яких проблем, як для оператора, так і подальшої автоматизації цих процесів.

Опанування розроблених методологічних засад оцінювання технологічних властивостей ширококолієних агрозасобів в роботі було представлено на прикладі кількісної оцінки їх потенційної продуктивності, вираз для якої має вигляд:

$$W_p = \frac{(K - b_c - c)\eta_t \chi_d k_N N_e \tau}{\varphi_w G_e}, \quad (17)$$

де K і b_c – ширина колії і шин рушіїв агрозасобу, м; c – ширина технологічного допуску, м; η_t – тяговий коефіцієнт корисної дії ширококолієного агрозасобу; χ_d – коефіцієнт можливого завантаження двигуна моментом опору; k_N – коефіцієнт можливого використання потужності двигуна; N_e – номінальна експлуатаційна потужність енергетичних установок, Вт; φ_w – коефіцієнт використання ваги ширококолієного агрозасобу; G_e – експлуатаційна вага ширококолієного агрозасобу, Н.

Чисельний розрахунок виразу (16) показав, що для ширококолієних агрозасобів в діапазоні зміни ширини їх колій від 3 до 9 м, величина потенційної продуктивності знаходиться в інтервалі від 3 до 10,5 га/год відповідно (табл. 1). Практично такий результат перевищує потенційну продуктивність традиційних машинно-тракторних агрегатів в 1,5-2 рази, що підтверджує ефективність та перспективність використання ширококолієних агрозасобів в колійній системі землеробства з позиції більш кращих їх технологічних властивостей.

Таблиця 1 – Потенційна продуктивність W_p (га/год), яку повинні мати сучасні спеціалізовані ширококолієні агрозасоби в залежності від ширини їх колії K і ширини шин рушіїв b_c

Ширина шин рушіїв b_c агрозасобу	Потенційна продуктивність W_p (га/год) агрозасобу в залежності від ширини його колії K (м)		
	$K = 3$ м	$K = 6$ м	$K = 9$ м
$b_c = 0,4$ м	3,04	6,86	10,67
$b_c = 0,5$ м	2,85	6,67	10,48
$b_c = 0,6$ м	2,66	6,48	10,29

Економічний ефект від упровадження колійної системи землеробства на вирощуванні озимої пшениці та використання ширококолієних агрозасобів за рахунок економії енергетичних витрат, посівного матеріалу і підвищення врожайності становить щонайменше 1750 грн/га.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена проблема підвищення ефективності роботи ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва шляхом розроблення і впровадження механіко-технологічних основ їх використання в умовах колійної системи землеробства. На основі проведених досліджень зроблені такі основні висновки.

1. Аналіз досліджень з реалізації основних принципів колійної системи землеробства традиційними тракторно-комбайновими технологіями показав їх низьку ефективність. Зазначено, що найбільш перспективним і доцільним в умовах колійного землеробства є використання ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва. Доведено, що їх потенційні техніко-експлуатаційні та технологічні властивості здатні розв'язати проблему ущільнення і деградації ґрунтів, забезпечити економію енергії і витрат на сільськогосподарські технологічні операції до 55 % та отримати інші суттєві переваги.

2. За отриманим рівнянням балансу потужності ширококоліїного агрозасобу, який рухається по ґрунтовим слідам постійної технологічної колії, встановлено, що величина його енергонасиченості має дорівнювати 12,5 кВт/т при швидкісному режимі до 5 км/год та 23,5 кВт/т на швидкості руху 10 км/год. Доведено, що тягове зусилля, яке він здатний розвивати при русі по ущільненому ґрунтовому сліду постійної технологічної колії, становить 6,37 кН на кожну тонну його експлуатаційної маси. А це дозволяє розвивати ним на 40% вищі тягово-енергетичні показники в порівнянні з традиційним колісним трактором при його русі по типовому с.-г. агрофону.

3. Розроблено математичні моделі та алгоритми, що дозволяють здійснювати взаємообумовлений вибір конструктивних параметрів ширококоліїних засобів механізації с.-г. виробництва, зокрема, ширину його колії і рушіїв, умов стійкого руху (що враховано величиною технологічного допуску) та параметрів земельної ділянки поля для її облаштування постійною технологічною колією. Математичним аналізом отриманих моделей обґрунтовано раціональну ширину колії вказаних агрозасобів на рівні 7,5...9 м, за якою втрати площі поля під інженерну зону при їх використанні становлять не більше 5...6%.

4. Обґрунтовані нові схеми повороту ширококоліїного агрозасобу та розроблені математичні моделі його плоскопаралельного руху на поворотній смузі за кінематичним принципом його здійснення, шляхом обертання керованими колесами з одного борту навколо центру, розташованого в центрі міжколісного простору з іншого борту, а також силовим (бортовим), які дозволяють оцінити вплив його конструктивних, кінематичних і силових параметрів на критерії статичної та динамічної поворотності. Математичним аналізом отриманих моделей обґрунтовано кінематичний показник режиму його повороту, значення якого в залежності від ширини колії ширококоліїного агрозасобу збільшується з 5,8 м/рад до 30 м/рад. Через це доведено, що швидкісний режим його повороту за вказаним способом повинен бути не більшим за 1 м/с, а відношення його колісної бази до ширини колії повинно бути якомога меншим.

5. Розроблені адекватні математичні моделі плоскопаралельного руху ширококоліїного агрозасобу за кінематичним та силовим способами його керування, які

дозволяють оцінити вплив його схеми, конструктивних параметрів, режимів роботи та параметрів керуючого впливу на його керованість і стійкість у горизонтальній площині. Теоретичними дослідженнями встановлено, що для забезпечення найкращої стійкості ширококолієного агрозасобу місце розміщення його технологічної частини повинно знаходитися усередині його колісної бази, а швидкість його робочого руху має бути близькою 1 м/с.

