

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

КОРНІЙЧУК ЮРІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 631.347:629.734:004.896

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Підвищення ефективності обприскування
сільськогосподарських культур з
використанням безпілотного агрегату**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Корнійчук Ю.М.

Керівник роботи

Савченко В.М.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Корнійчук Юрій Михайлович. Підвищення ефективності обприскування сільськогосподарських культур з використанням безпілотного агрегату. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У магістерській роботі розглянуто шляхи підвищення ефективності обприскування сільськогосподарських культур шляхом застосування безпілотного агрегату на електротязі, оснащеного інтелектуальною системою управління та пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини. Обґрунтовано доцільність використання такого технічного рішення з позицій зниження трудових витрат, підвищення продуктивності технологічного процесу, збільшення врожайності сільськогосподарських культур і покращення екологічних показників виконання хімічних обробок.

У роботі розроблено програмно-апаратний комплекс і конструкцію безпілотного агрегату з пристроєм надання електричного заряду краплям робочої рідини, а також визначено та обґрунтовано основні технологічні параметри його роботи. Дослідний зразок безпілотного агрегату загальною масою 180 кг, оснащений акумуляторами ємністю 20 А·год, забезпечує запас ходу до 45 км на одному заряді та продуктивність обробки до 1,53 га за годину. Пристрій електрозарядки крапель працює з напругою до 20 кВ при живленні від літій-іонних акумуляторів напругою 48 В і забезпечує заряд крапель вносимої рідини до 4,5 мкКл/мл.

Експериментальні дослідження підтвердили працездатність і ефективність розробленого безпілотного агрегату. Встановлено, що відхилення від заданого курсу в режимі автоматичного управління в середньому становить 16,6 см при швидкості руху 5–12 км/год, що відповідає агротехнічним вимогам. Найвища ефективність обприскування досягається за напруги електрозарядки крапель 17 кВ та швидкості руху агрегату 7 км/год. Використання електрично заряджених крапель забезпечує підвищену рівномірність осадження робочої рідини на оброблюваній поверхні порівняно з традиційними способами обприскування, що сприяє зменшенню втрат препарату та підвищенню загальної ефективності технологічного процесу.

Ключові слова: безпілотний агрегат, автоматичне управління, програмно-апаратний комплекс, конструкція, заряд.

ANNOTATION

Korniichuk Yuriy Mykhailovych. Improving the Efficiency of Crop Spraying Using an Unmanned Aerial Vehicle. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The master's thesis examines ways to improve the efficiency of crop spraying through the use of an electrically powered unmanned unit equipped with an intelligent control system and a device for electrically charging the droplets of the applied liquid. The feasibility of implementing this technical solution is substantiated in terms of reducing labor costs, increasing the productivity of the technological process, enhancing crop yields, and improving the environmental performance of chemical treatment operations.

The study presents the development of a hardware–software complex and the design of an unmanned unit with a device for imparting an electric charge to the droplets of the working fluid, as well as the determination and justification of its main technological operating parameters. An experimental prototype of the unmanned unit with a total mass of 180 kg, equipped with batteries with a capacity of 20 Ah, provides a range of up to 45 km on a single charge and a treatment capacity of up to 1.53 ha per hour. The droplet electric charging device operates at voltages of up to 20 kV, powered by 48 V lithium-ion batteries, and ensures droplet charging of the applied liquid up to 4.5 $\mu\text{C/mL}$.

Experimental studies confirmed the operability and efficiency of the developed unmanned unit. It was established that the average deviation from the заданий course in automatic control mode is 16.6 cm at a travel speed of 5–12 km/h, which meets agrotechnical requirements. The highest spraying efficiency is achieved at a droplet charging voltage of 17 kV and a unit speed of 7 km/h. The use of electrically charged droplets provides higher uniformity of working fluid deposition over the entire treated surface compared to traditional spraying methods, thereby reducing chemical losses and increasing the overall efficiency of the technological process.

Keywords: unmanned unit, automatic control, hardware–software complex, design, electric charge.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ І ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБПРИСКУВАННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БЕЗПІЛОТНОГО АГРЕГАТА З ПРИСТРОЄМ ЕЛЕКТРОЗАРЯДКИ КРАПЛІВ ВНОСИМОЇ РІДИНИ.....	33
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	42
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Серед усіх відомих способів хімічного захисту рослин найосновнішим є обприскування. Даним способом вноситься 76% усіх отрутохімікатів, що використовуються в сільськогосподарському виробництві. Недоліком існуючих технічних засобів для внесення рідких мінеральних добрив і засобів захисту рослин є те, що в більшості випадків вони є причіпними до тракторного агрегату, а також те, що всім відомих системам для внесення рідких отрутохімікатів властиві великі експлуатаційні витрати, пов'язані з експлуатацією машинно-тракторного агрегату (МТА).

Сучасна тенденція розвитку мобільної техніки полягає у застосуванні електричних приводів з живленням від акумуляторних батарей, що дозволить виключити недоліки, пов'язані з використанням двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), і тим самим поліпшити екологічні показники продукції та технологічного процесу в цілому. Нинішня необхідність цифровізації та автоматизації сільськогосподарського виробництва обумовлює розробку і впровадження інтелектуальних систем управління операціями, які, в свою чергу, дозволять зменшити трудовитрати і збільшити врожайність продукції.

Ефективність обприскування підвищується зі зменшенням крапель вноситься рідини, однак, в той же час зростає і ймовірність знесення вітром і випаровування дрібних крапель. Даний недолік можна усунути шляхом примусового осадження крапель вноситься рідини за допомогою надання їм електричного заряду. Електрозарядка крапель сприяє вирівнюванню концентрації за обсягом при одночасному збільшенні швидкості осадження.

Обприскування електрично зарядженими краплями за допомогою безпілотного агрегату (БПА) раніше не розглядалося, і, оскільки практичне застосування даного технічного рішення має великий потенціал у підвищенні ефективності традиційного обприскування, наукові дослідження в даній області

є актуальними і необхідними в умовах цифровізації та автоматизації сільськогосподарського виробництва.

Метою дослідження є підвищення ефективності обприскування сільськогосподарських культур шляхом розробки пристрою електрозарядки крапель для примусового осадження вносимої рідини на базі безпілотного агрегату.

Завдання дослідження:

1. Розробити конструкцію БПА, що дозволяє автоматично здійснювати рух по полю, з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини.
2. Провести теоретичний опис роботи БПА з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини.
3. Створити дослідний зразок БПА з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини та оцінити ефективність його застосування.

Об'єкт дослідження – БПА з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини.

Предмет дослідження – закономірності зміни конструктивних і режимних параметрів БПА з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини.

Методи дослідження. Основні результати магістерської роботи отримані на основі фундаментальних законів і рівнянь механіки та електромеханіки, основних положень теорії сільськогосподарських машин, автоматичного управління, математичного та комп'ютерного моделювання. Математичне моделювання здійснено в програмі Microsoft Excel, а також в середовищі об'єктно-візуального моделювання Matlab [Simulink], середовищі динамічного моделювання SimInTech. При дослідженнях застосовувалася обчислювальна техніка та сучасні комп'ютерні програмні продукти: Microsoft Office 2016, MatLab R2018a.

Перелік публікацій за темою роботи:

- 1 Корнійчук Ю.М. Опис безпілотного агрегату з пристроєм електрозаряджання крапель внесеної рідини. Покращення техніко-економічних

показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операцій. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 70-72.

2. Борак К.В., Савченко В.М., Корнійчук Ю.М. Робототехнічні засоби в рослинництві. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 588-601.

3. Корнійчук Ю.М. Застосування безпілотних агрегатів для обприскування сільськогосподарських культур. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операцій. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 27-30.

Практична значущість роботи. Розроблено БПА з пристроєм електрзарядки крапель вносимої рідини, що дозволяє автоматично обприскувати сільськогосподарські культури і здійснювати рух по полю за супутниковими радіонавігаційними сигналами. Дане технічне рішення може застосовуватися для хімічного захисту рослин і внесення рідких мінеральних добрив на підприємствах з виробництва продукції рослинництва.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні автопілотованих пристроїв, а саме безпілотних агрегатів сільськогосподарського призначення і пристроїв електрзарядки крапель, а також дозволяють дати практичні рекомендації щодо їх розробки.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 23 найменувань.

Загальний обсяг роботи становить 55 сторінок комп'ютерного тексту, містить 27 рисунків та 1 таблицю.