Для забезпечення найкращої керованості ширококолієного агрозасобу бажана частота коливань кута повороту його керованих коліс має знаходитися на рівні $0,5 \text{ с}^{-1}$. Збурення, які викликані кутовими коливаннями в горизонтальній площині с.-г. машин/знарядь, не здійснюють суттєвого впливу на стійкість його руху тільки тоді, коли миттєвий центр повороту навісного механізму знаходиться в зоні центра мас агрозасобу. Через це доведено, що з позиції проектування універсального навісного пристрою для ширококолієних агрозасобів слід передбачити можливість його налаштування, як за трьохкрапковою, так і за двокрапковою схемами.

6. З позиції отримання щонайменших поперечних зміщень робочих органів с.-г. машин/знарядь в процесі роботи ширококолієного агрозасобу ширина його колії, амплітуди його кутових курсових коливань та віддаленість робочих органів від його кінематичного центру мають бути якомога меншими. Для робочих органів просапного культиваторного агрегату, розташованих назовні, відносно геометричної осі рядка просапної культури і центру ширококолієного агрозасобу, величина захисної зони повинна бути більшою, ніж для внутрішніх (приблизно на 3 см). Тільки в цьому випадку ймовірність пошкоджуваності культурних рослин не перевищує 1%.

7. Розроблені адекватні математичні моделі плоскопаралельного руху ширококолієного агрозасобу у поздовжньо-вертикальній площині дали можливість встановити, що з точки зору бажаності відпрацювання ним коливань нерівностей слідів постійної технологічної колії збільшення коефіцієнта жорсткості шин його коліс є ефективним на частотах збурення, більших за $7,0 \text{ с}^{-1}$. При цьому дисперсії коливань нерівностей профілю постійної технологічної колії мають зосереджуватися в частотних діапазонах $0...7$ і $13...20 \text{ с}^{-1}$, оскільки саме в них наближають амплітудно-частотні характеристики до ідеальних. Практично досягти цього можна відповідною технологією формування слідів постійної технологічної колії або зміною жорсткості пневматичної шини.

8. Збільшення маси технологічної частини ширококолієного агрозасобу ТДАТУ з 300 до 500 кг призводить до небажаного підйому амплітудно-частотних характеристик відпрацювання ним нерівностей поздовжнього профілю агрофону з одночасним зміщенням резонансних піків у бік низьких частот. А її розміщення повинно знаходитися позаду коліс агрозасобу, що позитивно наближає амплітудно-частотні характеристики до ідеальних.

9. Через близькість розміщення навісного механізму ширококолієного агрозасобу до його центру мас кут нахилу центральної тяги навісного механізму повинен перебувати в межах $25...35$ град, а нижніх тяг – мати від'ємне значення, що дозволяє максимально зменшити (але не більше ніж на 50%) ущільнюючий вплив рушіїв ходових систем на ґрунт в плодоносній зоні поля.

10. Проведеними лабораторно-польовими дослідженнями доведено, що із збільшенням вологості ґрунтового сліду постійної технологічної колії від 10 до 28%

величина його щільності та твердості зменшується з 1,60 до 1,30 г/см³ та з 4,5 до 2,8 МПа відповідно. При цьому погіршуються (майже на 66%) тягово-зчіпні властивості ширококолійного агрозасобу та збільшується коефіцієнт опору його кочення з 0,06 до 0,1. Зі збільшенням твердості ґрунтового сліду постійної технологічної колії з 2,5 до 4,0 МПа інтенсивно збільшується і величина коефіцієнта об'ємного зминання ґрунту з 4,0 до 45,0 МПа. При подальшому збільшенні твердості ґрунтового сліду постійної технологічної колії збільшення коефіцієнта об'ємного зминання ґрунту практично не спостерігається. В умовах експлуатації з метою зниження коефіцієнта опору кочення ширококолійного агрозасобу при його русі по ґрунтовому сліду постійної технологічної колії необхідно прагнути формувати її як не деформуєму поверхню, що дозволяє зменшити опір коченню агрозасобу щонайменше удвічі.

11. Рух ширококолійного агрозасобу по слідах постійної технологічної колії супроводжується реалізацією його ведучими колесами більшої (на 30%) дотичної сили тяги, максимум якої припадає на меншу величину коефіцієнта буксування рушіїв (0,15...0,17) на відміну від його руху по агрофону, підготовленому під посів, де ця величина знаходиться на рівні 0,22...0,24. Також при цьому підвищується коефіцієнт зчеплення рушіїв агрозасобу з ґрунтом з 0,43 до 0,55, що підтверджує факт підвищення його тягових і зчіпних властивостей в умовах колійної системи землеробства.

12. Проведеними лабораторно-польовими дослідженнями встановлено, що коливання нерівностей поздовжнього профілю ґрунтових слідів постійної технологічної колії носять низькочастотний характер. Основним генератором їх формування є параметри ґрунтозачепів шин коліс ширококолійних агрозасобів. Характер коливань нерівностей профілів оброблених агрофонів ґрунтообробними агрегатами на основі агрозасобу ТДАТУ є більш вирівняним (середнє квадратичне відхилення амплітуд нерівностей в 1,6-1,8 разів при цьому менші). Коефіцієнт варіації коливань їх тягового опору становить не більше 10%, основний спектр дисперсій зосереджений в діапазоні частот 0...8 с⁻¹, а нормовані кореляційні функції цих коливань не містять гармонійних складових. Це свідчить про високу стабільність процесів обробітку ґрунту ширококолійним агрозасобом. При цьому якість обробітку ґрунту приблизно така ж, як і у аналогічних традиційних машинно-тракторних агрегатів. Але питомі витрати енергії на 1 га оброблювальної площі новими ширококолійними агрегатами при цьому менші на 40%.

13. Оцінюванням потенційної продуктивності ширококолійних агрозасобів доведено, що в діапазоні ширини їх колій від 3 до 9 м, значення цього показника знаходиться в інтервалі від 3 до 10,5 га/год відповідно. Практично такий результат перевищує потенційну продуктивність традиційних машинно-тракторних агрегатів в 1,5-2 рази, що підтверджує ефективність та перспективність використання ширококолійних засобів механізації в колійній системі землеробства з позиції більш кращих їх технологічних властивостей. Порівняно з традиційними тракторно-комбайновими технологіями економія коштів від упровадження колійної системи землеробства на вирощуванні озимої пшениці та використання ширококолійних агрозасобів за рахунок економії енергетичних витрат, посівного матеріалу і підвищення врожайності становить щонайменше 1750 грн/га.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Ivanovs S., Bulgakov V., Kuvachov V. et al. Experimental checking of mathematical models describing the functioning adequacy of bridge systems in agricultural track system. *INMATEH-Agricultural Engineering*. Vol. 62, No. 3 / 2020. P.107-114 (експериментально отримані кореляційно-спектральні характеристики кутових коливань і поперечних зміщень ширококолісного засобу).
2. Bulgakov V., Ivanovs S., Kuvachov V. et al. Simulation of the flat-parallel movement of a bridge agricultural unit with an articulated frame. *Rural sustainability research*. 2020. 44(339). P. 8-14 (отримано математичну модель плоско-паралельного руху ширококолісного агрозасобу в горизонтальній площині при кінематичному способі його повороту шляхом зміщення напіврам та амплітудо- і фаза-частотні характеристики відпрацювання динамічною системою керуючих та збурювальних впливів).
3. Bulgakov V., Adamchuk V., Kuvachov V. et al. Theoretical justification of the turn of a wide span tractor (vehicle) for controlled traffic farming. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 53, №3. P. 159–167 (отримано математичну модель руху ширококолісного засобу на повороті за новим способом).
4. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Кувачов В.П. та ін. Дослідження автоматичного водіння мобільного мостового агрозасобу по слідах постійної технологічної колії. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2020. Вип. №11 (110). С. 12-26 (методика та аналіз результатів експериментальних досліджень).
5. Bulgakov V., Adamchuk V., Kuvachov V. et al. Study of effectiveness of controlled traffic farming system and wide span self-propelled gantry-type machine. *Research in Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 64(1). P. 1–7 (розроблено методику оцінки економічної ефективності використання ширококолісних засобів в колійній системі землеробства).
6. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Кувачов В.П. та ін. Дослідження властивостей постійної технологічної колії, яку використовують при мостовому землеробстві. *Вісник аграрної науки*. 2020. №8. С. 62-69 (експериментально отримані показники властивостей постійної технологічної колії).
7. Bulgakov V., Kuvachov V., Nozdrovický L. et al. The study of movement of the wide span tractor-based field machine unit with power method of its control. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. №4. P. 163–168 (отримано математичну модель плоско-паралельного руху ширококолісного агрозасобу в горизонтальній площині при силовому способі його повороту та амплітудо- і фаза-частотні характеристики відпрацювання динамічною системою керуючих та збурювальних впливів).
8. Bulgakov V., Pascuzzi S., Kuvachov V. et al. Theoretical study of transverse offsets of wide span tractor working implements and their influence on damage to row crops. *Agriculture*. 2019. №9 (144). 10 p (отримані математичні моделі поперечних зміщень робочих органів ширококолісного засобу та ймовірність пошкоджуваності рослин у рядку внаслідок їх поперечних зміщень).
9. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Кувачов В.П. та ін. Дослідження кочення рушіїв мостових агрозасобів по слідах постійної технологічної колії. *Вісник аграрної науки*. 2020. №10. С. 48-56 (методика експериментальних досліджень та аналіз результатів оцінювання тягово-зчіпних властивостей ширококолісного засобу).
10. Кувачов В.П., Куценко Ю.М., Ковальов О.В. Електрифікований агро модуль – ефективне рішення проблем механізації сільськогосподарського виробництва. *Праці*

ТДАТУ. 2012. Вип. 12, т. 2. С. 86–92 (оцінено тягово-енергетичні характеристики електрифікованого ширококоліїного засобу).

11. Кувачов В.П. Мостове землеробство на базі дощувальних машин. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2012. Вип. 2, т. 5. С. 15–23.

12. Кувачов В.П. Землевикористання при облаштуванні поля для роботи енерготехнологічних засобів мостового типу. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2013. Вип.1, т.3. С.116–126.

13. Кувачов В.П. Обґрунтування енергонасиченості спеціалізованих самохідних енерготехнологічних засобів мостового типу. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2014. Вип.4, т.2. С. 124–131.

14. Кувачов В.П. Спеціалізований транспортний засіб для колійного землеробства. *Вісник ХНТУСГ*. 2014. № 148. С. 63–69.

15. Кувачов В.П. До питання вибору шин спеціалізованих ширококоліїних засобів сільськогосподарського призначення. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2015. Вип. 5, т.1. С. 14–21.

16. Кувачов В.П. Оцінка стійкості руху ширококоліїних енерготехнологічних засобів механізації сільськогосподарського виробництва. *Праці ТДАТУ*. 2015. Вип. 15, т. 3. С. 204–210.

17. Надикто В.Т., Кувачов В.П. Оцінка керованості руху ширококоліїних енерготехнологічних засобів механізації сільськогосподарського виробництва. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2016. Вип. 6., т.1. С. 99–110 (отримано закономірності впливу схеми та параметрів ширококоліїного засобу на його керованість).

18. Кувачов В.П. Кінематика повороту ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства. *Вісник Сумського НАУ*. 2016. Вип. 10/2 (30). С. 46–49.