РОЗДІЛ

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ І ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБПРИСКУВАННЯ

1.1. Робототехнічні засоби в рослинництві

Розвиток робототехніки відкриває нові можливості для підвищення ефективності рослинництва у межах концепції «точного землеробства». Сучасні агроботи здатні оптимізувати виробничі процеси: від посіву до збору врожаю, зменшуючи використання ресурсів і негативний вплив на довкілля. Уряди різних країн покладають великі надії на цифрові технології та автономні машини для вирішення проблем продовольчої безпеки, зміни клімату і дефіциту робочої сили [1]. Очікується, що впровадження таких технологій підвищує економічну віддачу: зокрема, інтенсивніше використання «розумної» техніки може давати до 30% збільшення прибутковості господарств [1]. Роботи дедалі частіше застосовуються в полі та теплицях, допомагаючи фермерам скоротити витрати праці й ресурсів, підвищити врожайність і якість продукції [2].

Однак попри значні перспективи, рівень впровадження аграрних роботів поки що залишається відносно низьким у порівнянні з потенційним попитом. Причини цього – висока вартість технологій, недостатня обізнаність аграріїв та технічні обмеження перших поколінь роботів [1]. Тим не менш, успішні приклади комерційного застосування вже існують у різних галузях рослинництва. У цій статті проведено аналіз сучасних роботизованих засобів у рослинництві, їх технічних характеристик та досвіду впровадження, а також окреслено проблеми і перспективи подальшого розвитку цього напрямку [2].

Сільське господарство стикається з низкою викликів, які стимулюють пошук інноваційних рішень. Однією з головних проблем є дефіцит робочої сили в польових роботах. Сезонні роботи з прополювання та збирання врожаю стають все менш привабливими, а вартість найманої праці зростає. Як відзначають

фермери, щороку трудові та паливні витрати зростають, і нестача працівників змушує шукати альтернативи. Другою проблемою є необхідність підвищення продуктивності на тлі зростання попиту на продукти харчування. За прогнозами, до 2050 року світове населення сягне 10 млрд, що потребуватиме збільшення виробництва продовольства на 50% [2]. Досягти цього на обмежених землях традиційними методами складно без автоматизації процесів [2].

Наступний аспект – довкіллеві та агротехнічні виклики. Інтенсивне землеробство стикається з виснаженням ґрунтів, забрудненням від надмірного використання пестицидів та гербіцидів, а також потребою зменшити викиди CO₂. Велика механізація (важкі трактори, обприскувачі) призводить до ущільнення ґрунту й зайвих витрат пального. Роботизовані засоби можуть запропонувати більш делікатні та точні операції, наприклад, дрібні автономні роботи менше ущільнюють ґрунт і можуть працювати електрично без викидів. Точне внесення добрив і засобів захисту рослин за допомогою роботів здатне радикально скоротити використання хімікатів. Так, експериментальні системи точкового обприскування бур'янів скорочують обсяг гербіцидів до 90% порівняно з суцільною обробкою. Це не лише економія коштів, а й менше навантаження на екосистему [2].

Отже, постановка проблеми полягає в тому, щоб знайти шляхи автоматизації ключових операцій у рослинництві – від обробітку ґрунту, сівби, догляду за посівами до збору врожаю – з метою підвищення ефективності, зниження витрат і мінімізації шкоди довкіллю. Розв'язання цієї проблеми бачиться у впровадженні робототехнічних засобів різного призначення, здатних автономно або з мінімальним контролем виконувати рутинні та ресурсоємні завдання в полі [2].

Робототехніка в рослинництві активно розвивається в останні десятиліття, і сьогодні доступний широкий спектр рішень – від невеликих роботів-«агрономів» до повнорозмірних автономних тракторів. Нижче розглянемо

основні типи роботизованих засобів та конкретні приклади, що вже застосовуються на практиці [2]..

Серед перших успішних польових роботів – данський FarmDroid FD20 (рис. 1.1), призначений для автоматичного висіву та прополювання дрібнонасінневих культур (наприклад, цукрових буряків). Це автономна платформа на сонячних батареях, яка записує точне розташування насіння під час посіву за сигналами GPS, а згодом механічно виконує бур'яни як міжрядно, так і в рядках [2].



Рис. 1.1. Польовий робот FarmDroid FD20 [2].

Робот рухається з невеликою швидкістю, але дуже точно. FarmDroid FD20 важить близько 800 кг і живиться на 100% від сонячної енергії, завдяки чому не потребує пального. Чотири панелі забезпечують заряд двох батарей ємністю ~1,6 кВт·год, чого вистачає на цілий день роботи в сонячну погоду. На одному заряді FD20 обробляє кілька гектарів, рухаючись зі швидкістю до ~0,95 км/год (~950 м/год). За рік робот може напрацювати понад 1000 годин без значних витрат – реальний фермерський досвід у Франції показав, що річні витрати на обслуговування складають близько €700, при закупівельній ціні ≈€95 тис.. Фермер Дем'єн Блондел, одним із перших купивши FarmDroid у 2021 році, зміг за один сезон зекономити на ручній праці й паливі стільки, що інвестиція фактично окупилася. Наразі у світі продано вже понад 250 таких роботів і він вважається одним з найуспішніших польових агроботів у Європі [3].

Інший цікавий приклад сівалочного робота – данський проект Fendt Xaver (рис. 1.2), де замість однієї великої машини використовують роя декількох невеликих роботів-сіялок, що координовано висівають кукурудзу. Це концепція масового паралелізму: десяток компактних роботів можуть одночасно працювати на полі, забезпечуючи продуктивність великого трактора, але без ущільнення ґрунту. Схожий підхід розробляє і японська Yanmar – автономні електросівалки для рисових полів. Хоча такі системи ще експериментальні, вони демонструють перспективи swarm-робототехніки у рослинництві [2].



Рис. 1.2. Агроробот Fendt Xaver [2].

Найбільший сегмент аграрних роботів сьогодні – це установки для автоматичного видалення бур'янів, адже ручне прополювання є трудомістким, а хімічна боротьба – шкідливою та дорогою. Більшість сучасних польових роботів – це колісні або гусеничні платформи з електроприводом, оснащені камерами та змінними знаряддями для механічного або точкового хімічного знищення бур'янів [1]. Згідно з оглядом, переважають 4-колісні роботи без маніпуляторів, що здійснюють прополювання за допомогою камерного зору та алгоритмів штучного інтелекту [1].

Одним із піонерів є французька компанія Naïo Technologies, що вже продала сотні невеликих роботів-прополювачів фермерам. Її робот Oz (рис. 1.3) призначений для овочевих господарств і дрібних фермерів. Naïo Oz – компактний чотириколісний електроробот масою ~150 кг, здатний працювати до

8 годин автономно від акумулятора. Він обладнаний RTK-GPS навігацією для високої точності (відхилення до 2,5 см) і може виконувати різні завдання завдяки змінному навісному обладнанню: культивувати ґрунт, прорізати борозни, сіяти та механічно виполювати бур'яни в рядках і між рядками. Вантажопідйомність триточкового навісу Oz становить 60 кг – цього достатньо для встановлення невеликої сівалки або прополочного агрегату. Робот рухається зі швидкістю кілька км/год і обладнаний камерами та датчиками безпеки (лидар), що дозволяють йому зупинятися перед перешкодами. Продуктивність Oz залежить від ширини захвату знаряддя (максимум 1 м) – за 8 годин він може обробити кілька гектарів (до ~2–3 га, залежно від культури). Ще у 2019 році Naïo відзначала продаж сотого робота Oz, що свідчить про його успішну експлуатацію [2].



Рис. 1.3. Робот Oz [2].

Для більших полів Naïo створила робот Dino – ширшу та потужнішу платформу для прополювання овочів (салатів, капусти тощо) на грядках завширшки 1,6–1,8 м. Dino важить ~800 кг, має батарею на 8–10 годин і здатен виполювати бур'яни на 5–8 га за день, замінюючи бригаду з 6–8 робітників. Спеціально для виноградників розроблено високий робот Ted від Naïo – він їздить над рядами винограду, механічно обробляючи міжряддя. Ted електричний, але досить масивний (вага ~1,9 т), здатен працювати на схилах виноградників автономно протягом цілого дня. Ще одна французька новинка – Ogiu, універсальний робот-тягач для овочівництва, презентований у 2023 році,

що може тягнути більші агрегати. Таким чином, лінійка Naïo покриває потреби як невеликих ферм, так і середніх господарств [2].



Рис. 1.4. Робот Dino.

Не лише французи розвивають цю сферу. У США стартап FarmWise випустив роботизований прополювач Titan, який за допомогою комп'ютерного зору вирізняє молоді рослини овочевих культур та підрізає бур'яни поруч із ними. У Каліфорнії такі машини вже працюють на полях салату та капусти, допомагаючи фермерам подолати дефіцит робочих рук. Швейцарська компанія ecoRobotix створила унікального робота-стола AVO: він рухається на сонячних батареях по полю і прицільно розпилює мікродози гербіциду прямо на листя бур'янів, визначаючи їх через камери. Це дозволяє зменшити використання хімікатів на ~90% і заощадити кошти. AVO здатний самотужки обробити кілька гектарів за день, працюючи повністю автономно. В Нідерландах компанія Odd.bot розробила робот Weed Whacker (проект “Muddy Machines”) – невеликий електроробот, що механічно висапує бур'яни у рядках овочів. Він компактний і дешевший, задуманий як орендна послуга для органічних фермерів [2].

Варто згадати і про лазерне випалювання бур'янів – цю технологію пропонує американська компанія Carbon Robotics. Їхній автономний робот оснащений потужними інфрачервоними лазерами та камерами AI: він проїжджає полем і точково випалює проростки бур'янів лазерним променем, не

пошкоджуючи культурні рослини. За годину такий робот обробляє до 2 га, знищуючи тисячі бур'янів без жодної краплі хімікатів. Хоча коштує він дорого, інтерес до технології високий як екологічної альтернативи гербіцидам [2].



Рис. 1.5. Роботизований прополювач Titan [2].

Ще один напрям – роботи-культиватори для міжрядного обробітку. Наприклад, французький Carré Anatis – автономний електроробот, що працює з навісною секцією культиватора. Anatis має 4 рушійні колеса, вагу ~800 кг, швидкість роботи ~4 км/год і здатен прополювати до 0,5 га за годину (тобто до ~4 га за 8 годин автономної роботи). Його акумулятор забезпечує ~8 год роботи, а висота кліренсу 65 см дозволяє працювати навіть у високих овочевих культурах. Робот оснащений двома камерами Claas для рядіного слідування і RTK-GPS для навігації по полю. Безпека забезпечується сенсорами та лідарами, а у разі втрати сигналу чи помилки Anatis сам зупиняється і надсилає SMS оператору. Такий рівень технологій зробив його лауреатом конкурсу SIMA Innovation Awards [2].



Рис. 1.6. Роботи-культиватор. Carré Anatis [2].

Захист рослин – критична ділянка, де роботи теж знаходять застосування. Окрім згаданого ecoRobotix AVO, що точково кропить бур'яни, є й інші підходи. Все більшого поширення набувають безпілотні літальні апарати (дрони) для обприскування і внесення добрив. Наприклад, в Азії популярні дрони DJI Agras (рис. 1.7), здатні нести 10–20 л робочого розчину і автономно обприскувати рисові поля, сади тощо. В Україні також з'являються агродрони, що обробляють десятки гектарів на день, особливо ефективно на дрібних чи важкодоступних ділянках. Такі дрони оснащені системами автопілоту та радаром висоти, щоб триматися на стабільній відстані від рослин. Хоча один дрон покриває ~15–20 га за годину (з дозаправками), рой дронів може швидко обробити велике поле [2].

Інший напрям – автономні наземні обприскувачі. Уже існують прототипи роботів, що самостійно пересуваються посівами і вибірково обприскують хворі чи уражені шкідниками рослини. Наприклад, стартап Plantwise випробовує робота-розпилювача для теплиць, який за допомогою камер виявляє плями хвороб на листі і адресно наносить фунгіцид тільки на проблемні рослини. Подібні роботи можуть значно знизити витрати препаратів [2].



Рис. 1.7. Дрон DJI Agras [2].

Варто згадати і про інтелектуальні обприскувачі на тракторах, які хоч і не є автономними роботами, але містять елементи робототехніки. Так, система SmartSprayer UX від AMAZONE (спільно з Bosch) використовує камери і AI для розпізнавання бур'янів «зелень-на-зелені» у посівах і включає форсунки тільки над бур'яном. Польові випробування показали, що така система зменшує використання гербіцидів до 70–90%. Це приклад, як роботизація поступово проникає і в традиційну техніку [2].

Провідні світові виробники сільгосптехніки працюють над створенням повністю автономних тракторів. У 2022 році компанія John Deere презентувала свій перший комерційний автономний трактор на базі моделі 8R. Цей 410-сильний трактор оснащений 6 парами стереокамер для кругового огляду та системою штучного інтелекту, яка розпізнає перешкоди і зупиняє машину у разі потреби. Трактор здатен самостійно орати поле з точністю до 2,5 см, використовуючи GPS-навігацію, і контролюється фермером через мобільний

додаток. Фермер може запустити його, просто провівши пальцем по екрану смартфона, після чого трактор працює без оператора, а власник отримує онлайн-дані про виконану роботу. John Deere 8R Autonomous уже проходить випробування на фермах США і, як очікується, зможе виконувати обробіток ґрунту, посів і міжрядний обробіток без людини в кабіні. Подібні рішення розробляють і конкуренти: CNH (Case IH) показувала концепт автономного трактора Magnum, а New Holland – безпілотний трактор на базі T8 [2].



Рис. 1.8. Комерційний автономний трактор на базі моделі 8R [2].

Паралельно виникають стартапи, що будують автономні платформи “тяглові роботи”. Наприклад, нідерландська AgXeed створила електричний гусеничний робот AgBot потужністю ~156 к.с., здатний агрегувати стандартне навісне обладнання (плуги, сівалки тощо). Цей AgBot має запас ходу ~8–12 год, вагою близько 6 тонн, але працює без водія. Данська AgroIntelli випускає автономний дизель-електричний модуль Robotti, який важить ~2800 кг і може тягнути 3-метрові прополочні секції або сівалки. Роботи-трактори на кшталт Robotti вже випробовуються в Європі – один робот може за день обробити 20–30 га залежно від операції, працюючи цілодобово з дозаправкою. Їх головна

перевага – можливість працювати невтомно 24/7, тоді як людина обмежена робочим днем [2].

Автоматизація збору врожаю – чи не найскладніше завдання, адже вимагає маніпуляцій з кожним плодом чи качаном. Проте і тут є прогрес, особливо для трудомістких культур – фруктів та ягід. У теплицях та садах вже з'являються роботи-збирачі: вони за допомогою комп'ютерного зору визначають стиглі плоди і обережно зривають їх маніпулятором або іншим пристроєм.

Перші успішні приклади – роботи для збирання суниці (полуниці) в теплицях. Бельгійська компанія Octinion представила робота Rubion – автономний візок із роботизованою рукою, який пересувається між грядками суниці і зрізає ягоди без пошкоджень. Rubion використовує 3D-камери та нейромережі для пошуку стиглих ягід і м'який силіконовий захват, щоб обережно зривати їх кожні 3–5 секунд. На практиці робот наразі збирає 10–30 кг суниць за годину (близько 1 ягоди за 5 секунд). Це вже співставно з людською працею, адже один працівник збирає ~5 кг/год, отже робот замінює 2–3 людей. За день (16 годин роботи) один Rubion може зібрати до 11500 ягід (що відповідає 180–360 кг за зміну залежно від врожайності). Розробники підраховали, що 14 таких роботів здатні за тиждень зібрати всі суниці, що споживаються на турнірі Вімблдон (~27 тонн). Цей приклад показує потенціал: роботи можуть працювати цілодобово, не втомлюються і забезпечують стабільний збір. Octinion також розробляє роботів для прогнозування врожаю (сканування й підрахунок ягід) та робота з UV-лампами для дезінфекції рослин від грибків уночі – все це інтегрується в єдину систему “розумної” теплиці [2].

Для садів розробляються інші рішення. Ізраїльський стартап Tevel створив унікальних літаючих роботів (рис. 9) FAR (Flying Autonomous Robot) – це квадрокоптери зі спеціальними маніпуляторами, що підлітають до дерева і зривають плоди (яблука, персики, сливи) прямо з гілок. Кілька дронів прив'язані довгим кабелем до автономної платформи-«бази», яка стоїть між деревами і забезпечує живлення. Дрони оснащені камерами, що оцінюють колір і розмір

плодів, і зривають лише стиглі, залишаючи недозрілі дозрівати. Випробування в садах Італії та Каліфорнії показали, що така система може працювати 24/7, збираючи фрукти хвилями максимальної стиглості. Хоча продуктивність поки поступається людській бригаді, головна перевага – автономність і подолання браку сезонних працівників. В Іспанії та Італії також тестуються наземні роботи-збирачі яблук (проекти FFRobotics, Halyoid), які мають кілька маніпуляторів для одночасного зривання кількох плодів. Для цитрусових у Японії створено робота з вакуумним всмоктувачем, що “втягує” апельсини з гілки. А для виноградників компанія Harvest CROO Robotics (США) будує велику машину для збирання полуниці на відкритих плантаціях – з десятками роботизованих «рук», що збирають ягоди на грядці [2].