19. Кувачов В.П. До питання конструювання спеціалізованих ширококоліїних енерготехнологічних транспортних засобів для колійної системи землеробства. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2016. Вип. 46. С. 72–78.

20. Кувачов В.П. Визначення показника режиму поворотності ширококоліїного агрозасобу для колійної системи землеробства. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2016. Вип. 6, т.3. С. 171–177.

21. Кувачов В.П. Механіко–технологічні основи використання спеціалізованих ширококоліїних агрозасобів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. Вип. 2 (97). С. 161–166.

22. Кувачов В.П. Дослідження технологічних властивостей спеціалізованого ширококоліїного агрозасобу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. Вип. 1 (96). С. 30–36.

23. Кувачов В.П. Дослідження плавності ходу спеціалізованого ширококоліїного агрозасобу. *Вісник аграрної науки*. 2017. №4. С. 46–53.

24. Кувачов В.П. Теоретичні основи статичної та динамічної поворотності спеціалізованого ширококоліїного агрозасобу. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №8. С. 210–218.

25. Кувачов В.П. Дослідження ефективності колійної системи землеробства. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2017. Вип. 5(104). С. 94–104.

26. Adamchuk V.V., Bulgakov V.M., Kuvachov V.P. et al. Mathematical modelling of the movements of tractor working tools in controlled traffic farming. *Agricultural Science and Practice*. 2017. Vol. 4, №2. P. 64–73 (отримано закономірності впливу схеми та параметрів ширококоліїного засобу на характеристики його поперечних зміщень, точку візування та ймовірність пошкодження культурних рослин робочими органами).

27. Адамчук В.В., Булгаков В.М., Кувачов В.П. Теоретичне дослідження руху робочих органів ширококоліїного агрозасобу. *Вісник аграрної науки*. 2017. №10. С. 44–50 (схема щільності асиметричного розподілу ймовірності зміщень робочих органів по обидва боки від заданого напрямку руху).

28. Kuvachov V.P. Justification of the parameters a rear-mounted linkage wide span tractor (vehicle). *Вісник ХНТУСГ*. 2019. Вип. 199. С. 32–48.

29. Кувачов В.П. Експериментальні випробування агромостового боронувального агрегату. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 223–233.

30. Кувачов В.П., Мітков В.Б., Ігнат'єв Є.І. та ін. Методологія перевірки математичних моделей функціонування агромостових систем на адекватність. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, том 1. 13 с (методика та побудова експериментальних амплітудно-частотних і спектральних характеристик).

31. Кувачев В. Моделирование плоско-параллельного движения в горизонтальной плоскости ширококолейного агросредства при кинематическом способе его управления. *Motrol*. 2015. Vol. 17, № 9. С. 49–54.

32. Кувачев В. Митков В., Шульга О. Моделирование плоско-параллельного движения в вертикальной плоскости ширококолейного агросредства для колейной системы земледелия. *Motrol*. 2016. Vol. 18. №1. С. 3–12 (закономірності впливу параметрів ширококоліїного засобу на характеристики його плоско-паралельного руху у поздовжньо-вертикальній площині при відпрацюванні ним нерівностей агрофону і нерівномірності тягового опору с.-г. знаряддя).

33. Bulgakov V., Kyurchev V., Kuvachov V. et al. The study of movement wide span tractor (vehicles) with kinematic (turn of wheels) method of its control. *Mechanization in agriculture & conserving of the resources*. 2017. Issue 5. P.188 – 193 (отримано математичну модель плоско-паралельного руху ширококоліїного агрозасобу в горизонтальній площині при кінематичному способі його повороту та амплітудо- і фаза-частотні характеристики відпрацювання динамічною системою керуючих та збурювальних впливів).

34. Bulgakov V., Holovach I., Kuvachov V. et al. Theoretical investigation of a rear-mounted linkage for wide-span tractors. *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. 2018. Issue 1. P.11–14 (отримано математичну модель плоскопаралельного руху навісного механізму ширококоліїного агрозасобу в горизонтальній площині та обґрунтовано місце його розміщення та основні параметри).

35. Bulgakov V., Arak M., Kuvachov V. et al. Study of special aspects of hitching to wide span tractors (vehicles). *Mechanization in Agriculture*. 2018. Year LXIV, Issue 4. P. 111–113 (отримано закономірності впливу параметрів навісного механізму ширококоліїного засобу на ступінь перерозподілу нормальних реакції на його опорні колеса та колеса с.-г. знаряддя).

36. Bulgakov V., Kuvachov V., Ivanovs S. et al. Research of properties of constant technological track of a bridge-type field machine. *TECHNOFORUM 2020 «New Trends in Machinery and Technologies for Biosystems»*. 2020. P. 26–33 (експериментально досліджено характеристики ґрунтових слідів постійної технологічної колії для руху ширококоліїного засобу).

37. Bulgakov V., Ivanovs S., Kuvachov V. et al. Study of specialized wide-rail agriculture unit for rail farming. *Mechanization in agriculture & conserving of the resources*. 2020. Year LXVI, Issue 2, P. 59–62 (розроблені рекомендації з оцінювання параметрів ширококоліїного засобу).

38. Bulgakov V., Adamchuk V., Kuvachov V. et al. A theoretical and experimental study of combined agricultural gantry unit with a mineral fertiliser spreader. *Agraarteadus: Journal of Agricultural Science*. 2020. XXXI (2). P. 139–146 (методика та аналіз результа-

тів експериментальних досліджень процесу внесення мінеральних добрив адаптованим розкидувачем в умовах колійного землеробства).