Рис. 1.9. Робот Tevel FAR для збирання фруктів [2].

Окремо слід відзначити автоматизацію в теплицях. Тут роботи можуть пересуватися по рейках або шляхах між рядами. Окрім згаданого робота для суниці, у теплицях з томатами використовують автоматизовані візки з роборукою для зрізання помідорів (проекти компаній MetoMotion в Ізраїлі та Dogtooth у Великобританії). Вони здатні зрізати помідори чи перці, складаючи їх

у коробки. Також є роботи для догляду за рослинами – наприклад, голландський Priva Kompano для пасинкування огірків (обрізає бічні пагони). Такі роботи допомагають компенсувати нестачу робітників у тепличних господарствах [2].

Нарешті, частиною роботизованих засобів у рослинництві можна вважати системи автоматизації в вертикальних фермах або гідропонних теплицях, де маніпулятори переміщують лотки з рослинами, здійснюють посів та збір автоматично. Хоча це дещо інша галузь (Controlled Environment Agriculture), принцип той самий – зменшити ручну працю через роботизацію [2].

Робототехніка в агросекторі – один з ключових напрямків інновацій, і її розвиток обіцяє масштабні зміни в рослинництві. На основі аналізу сучасних тенденцій можна окреслити кілька перспективних напрямів і очікувань [2].

1. Зростання різноманітності та доступності роботів. Очікується, що на ринку з'являтиметься все більше моделей роботів, пристосованих до різних культур і масштабів господарств. Якщо сьогодні налічується близько 20–30 комерційних моделей роботів для рослинництва, то за 5–10 років їх число може зрости у кілька разів. Роботи стануть доступнішими фінансово: виробники працюють над здешевленням сенсорів, акумуляторів та матеріалів, а також пропонують гнучкі моделі – наприклад, робот як послуга (фермер платить за гектар обробки роботом, не купуючи його повністю). Зі збільшенням виробництва ціни неминуче знизяться, подібно до того як здешевшали безпілотники [2].

2. Покращення штучного інтелекту і комп'ютерного зору. Сучасні роботи вже використовують AI для розпізнавання культур та бур'янів, але цей процес ще далекий від досконалості (особливо у складних умовах: бур'яни, що схожі на культури, мінливе освітлення тощо). Нові алгоритми глибокого навчання та неймережі, треновані на великих масивах агроданих, зроблять роботів «розумнішими». Вони зможуть точніше і швидше ідентифікувати об'єкти (рослини, плоди, шкідників), передбачати врожайність, діагностувати хвороби. Наприклад, вже зараз експериментальні роботи-розпилювачі вміють виявляти

ознаки хвороб на листі з точністю понад 90%. У перспективі агроботи зможуть не лише виконувати механічні завдання, а й виступати як «польові діагности», збираючи дані про стан посівів, вологість ґрунту, наявність шкідників, і в режимі реального часу передавати їх фермеру [2].

3. Взаємодія та координація множинних роботів. Майбутнє рослинництва може передбачати цілі «fлoti» роботів на полі. Уже зараз є проекти, де декілька однакових роботів координовано сіють або прополнують (як згадана система Fendt Xaver з роєм міні-сіялок). Надалі розробляються системи координування, які дозволять різним роботам спільно працювати: наприклад, один робот сканує поле і виявляє проблемні зони, другий – таргетовано обприскує, третій – збирає врожай, і всі обмінюються інформацією. Для цього потрібні стандарти зв'язку і протоколи – такі напрацювання вже ведуться в межах концепції «розумних полів» (smart fields). Дрони можуть стати «очима зверху» для наземних роботів, передаючи їм координати бур'янів або стиглих плодів. Взаємодія між роботами підвищить надійність: якщо один вийде з ладу, інші продовжать роботу [2].

4. Збільшення тривалості автономної роботи та енергетична ефективність. Тривалість роботи від акумулятора – поки що обмежувальний фактор для багатьох роботів. Однак розвиток акумуляторних технологій (літій-іонні з більшою ємністю, твердотільні батареї) та впровадження сонячної підзарядки (як у FarmDroid) можуть значно продовжити час автономної роботи. Вже з'являються роботи, що здатні працювати цілу добу з проміжною підзарядкою або заміною батарей (деякі моделі мають змінні акумуляторні блоки, які можна швидко поміняти на полі). Також випробовуються роботи на водневих паливних елементах – наприклад, нідерландський eTrac використовує гібрид електрики та водню для збільшення тривалості роботи до 24–36 годин. Енергоефективність буде в центрі уваги: роботи навчатимуться переходити в режим енергозбереження, оптимізувати маршрути, використовувати рекуперацію енергії при гальмуванні тощо [2].

5. Інтеграція роботів у загальні цифрові платформи ферми. Роботизовані засоби стануть частиною єдиного інформаційного середовища господарства, збираючи і відправляючи дані до хмарних систем. Це дозволить фермерам бачити повну картину – від карти бур'янів до прогнозу врожайності – і приймати рішення на основі актуальних даних. Деякі сучасні роботи вже пропонують веб-інтерфейси або мобільні додатки, де можна задати завдання і стежити за прогресом (наприклад, застосунок John Deere Operations Center для автономного трактора, чи додаток FarmDroid для моніторингу роботи на полі). У майбутньому ця інтеграція поглибитися: роботи зможуть автоматично отримувати завдання з програми управління господарством (наприклад, на основі аналізу супутникових знімків система вирішить відправити робота на конкретну ділянку для обробки). Також наголос робиться на моніторингу якості виконання – роботи передаватимуть фотозвіт виконаної роботи, щоб агроном міг переконатися, що, скажімо, всі бур'яни видалені [2].

6. Подолання нормативних і соціальних бар'єрів. У перспективі 5–10 років очікуються зміни в регуляторному полі, які полегшать використання автономних машин на практиці. В ЄС уже прийнято новий Регламент Машин 2023/1230, що з 2027 року вводить окреме поняття автономної сільгосптехніки і вимоги до її сертифікації. Це створює правові рамки для виходу робототехніки на широкий ринок. Ще одним викликом є соціальне сприйняття: працівники можуть побоюватися втрати роботи через роботи, або фермери – не довіряти безпілотним машинам. Але історично автоматика створює і нові робочі місця – операторів, сервісних інженерів тощо. Освіта і демонстрація успішних кейсів будуть важливими для прийняття технологій. З часом, коли фермери побачать реальну користь (економію коштів, вирішення проблеми робочої сили, підвищення врожайності), поширення роботів прискориться [2].

Отже, найближче десятиліття може стати переломним: роботи перейдуть із дослідних зразків у масове застосування на фермах. Аналітики прогнозують стрімке зростання ринку агророботів – за оцінками, його обсяг у світі

збільшиться з ~\$13 млрд у 2023 році до \$85 млрд у 2033 році (середньорічний ріст ~20%). Це підтверджує високі очікування і інвестиції в галузь [2].

Робототехнічні засоби в рослинництві вже сьогодні переходять з площини експериментів у реальний аграрний виробничий процес. Проведений аналіз показав, що існує широкий спектр роботів для різних стадій рослинництва: від сівби і прополювання до збирання врожаю. Найбільш поширеними нині є роботи-прополювачі, які допомагають боротися з бур'янами точніше та екологічніше, а також автономні платформи для польових робіт. Успішні приклади – FarmDroid FD20, Naïo Oz/Dino, Carré Anatis, що вже працюють на полях Європи, скорочуючи витрати ручної праці та гербіцидів. Збір врожаю роботами поки що в початковій стадії, але досягнення у збиранні суниці, яблук та інших трудомістких культур вказують на неминучий прогрес і в цьому напрямі [2].

Основні переваги роботизації рослинництва включають: зменшення залежності від людської праці (особливо сезонної), підвищення точності і своєчасності агротехнічних операцій, зниження ресурсоемності (паливного, води, хімікатів) та стабільність якості виконання робіт. Роботи можуть працювати вночі, за будь-якої погоди і повторювати завдання з однаковою якістю, що людському фактору не завжди під силу. Крім того, легкі автономні машини менше шкодять ґрунту та біогеоценозам, сприяючи сталому землеробству.

Водночас, існують і виклики: висока початкова вартість придбання роботів стримує їх масове впровадження; необхідність навчання персоналу новим навичкам (робота з програмним забезпеченням, технічне обслуговування); питання надійності та ремонту в полі (робот має працювати безвідмовно, адже поломка у сезон може дорого коштувати); а також нормативні аспекти – забезпечення безпеки на полі поруч з людьми та технікою, відповідальність у разі збою тощо. Проте поступово ці бар'єри знижуються: технології дешевшають і стають надійнішими, з'являються сервіси підтримки, вдосконалюється законодавство [2].