39. Bulgakov V., Olt J., Kuvachov V. et al. A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *Agraarteadus: Journal of Agricultural Science*. 2020. № XXXI (1). P. 10–16 (експериментальні дослідження тягово-зчіпних властивостей ширококолісного засобу).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

40. Кувачов В.П., Митков В.Б., Черная Т.С. Перспективи переходу сільськогосподарського виробництва на колійні та мостові системи землеробства. *Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції: матеріали міжнародного науково-практичного форуму (21-22 червня 2019 р., ТДАТУ). Мелітополь, 2019. С. 91-95 (об'єктивні перспективи впровадження колійної та мостової систем землеробства в Україні).*

41. Kuvachov V. The study wide span tractor (vehicles) for controlled traffic farming. *Proceedings V International scientific-technical conference «Agricultural Machinery»*: (June, 2017, Sofia, Bulgaria). 2017. Year 1, Vol. 2. P. 129–131.

42. Кувачов В.П. Аналіз руху енергозасобів по постійній технологічній колії. *Задачі земледельческой механіки в XXI веке: Сборник докладов Международной научно – технической интернет конференции (2–10 ноября 2011 г., Дослідницьке - Мелітополь) / ТДАТУ. Мелітополь, 2011. С. 223–228.*

43. Bulgakov V., Kuvachov V., Olt J. Theoretical study on power performance of agricultural gantry systems. *Proceedings 30th DAAAM International symposium «Intelligent manufacturing and automation» (23–26th October 2019, Zadar, Croatia) / DAAAM International. Vienna, Austria, 2019. P. 0167–0175 (отримано математичні моделі визначення необхідних маса-енергетичних характеристик ширококолісних засобів).*

44. Кувачев В.П. Перспективи використання ширококолісних спеціалізованих засобів сільськогосподарського призначення. *Сучасні проблеми землеробської механіки: матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (16-18 жовт. 2014 р., м. Житомир) / Житомирський НАУ, 2014. С. 64–66.*

45. Кувачов В.П. Оцінка керованості руху ширококолісних енерготехнологічних засобів механізації с.-г. виробництва. *Сучасні проблеми землеробської механіки: матер. XVI Міжнар. наук. конф. (17–19 жовтня 2015 р., м. Київ) / НУБіП. Київ, 2015. С. 3–4.*

46. Кувачов В.П. Кінематика повороту ширококолісних засобів механізації сільськогосподарського виробництва для колійної системи землеробства. *Сучасні проблеми землеробської механіки: тези допов. XVII міжнар. наук. конф. (17–19 жовт. 2016 р., м. Суми) / Сумський НАУ, 2016. С. 22–25.*

47. Кувачов В.П. До питання компонування спеціалізованих ширококолісних енерготехнологічних транспортних засобів для колійної системи землеробства. *Підготовка ґрунту в системі ресурсозберігаючих технологій: матер. Всеукр. наук.-практ. конф. (3–4 лист. 2016 р. м.) / КНТУ. Кіровоград, 2016. С. 24–26.*

48. Bulgakov V., Adamchuk V., Kuvachov V. et al. Investigation of technological properties of wide span tractors for controlled traffic farming. *Proceedings 16 International Scientific Conference «Engineering For Rural Development» (24 – 26 May 2017, Jelgava, Latvia), 2017. Vol. 16. P. 303–308 (розроблено методику оцінки технологічних властивостей ширококолісних засобів).*

49. Кувачов В.П. Дослідження поперечних зміщень робочих органів ширококолісних агрозасобів для колійної системи землеробства. *«Сучасні проблеми землеробської механіки: збірн. наук. праць XVIII міжнар. Наук. конф. (16–18 жовт. 2017 р.,*

м. Кам'янець-Подільський) / Подільський ДАТУ. Кам'янець-Подільський, 2017. С. 139–141.

50. Кувачов В.П. Моделювання плоско-паралельного руху спеціалізованого енерготехнологічного засобу для колійної системи землеробства у поздовжньо-горизонтальній площині. *Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК півдня України*: матер. Всеукр. наук.-практ. конф. (7–14 квітня. 2015 р., м. Мелітополь) / ТДАТУ. Мелітополь, 2015. Т. 4 (2). С. 13–17.

51. Надикто В.Т., Кувачев В.П. Научные основы агрегатирования специализированных ширококолейных агросредств для колёйной системы земледелия. *Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя*: матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (23–25 трав. 2018 р., м. Київ) / НУБІП. Київ, 2018. Т. 5. С. 198–200 (результати теоретичних та експериментальних досліджень ширококолейного засобу).

52. Кувачов В.П. До питання агрегування мостових тракторів. *Сучасні проблеми землеробської механіки*: матер. ХІХ Міжн. наук. конф. (17–19 жовт. 2018 р., м. Київ) / НУБІП. Київ, 2018. С. 258–260.

53. Bulgakov V, Arak M., Kuvachov V. Study of special aspects of hitching to wide span tractors (vehicles). *Conserving soils and water: SCIENTIFIC PROCEEDINGS III INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE (2018, Burgas, Bulgaria) 2018. Year II, Inssue 1(2)*. P. 78–79 (рекомендації з вибору раціональних параметрів навісного механізму ширококолейного засобу).

54. Кувачов В.П. Розроблення методології оцінювання технологічних властивостей спеціалізованих ширококолейних агросасобів. *Інноваційні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва*: матер. V Міжн. наук.-практ. конф. (23–24 травня 2019 р., м. Умань). Умань, 2019. С. 44–46.

55. Bulgakov V., Melnik V., Kuvachov V. et al. Theoretical study on linkage unit of wide span tractor. *Proceedings 29th DAAAM International symposium «Intelligent manufacturing and automation» (24 – 27th October 2018, Zadar, Croatia) / DAAAM International. Vienna, Austria, 2018. P. 0180–0189* (отримано математичну модель кутової рухомості навісного механізму ширококолейного агросасобу в горизонтальній площині та амплітудо- і фаза-частотні характеристики відпрацювання динамічною системою керуючого впливу).