Перспективи розвитку робототехнічних засобів в рослинництві є надзвичайно широкими. Можна очікувати, що в недалекому майбутньому типовим явищем стануть «розумні» поля, де рій спеціалізованих роботів спільно виконує всі польові операції, а фермер виступає більше як оператор-наглядач і аналітик, приймаючи рішення на основі даних, що надають роботи. Така трансформація відповідає концепції Agriculture 4.0, де цифровізація та автоматизація докорінно підвищують продуктивність і сталість агровиробництва. Україна, маючи значний аграрний потенціал, також поступово долучається до цього тренду – вже з'являються перші приклади використання роботів на вітчизняних полях, організовуються демонстрації та випробування. Надалі важливо інвестувати в освіту аграріїв, випробування техніки в локальних умовах та розвиток сервісної інфраструктури, щоб робототехніка стала масовим явищем і у нашому сільському господарстві [2].

1.3 Аналіз конструктивних особливостей робототехнічних засобів для обприскування

Сільськогосподарська техніка, як правило, оснащена або колісними, або гусеничними рушіями, максимальна ефективність яких значною мірою визначається умовами експлуатації. Гусениці забезпечують чудове зчеплення з ґрунтом завдяки більшій площі контакту. Велика пляма контакту дозволяє гусеницям пересуватися по нерівних поверхнях, на схилах, по мокрих і вологих ґрунтах. Гусенична система значно важча за шини, а також складніша в конструкції через велику кількість складових. Для великих сільськогосподарських тракторів потужність, що передається двигуном, використовується гусеницями тільки на 70%, в той час як шини будуть використовувати до 90%. Гусениці мають рухомі частини, яким властиво зношуватися в процесі експлуатації, отже знижується надійність рушія.

Ущільнення ґрунту, в свою чергу, також є одним із значних недоліків, пов'язаних із застосуванням гусеничного рушія. Випробування показали, що гусениці, на відміну від шин, чинять дуже нерівномірний тиск на ґрунт.

Фактично, кожен каток (у прикладі на трирядній гусениці) може чинити тиск на ґрунт на 50% більше, ніж шина, що означає глибоке ущільнення.

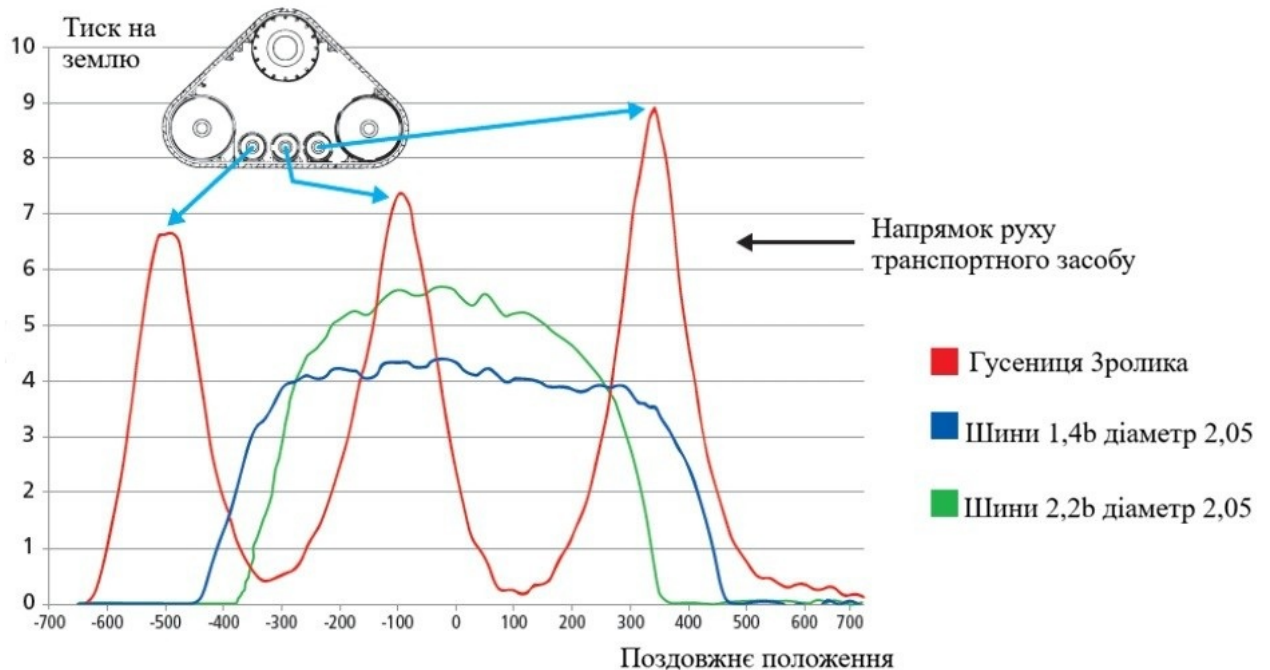


Рис. 1.10. Розподіл тиску шин і гусениць сільськогосподарської техніки.

Колісним рушіям характерна більш висока транспортна швидкість, а збільшений кліренс колісної бази дозволяє в меншій мірі пошкоджувати культури при русі по полях, що в свою чергу є важливою перевагою. У зв'язку з меншою масою шин і інерцією в системі приводу, застосування колісного рушія дозволить витратити меншу потужність. Простота конструкції забезпечить зручність обслуговування, низьку вартість і високу надійність рушія.

Кількість коліс визначається виходячи з можливостей подолання складних рельєфів опорної площини, простоти конструкції та ефективності застосування. Двоколісний транспортний засіб буде нестабільним на низьких швидкостях і вимагатиме складної системи управління, щоб підтримувати його у вертикальному положенні. Більший, шестиколісний транспортний засіб забезпечить більшу тягу, але ускладнить конструкцію через безліч компонентів,

збільшить вагу і вартість БПА. Отже, доцільним буде використання три- або чотириколісного транспортного засобу. Триколісна конструкція, що складається з двох передніх коліс і одного заднього колеса або ж навпаки, простіша, ніж конструкція з чотирма колесами, і відповідно має меншу кількість компонентів і вартість. Однак, через специфіку рельєфу сільськогосподарської місцевості чотириколісна система буде найбільш ефективною. Вона забезпечує чотири зони контакту, забезпечуючи більше зчеплення з ґрунтом і кращу стійкість на пересіченій місцевості. Таким чином, знижується ймовірність того, що БПА покотиться або знерухомиться. Вага транспортного засобу розподілена по чотирьох колесах, а не по трьох, що дозволить зменшити ущільнення ґрунту. Опір руху по мокрих і вологих ґрунтах буде зменшено в конструкції з чотирма колесами, а задні колеса будуть рухатися по коліях, створених передніми колесами.

Зміна напрямку руху БПА може досягатися наступними способами:

- поворотом керованих коліс (рис.1.11 а);
- складанням ланок транспортного засобу (рис. 1.11 б);
- зміною швидкостей коліс правого і лівого бортів (рис. 1.11 в).

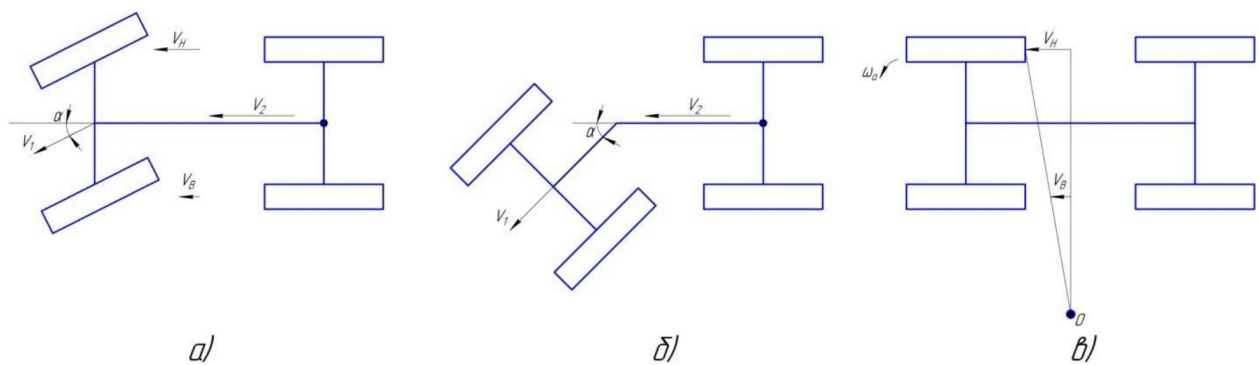


Рис. 1.11. Схеми повороту колісних машин: а – поворот керованих коліс; б – поворот ланок машини відносно одна одної; в – зміна швидкостей коліс лівого і правого бортів.