56. Bulgakov V., Adamchuk V., Kuvachov V. Study into movement of wide span tractors (vehicles) used in controlled traffic farming. *Proceedings 28th DAAAM International Symposium «Intelligent Manufacturing And Automation» (08 – 11th November 2017, Zadar, Croatia) / DAAAM International. Vienna, Austria, 2017. P. 0199–0208* (отримано математичну модель вертикальних коливань ширококолейного засобу та амплітудо- і фаза-частотні характеристики відпрацювання динамічною системою зовнішніх збурювань).

57. Кувачев В.П. Перспективы дальнейших исследований ширококолейных агросредств. *Сучасні проблеми землеробської механіки*: матер. ХХ Міжн. наук. конф. (17–19 жовтня 2019 р., м. Миколаїв) / Миколаївський НАУ. Миколаїв, 2019. С. 156–161.

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

58. Спосіб реалізації мостового землеробства: пат. на кор. мод. 84884 Україна: МПК А01В49/00. № у 201302692; заявл. 04.03.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. №21.

59. Мостовий засіб для сільськогосподарських робіт: пат. на кор. мод. 84883 Україна: МПК А01В49/00. № у 201302688; заявл. 04.03.2013; опубл. 11.11.2013, Бюл. №21 (формула винаходу, схема реалізації способу).

60. Мостовий засіб для сільськогосподарських робіт: пат. на кор. мод. 93888 Україна: МПК А01В 49/00. № у 201403094; заявл. 27.03.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. №20 (формула винаходу, схема засобу).

61. Стабілізатор корпусу плуга в агрегаті мостового землеробства: пат. на кор. мод. 100657 Україна: МПК А01В 61/04. № у 201411864; заявл. 03.11.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. №15/2015 (формула винаходу, схема знаряддя).

62. Мостовий засіб для сільськогосподарських робіт: пат. на кор. мод. 115712 Україна: МПК А01В49/00. № у 201611179; заявл. 04.11.2016; опубл. 25.04.2017, Бюл. №8 (формула винаходу, схема засобу).

63. Мостовий засіб з регульованою технологічною колією: пат. на кор. мод. 117278 Україна: МПК А01В 49/00. № у 201613108; заявл. 22.12.2016; опубл. 26.06.2017, Бюл. №12 (формула винаходу, схема засобу).

64. Мостовий засіб зі змінною висотою агротехнічного просвіту: пат. на кор. мод. 17399 Україна: МПК А01В 49/00. № у 201700176; заявл. 04.01.2017; опубл. 26.06.2017, Бюл. №12 (формула винаходу, схема засобу).

65. Грунтообробне знаряддя для колійного та мостового землеробства: пат. на кор. мод. 124946 Україна: А01В 15/00, А01В 79/00. № у 201711571; заявл. 27.11.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. №8 (формула винаходу, схема знаряддя).

66. Грунтообробне знаряддя для колійного та мостового землеробства: пат. на кор. мод. 126787 Україна: А01В 49/00. № у 201712980; заявл. 27.12.2017; опубл. 10.07.2018, Бюл. №13 (формула винаходу, схема знаряддя).

67. Спосіб гладкої оранки в колійному та мостовому землеробстві: пат. 132889 Україна: А01В 49/00, А01В 51/00. № у 201810777; заявл. 31.10.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. №5 (формула винаходу, схема засобу).

68. Знаряддя для гладкої оранки в агрегаті колійного та мостового землеробства: пат. 133491 Україна: А01В 3/00, А01В 49/00. № у 201810776; заявл. 31.10.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. №7 (формула винаходу, схема засобу).

69. Знаряддя для обробітку та аерації ґрунту в агрегаті колійного і мостового землеробства: пат. 134274 Україна: А01В 33/06, А01В 45/02. № у 201812237; заявл. 10.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. №9 (формула винаходу, схема засобу).

70. Спосіб обробітку та аерації ґрунту в колійному і мостовому землеробстві: пат. 134275 Україна: А01В 45/02, А01В 33/06. № у 201812238; заявл. 10.12.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. №9.

71. Знаряддя для прокладання постійної технологічної колії: пат. на винахід 119393 Україна: А01В 76/00, А01В 79/02, Е01С 9/02. № а 201710581; заявл. 01.11.2017; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11.

72. Знаряддя для прокладання постійної технологічної колії: пат. на винахід 119394 Україна: А01В 76/00, А01В 79/02, Е01С 9/02. № а 201710582; заявл. 01.11.2017; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11 (формула винаходу, схема знаряддя).

73. Спосіб стійкого руху мостового засобу та пристрій для його здійснення: пат. на винахід 119482 Україна: А01В 49/00, А01В 63/00, А01В 63/02. № а 201705337; заявл. 31.05.2017; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12 (формула винаходу, схема пристрою).

74. Знаряддя для прокладання постійної технологічної колії мостової системи землеробства: пат. на винахід 119800 Україна: А01В 76/00, А01В 79/02, Е01С 9/02. № а 201706083; заявл. 16.06.2017; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15 (формула винаходу, схема засобу).

75. Транспортний енергетичний засіб: Пат. на винахід 120299 Україна: А01В 49/00, А01В 49/04, А01В 63/16, А01В 63/22. № а 201710579; заявл. 01.11.2017; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21 (формула винаходу, схема засобу).

76. Транспортний енергетичний засіб: пат. на винахід 120388 Україна: А01В 49/00, В60В 35/104. № а 201710576; заявл. 01.11.2017; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22 (формула винаходу, схема засобу).

77. Мостовий засіб сільськогосподарського призначення: пат. на кор. мод. 141743 Україна: А01В 79/00. № у 201910185; заявл. 04.10.2019; опубл. 27.04.2020, Бюл. №8 (формула винаходу, схема засобу).

АНОТАЦІЇ

Кувачов В.П. Механіко-технологічні основи функціонування ширококолії-них засобів механізації сільськогосподарського виробництва. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» (13 – Механічна інженерія). – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Мелітополь, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності роботи ширококолії-них засобів механізації сільськогосподарського виробництва шляхом розроблення і впровадження механіко-технологічних основ їх функціонування в умовах колійної системи землеробства.

Використання ширококолії-них засобів механізації в умовах колійної системи землеробства характеризується високими потенційними техніко-експлуатаційними та технологічними властивостями, що дозволяє суттєво підвищити ефективність сільськогосподарського виробництва в процесах обробки ґрунту і догляду за культурними рослинами.

В роботі розроблені методики обчислення втрат площі поля під інженерну зону та оцінювання енергетичних і тягово-зчіпних властивостей ширококолії-них засобів механізації сільськогосподарського виробництва за умов їх функціонування в колійній системі землеробства. Складені аналітичні рівняння руху ширококолії-них агрозасобів при реалізації ними принципово нової схеми здійснення повороту, які дозволяють оцінити їх статичну та динамічну поворотність. Розроблені математичні моделі плоско-паралельного руху ширококолії-них агрозасобів за кінематичним та силовим принципом здійснення повороту, які дозволяють оцінити їх керованість і стійкість руху у горизонтальній площині, а також встановлюють вимоги до технологічного допуску при обґрунтуванні ширини постійної технологічної колії. Розроблені нові математичні моделі функціонування ширококолії-них агрозасобів у поздовжньо-вертикальній площині, застосування яких дозволяє підвищити плавність руху з урахуванням кінематичних і силових взаємозв'язків їх енергетичної та технологічної частин. Удосконалені аналітичні залежності з вибору параметрів навісного механізму і зчіпних пристроїв машин/знарядь, які агрегатуються з агрозасобом. Розроблені наукові основи системи ефективного водіння ширококолії-них засобів механізації сільськогосподарського виробництва по слідах постійної технологічної колії при реалізації ними бортового (силового) повороту та оцінені їх технологічні властивості і визначено економічну ефективність від їх використання в колійній системі землеробства.

Проведеними теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що при русі ширококолії-ного агрозасобу по вирівняному ущільненому ґрунтовому сліду постійної технологічної колії покращуються його тягово-зчіпні властивості щонайменше на 30%, на відміну від його руху по с.-г. агрофону. При цьому їх енергонасиченість має становити на рівні 2,35...2,5 кВт/т на 1 км/год швидкості руху. А величина тягового зусилля, яке він здатний розвинути на кожен тону його експлуатаційної маси становить 6,37 кН. Доведено, що втрати площі поля під інженерну зону при використанні ширококолії-них засобів механізації з шириною колії 7,5–9 м сягають не більше 5–6%.

Встановлено, що для забезпечення задовільної стійкості руху, керованості та реалізації ширококолії-ним агрозасобом повороту бажано мати низький швидкісний режим.

Коливання нерівностей поздовжнього профілю ґрунтових слідів постійної технологічної колії носять низькочастотний характер. В умовах експлуатації основним генератором їх формування є параметри ґрунтозачепів шин коліс ширококоліїних агросасобів.

Випробування ширококоліїного агросасобу ТДАТУ показали, що його ручне та безоператорне керування, а також реалізація ним силового (бортового) способу повороту не створює будь-яких проблем, як для оператора, так і для подальшої автоматизації цих процесів.

Результати досліджень з розробки механіко-технологічних основ функціонування ширококоліїних засобів механізації сільськогосподарського виробництва впроваджені у ТОВ «Дніпро», прийняті АТ «Харківський тракторний завод» та рекомендовані у навчальний процес аграрних вищих навчальних закладів України.

Економічний ефект від упровадження колійної системи землеробства на вирощуванні озимої пшениці та використання ширококоліїних агросасобів за рахунок економії енергетичних витрат, посівного матеріалу і підвищення врожайності становить щонайменше 1750 грн/га.

Ключові слова: ширококоліїний агросасіб, колійна система землеробства, постійна технологічна колія, математичне моделювання, амплітудна і фазова частотні характеристики, стійкість, керованість, плавність, поворотність, ефективність.

Кувачев В.П. Механико-технологические основы функционирования ширококолейных средств механизации сельскохозяйственного производства. – Квалифицированная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 «Машины и средства механизации сельскохозяйственного производства» (13 – Механическая инженерия). – Таврический государственный агротехнологический университет имени Дмитрия Моторного, Мелитополь, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы повышения эффективности работы ширококолейных средств механизации сельскохозяйственного производства путем разработки и внедрения механико-технологических основ их функционирования в условиях колёйной системы земледелия.

Использование ширококолейных средств механизации в условиях колёйной системы земледелия характеризуется высокими потенциальными технико-эксплуатационными и технологическими свойствами, что позволяет существенно повысить эффективность сельскохозяйственного производства в процессах обработки почвы и ухода за культурными растениями.

В работе разработаны методики расчета потерь площади поля под инженерную зону и оценки энергетических и тягово-сцепных свойств ширококолейных средств механизации сельскохозяйственного производства (агросредства) в условиях их функционирования в колёйной системе земледелия; составлены модели движения ширококолейного агросредства при реализации им принципиально новой схемы осуществления поворота, которые позволяют оценить их статическую и динамическую поворачиваемость. Разработаны математические модели плоскопараллельного движения ширококолейных агросредств по кинематическому и силовому принципу осуществления ими поворота, которые позволяют оценить их управляемость и устойчивость движения в горизонтальной плоскости, а также обосновывают требования к технологическому допуску при обосновании ширины постоянной технологической колеи. Разработаны новые математические модели функционирования ширококолейных агросредств в продольно-вертикальной плоскости, применение которых позволяет повысить их плавность хода с учетом кинематических и

силовых взаимосвязей их энергетической и технологической частей. Усовершенствованы зависимости по выбору параметров навесного механизма агросредства и сцепных устройств для агрегатирования с ним машин и орудий. Разработаны научные основы системы эффективного вождения ширококолейного агросредства по следам постоянной технологической колеи при реализации им бортового (силового) поворота. Оценены технологические свойства и экономическая эффективность от использования ширококолейных агросредств в колеейной системе земледелия.

Проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что при движении ширококолейного агросредства по выровненному уплотненному почвенному следу постоянной технологической колеи улучшаются его тягово-сцепные свойства на 30%, в отличие от его движения по агрофону. При этом его энергонасыщенность должна находиться на уровне 2,35...2,5 кВт/т на 1 км/ч скорости движения. Величина тягового усилия, которое способно развить ширококолейное агросредство на каждую тонну его эксплуатационной массы составляет 6,37 кН. Доказано, что потери площади поля под инженерную зону при использовании агросредств с шириной колеи 7,5-9 м составляют не более 5-6%.

Установлено, что для обеспечения удовлетворительной устойчивости движения, управляемости и поворачиваемости ширококолейного агросредства желательно иметь его низкий скоростной режим.

Размещение навесного механизма ширококолейного агросредства близко к его центру масс хорошо отображается на его устойчивости и управляемости, но негативно сказывается на плавности его движения. В то же время, это требует необходимости настройки навесного механизма ширококолейного агросредства как по трехточечной, так и по двухточечной схемам.

Колебания неровностей продольного профиля следов постоянной технологической колеи носят низкочастотный характер. В условиях эксплуатации основным генератором их формирования являются параметры почвозацепов шин колес ширококолейных агросредств.

Испытания ширококолейного агросредства ТДАТУ показали, что его ручное и беспилотное управление, а также реализация им силового (бортового) способа поворота не создает каких-либо проблем, как для оператора, так и для дальнейшей автоматизации этих процессов.

Разработанные научно-методические и практические рекомендации по использованию ширококолейных агросредств в условиях колеейной системы земледелия рекомендованы к внедрению в производство и учебный процесс аграрных высших учебных заведений Украины.

Практические рекомендации по использованию ширококолейных агросредств в условиях колеейной системы земледелия внедрены в ООО «Днепр» Генического района Херсонской области.

Результаты исследований по разработке механико-технологических основ функционирования ширококолейных средств механизации сельскохозяйственного производства приняты АО «Харьковский тракторный завод» для создания на предприятии новых технических ширококолейных энергетических средств.

Экономический эффект от внедрения колеейной системы земледелия на выращивании озимой пшеницы и использование ширококолейных агросредств за счет экономии энергетических затрат, посевного материала и повышения урожайности составляет не менее 1750 грн/га.

Kuvachov V.P. Mechanical and technological bases of functioning wide-track means of mechanization agricultural production. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscripts.

Dissertation for the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 05.05.11 «Machines and means of mechanization of agricultural production» (13 – Mechanical engineering). – Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the actual problem of improvement of technical and operational indicators of work of specialized wide-track means of mechanization agricultural production by development and introduction of fundamental theoretical bases of their functioning and use in controlled traffic farming.

The use of potential technological properties wide-track mechanization to solve the problem of maximum implementation of the principles controlled traffic farming at a new scientifically sound technological level, as well as the prospect of their introduction into agricultural production allows maximum efficiency in tillage and crop care. But the design and technological features of specialized wide-track means of mechanization agricultural production for the controlled traffic farming require the development of a fundamentally new system of their operation and use.

To achieve this goal developed methods for calculating the loss of field area under the engineering zone and assessing the energy and traction properties of specialized wide-track means of mechanization agricultural production under the conditions of their operation and use on the principles of controlled traffic farming. The analytical equations of their movement at realization of essentially new scheme of realization of turn on a turning lane which allow to estimate their static and dynamic turnability are made. Developed mathematical models of their plane-parallel motion on the kinematic and force principle of rotation, which allow to assess their controllability and stability of movement in the horizontal plane, as well as justify the requirements for technological tolerance when justifying the width of the constant technological track. New mathematical models of their functioning in the longitudinal-vertical plane have been developed, the application of which allows to increase the smoothness of motion taking into account the kinematic and force interrelations of their energy and technological parts. Improved analytical dependences on the choice of parameters of the hinged mechanism and couplings of the machines/tools which are aggregated with it. Scientific bases of automatic driving of specialized wide-track means of mechanization of agricultural production on traces of a constant technological track at realization by it of onboard (power) turn and estimation of their technological properties and economic efficiency from introduction in controlled traffic farming are developed.

The conducted theoretical and experimental researches have established that at movement of the specialized wide-track agricultural means on the leveled condensed soil trace of a constant technological track its traction-coupling properties improve at least by 30% unlike its movement on agricultural background. In this case, their energy saturation should be at the level of 2.35...2.5 kW·t⁻¹ per 1 km·h⁻¹ speed. And the magnitude of the traction force that it is able to develop for each ton of its operating mass is 6.37 kN.

Fluctuations of the irregularities of the longitudinal profile of the leveled compacted soil traces of the constant technological track are of low-frequency character. Under operating conditions, the main generator of their formation are the parameters of the ground engagement of the tires of the wheels of specialized wide-track agricultural equipment.

Key words: wide-track agricultural means, controlled traffic farming, permanent technological track, mathematical modeling, amplitude and phase frequency characteristics, stability, controllability, smoothness, maneuverability, efficiency.

Підписано до друку 09.03.2021 р. Замовл.: № 1327.
Формат 60x84x 1/16. Ум. друк. арк. 2,96. Наклад 100 прим.

Віддруковано в Таврійському державному агротехнологічному університеті
імені Дмитра Моторного.

Адреса: 72310, Запорізька обл., м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18.