Маневрування за допомогою повороту керованих коліс є найбільш поширеним способом. Рульове управління з поворотними колесами в достатній мірі задовольняє більшість висунутих вимог.

У всіх випадках, коли це допустимо, кількість пар керованих коліс намагаються вибрати найменшою, оскільки це спрощує конструкцію рульового управління, підвищує стійкість руху за рахунок зменшення люфтів і високої жорсткості приводу. Ефективним способом поліпшення маневреності є збільшення кута повороту керованих коліс шляхом виконання всіх коліс керованими. Однак, як правило, погіршується стійкість руху машини і керованість. Іншим недоліком при чотирьох керованих колесах і однакових розмірах шин передніх і задніх коліс є значне зменшення базового простору для установки різних знарядь.

Поворот складанням ланок (рис.1.11, б) доцільний для спеціальних довгобазних транспортних засобів, від яких потрібна підвищена маневреність. При розташуванні шарніра посередині бази знижується і енергетична витрата на поворот машини на деформованих ґрунтах, оскільки задні колеса рухаються по колії передніх коліс.

Така схема дозволяє підвищити маневреність колісної машини. Кут складання може доходити до 90 градусів, а радіус повороту буде в 1,7-1,8 рази меншим, ніж у машини з передньою керованою віссю і такою ж базою. Основним недоліком шарнірно-зчленованих машин вважають конструктивні труднощі розміщення вантажної платформи. Іншим недоліком є зниження запасу стійкості до перекидання, що може призводити до втрати стійкості однієї секції незалежно від іншої. Особливо погіршується стійкість машин, у яких робоче обладнання значно винесено за габарити машини.

Проведений аналіз показує, що найбільш ефективним способом підвищення маневреності колісних машин є застосування повороту шляхом зміни швидкостей коліс лівого і правого бортів бортової або комбінованої системи повороту.

Застосування неповоротних коліс для БПА дозволить спростити привід ведучих коліс, збільшити корисний об'єм кузова, встановлювати шини більшого

розміру, що в сукупності позитивно позначиться на надійності та ефективності рульового управління БПА.

Малогабаритність і тягові властивості є основними параметрами при виборі електродвигуна для БПА. Відповідним співвідношенням потужності до ваги двигуна володіє безколекторний двигун постійного струму (БДПТ).

Він компактний у порівнянні з іншими тяговими двигунами, оскільки створює сильне магнітне поле в малому обсязі, а також має високу щільність крутного моменту.

БДПТ є електродвигуном постійного струму, у якого щітко-колекторний вузол замінений напівпровідниковим комутатором, керованим датчиком положення ротора. Даний двигун має високий ресурс. Висока перевантажувальна здатність і високий пусковий момент також відносяться до переваг двигуна подібного типу. Електродвигун має високу швидкодію по перехідних процесах, має широкий діапазон регулювання по частоті обертання 1:10000 і більше. Цей показник на два порядки вище, ніж у асинхронних електродвигунів. БДПТ мають кращі коефіцієнт потужності $\cos\phi$ і ККД, який при всіх навантаженнях становить понад 90%. Що стосується асинхронних механізмів, то в їх випадках на половинних навантаженнях ККД досягає не більше 60%. Основні два типи БДПТ – це двигуни із зовнішнім або внутрішнім ротором (рис. 1.12).

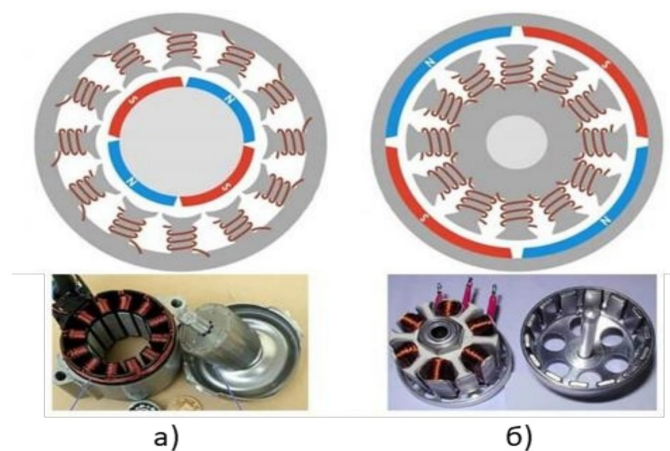


Рис. 1.12. Безколекторний двигун постійного струму: а – з внутрішнім ротором; б – із зовнішнім ротором.

Привід БПА на основі БДПТ із зовнішнім ротором дозволить виключити додаткові передачі, тим самим збільшивши надійність трансмісії та підвищивши ККД машини. Великий пусковий момент і широкий діапазон регулювання за частотою будуть істотними показниками якісного та ефективного обприскування сільськогосподарських культур.

Для здійснення зворотного зв'язку з положенням вала механічного пристрою можуть застосовуватися різні датчики. Найбільш підходящим варіантом для практичної реалізації будуть датчики з ефектом Холла, які мають більшу точність і менше запізнюються при передачі даних в каналі зв'язку.

Акумуляторна батарея є одним з найважливіших елементів БПА. Тип і потужність батареї при підборі джерела живлення буде одним з основних параметрів, що визначають вагу і собівартість пропонованого технічного рішення. Від ємності акумуляторної батареї буде залежати час роботи і дальність ходу БПА. Виходячи з даних характеристик, необхідно підібрати акумуляторну батарею, здатну поєднувати в собі найбільш оптимальні параметри для БПА у співвідношенні ціна-вага-ємність. На сьогоднішній день, в мобільній техніці на електроприводі в основному використовуються свинцево-кислотні та літієві акумуляторні батареї.

Свинцево-кислотні батареї є одними з найперших винаходів серед акумуляторних батарей, хоча і до цього дня мають широке застосування.

Перевагами даного типу батарей є низька ціна, низький рівень саморозряду, стабільність поданого струму, а також великий діапазон ємностей з представленого на ринку асортименту. Істотними недоліками свинцево-кислотних батарей є великі габарити і вага, а також необхідність регулярного дозаправлення електроліту в обслуговуваних моделях. З огляду на всі переваги і недоліки, даний тип акумуляторних батарей знайшов широке застосування в мобільній техніці, що працює на двигунах внутрішнього згоряння, в якості тягових джерел живлення в електрокарах, моторних човнах і спецтехніці, а

також в стаціонарному обладнанні, яке вимагає зберігання енергії, а вага не є визначальним параметром.

Виключити недоліки свинцево-кислотних акумуляторів здатні літієві батареї, принцип роботи яких полягає в тому, що іони літію курсують між анодом і катодом під час заряду і розряду. Конструкція елемента і особливості хімічних процесів на аноді, катоді і в електроліті впливають на ефективність роботи акумулятора. Літієві акумулятори мають значні технічні переваги в порівнянні зі свинцево-кислотними.

Визначальними параметрами на користь вибору літієвих акумуляторів для БПА є менші габарити і вага, а також висока питома енергоємність. Свинцево-кислотні акумулятори віддають менше ємності при збільшенні струму розряду. Чим коротший час розряду, тим меншу ємність віддає свинцево-кислотна батарея.

Висновки по розділу

Проведений аналіз сучасного стану питання показав, що недоліком існуючих технічних засобів для внесення ЖМУ і ЗЗР є те, що в більшості випадків вони є причіпними до тракторного агрегату, а також те, що всім відомим системам для обприскування властиві великі експлуатаційні витрати, пов'язані з експлуатацією та обслуговуванням ДВС. Також, не виключено шкідливий вплив хімікатів на оператора-водія і зайве забруднення навколишнього середовища.

Сучасна тенденція розвитку мобільної техніки, що полягає в застосуванні електричних приводів з живленням від акумуляторних батарей, дозволить виключити недоліки, пов'язані з використанням ДВС, і тим самим поліпшити екологічні показники продукції та технологічного процесу в цілому. Нинішня необхідність цифровізації та автоматизації сільськогосподарського виробництва зумовлює розробку та впровадження інтелектуальних систем управління

операціями, які, в свою чергу, дозволять зменшити трудовитрати і збільшити врожайність.

Проведений аналіз існуючих робототехнічних рішень в області рослинництва та їх досліджень показав, що, як правило, більшість розробок мають схожість в конструктивному виконанні. Це мобільна колісна платформа з електроприводом, на якій розташовується необхідне обладнання для здійснення будь-якого технологічного процесу (моніторинг, прополювання, обприскування). Модульна конструкція машин дозволяє збільшувати універсальність застосування, спрощує їх транспортування, спрощує підготовку до роботи і обслуговування систем.

Ефективність обприскування підвищується зі зменшенням крапель вноситься рідини, однак, в той же час зростає і ймовірність знесення вітром і випаровування отрутохімікатів. Для усунення даного недоліку пропонується примусово осаджувати краплі вноситься рідини за допомогою надання їм електричного заряду.

Відомим способом електростатичної зарядки крапель вносимої рідини є прикладання до електрода постійної (незмінної) за амплітудою електростатичної напруги. В даний час відсутні серійно випускаються обприскувачі з електростатичною зарядкою крапель, а наявні прототипи потребують істотних доопрацювань, удосконалень і модифікацій.

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ БЕЗПІЛОТНОГО АГРЕГАТА З ПРИСТРОЄМ ЕЛЕКТРОЗАРЯДКИ КРАПЛІВ ВНОСИМОЇ РІДИНИ

2.1 Опис безпілотного агрегату з пристроєм електрозаряджання крапель внесеної рідини

Проведений аналіз наявних технічних засобів для обприскування показав, що застосування агрегатів на електротязі з інтелектуальною системою керування дає змогу зменшити трудові витрати, підвищити урожайність продукції та покращити екологічні показники технологічного процесу в цілому.

З урахуванням поданого в першому розділі аналізу конструктивних особливостей існуючих робототехнічних засобів у рослинництві, пропонується наступне виконання БПА (рис. 2.1) [1].

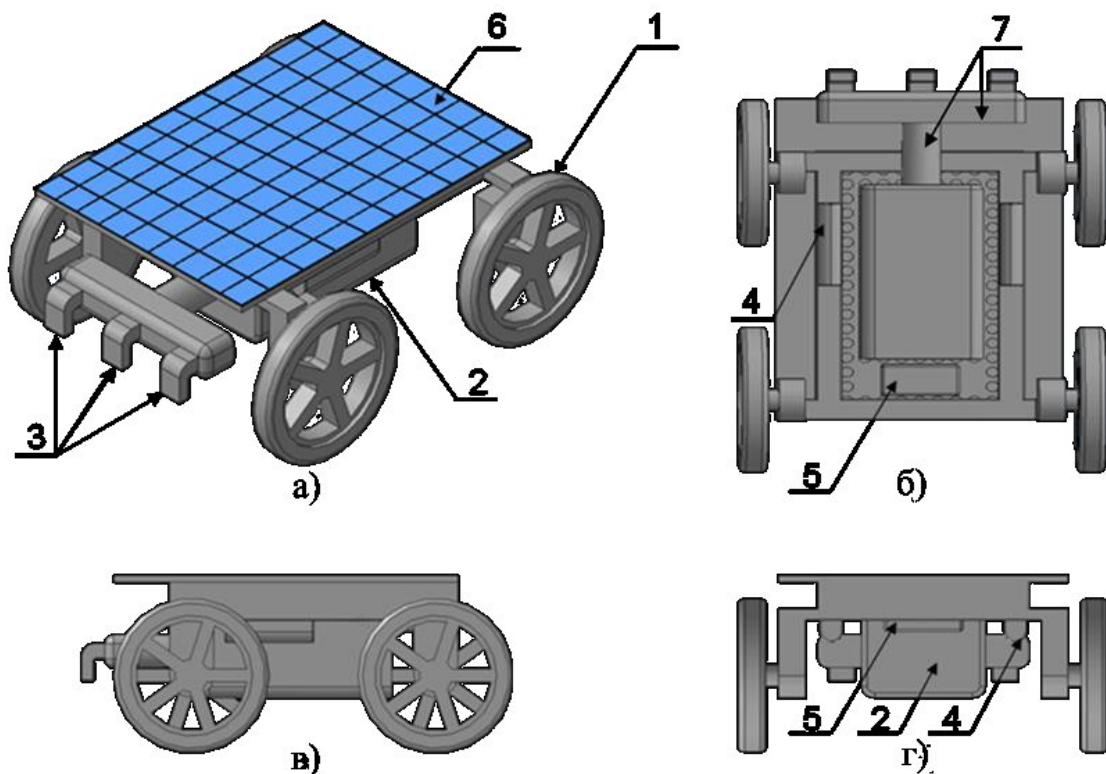


Рис. 2.1. Безпілотний агрегат: а) загальний вигляд; б) вигляд знизу; в) вигляд збоку; г) вигляд спереду.

БПА здатний виконувати поставлені завдання за допомогою апаратно-програмного комплексу та автоматично здійснювати рух за заданим маршрутом без участі оператора. Конструктивно БПА являє собою універсальне модульне електрошасі з пристроєм для внесення пестицидів в електростатичному полі. Рушій агрегату виконано у вигляді суцільної прямокутної рами з незалежно керованими колесами 1, кожне з яких оснащено окремим електроприводом із безколекторним двигуном постійного струму. Із ємності з робочим розчином 2 рідина, що вноситься на сільськогосподарські культури, подається по магістралі 7 агрегату через форсунки 3 та потрапляє на оброблювану поверхню. Джерелом живлення БПА є літій-іонні акумуляторні батареї 4. Під час роботи в умовах відкритого ґрунту передбачена можливість використання додаткового джерела енергії за рахунок сонячної панелі 6 [1].

БПА автоматично рухається за заданим маршрутом і вносить рідкі пестициди за допомогою системи керування та навігації 5 [1].

Поворот електроагрегату здійснюється за рахунок різниці швидкості обертання зовнішніх роторів безколекторних двигунів постійного струму (БДПС) кожного колеса, алгоритм роботи яких закладено в систему керування [1].

Система керування контролює та регулює роботу електроприводу в цілому (швидкість обертання коліс, крутний момент двигунів, струми переривника та траєкторію руху відповідно до заданого курсу). Система керування БПА складається з двох основних частин [1]:

- силового кола, яке включає акумуляторну батарею, відновлюване джерело енергії (сонячну панель), контролер двигуна та БДПС;
- інформаційного блоку, що містить навігаційну систему та систему керування приводом.

Правильний вибір технічних характеристик електродвигуна є важливим показником надійності та працездатності БПА в цілому. Визначення необхідної потужності та крутного моменту електродвигунів значною мірою залежить від

сил опору, прикладених до БПА, які він повинен подолати. Для врахування всіх опорів було складено кінематичну схему БПА з діючими на нього силами (рис. 2.2) [1].

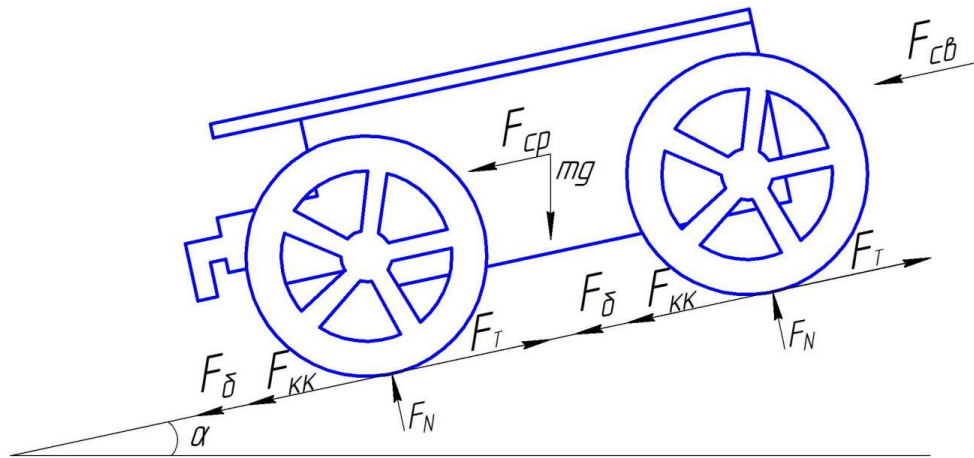


Рис. 2.2. Кінематична схема БПА [1]

Силами, що діють на БПА, є: сила опору коченню колеса $F_{кк}$, сила інерції F_{cp} , сила опору ухилу F_{cy} та сила опору повітря $F_{св}$ [1].

Під час кочення колеса відбуваються складні явища пружних і непружних деформацій шини та опорної поверхні, оскільки рух здійснюється по ґрунту. Ці деформації супроводжуються незворотними втратами енергії, величина яких значною мірою залежить від маси та швидкості БПА, а також від параметрів колеса і властивостей опорної поверхні. Під час роботи БПА система керування безперервно приймає радіонавігаційні сигнали зі супутників, на основі яких визначається поточне положення агрегата. Також на основі цих сигналів програма керування обчислює величину відхилення від заданої траєкторії. При цьому формуються сигнали, які у вигляді напруги надходять на електропривод кожного колеса [1].

Розбіжність між фактичним положенням БПА та заданою траєкторією визначається за поточними координатами і розрахунковою траєкторією руху агрегату. Прийmemo, що радіус повернення БПА на заданий курс при його відхиленні буде дорівнювати величині відхилення A , яка визначається відстанню від геометричного центра агрегату до лінії заданої траєкторії шляху, проведеною перпендикулярно. Для теоретичних досліджень та обґрунтування

конструктивно-технологічних параметрів агрегату необхідно скласти кінематичну схему руху БПА по полю (рис. 2.3) [1].

Під час складання кінематичної схеми руху БПА прийнято такі припущення: центр мас агрегату розташований у геометричному центрі корпусу; обидва колеса кожного борту обертаються з однаковою швидкістю і постійно контактують з опорною поверхнею [1].

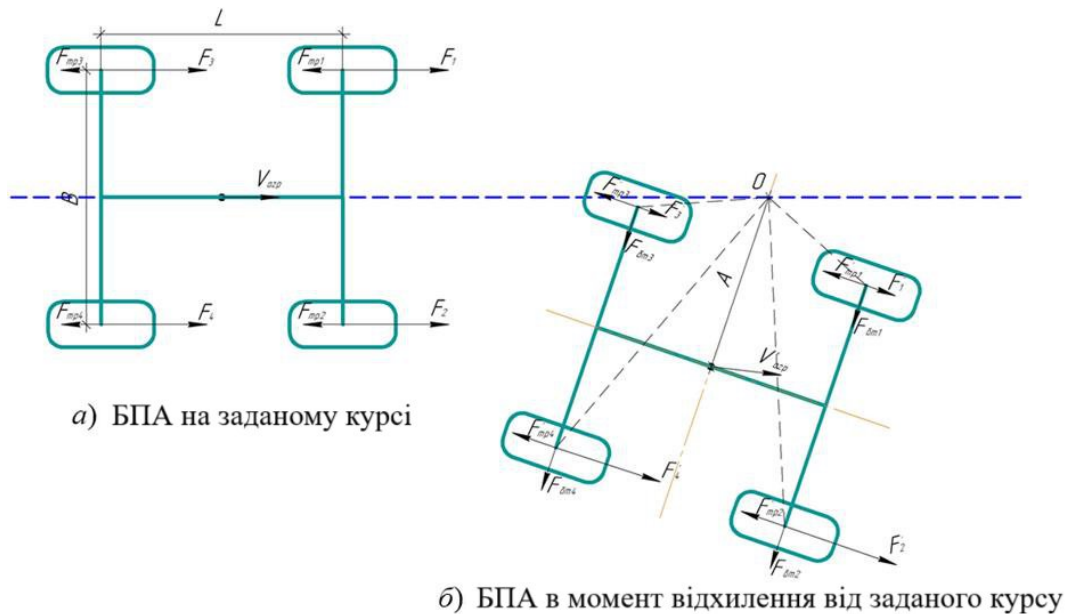


Рис. 2.3. Кінематична схема руху БПА: а) на заданому курсі; б) у момент відхилення від заданого курсу [1].

Під час повернення БПА на заданий курс виникає бічна сила, що спричиняє бічне відведення (увід).

Оптимальний розмір крапель при обприскуванні знаходиться в діапазоні (100-600) мкм. Меншим краплям характерна більш висока рівномірність розподілу по площі оброблюваного об'єкта і більш активне проникнення в тіло комах-шкідника і в рослину. У той же час, менші краплі більш схильні до ризику знесення вітром і випаровування. Для усунення даного недоліку пропонується примусово осаджувати внесену рідину за допомогою електрзарядки крапель (рис. 2.4).

В електрично зарядженому аерозолі виникають додаткові сили взаємодії частинок - електростатичне розсіювання і дзеркальне відображення, що сприяє

вирівнюванню концентрації по обсягу при одночасному збільшенні швидкості осадження.

Даний спосіб обприскування полягає в наступному: всередину ємності з робочою рідиною нагнітається повітря за допомогою вихрового вентилятора, ультразвуковий генератор з робочої рідини утворює краплі розміром (100-200) мкм. Під впливом вихрових потоків краплі вносимої рідини направляються по магістралі до сопел, на кінцях яких встановлені електроди, проходячи через які, краплі набувають заряд і потрапляють в зону обробки сільськогосподарських культур.

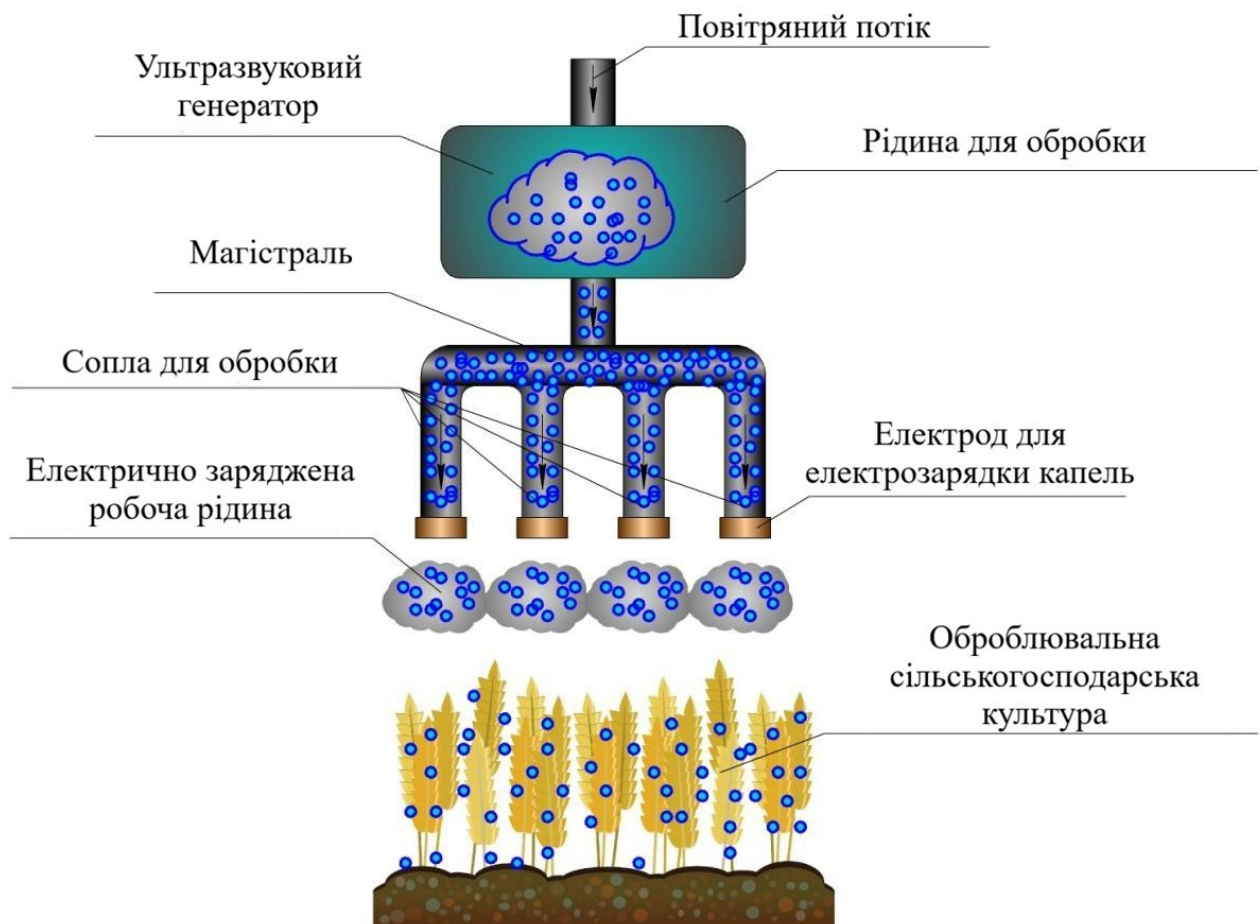


Рис. 2.4. Обприскування з електричною зарядкою крапель.

Згідно з розрахунками, при збільшенні напруги, що подається на електрод, зростає і щільність осадження електрично заряджених крапель на оброблювані рослини, однак, на практиці, при високих напругах дисперсність внесених крапель може збільшитися.

2.2. Експериментальне обладнання

Для проведення випробувань і підтвердження ефективності запропонованого технічного рішення, в на кафедрі агроінженерії Поліського національного університету був виготовлений експериментальний зразок БПА з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Розроблений БПА з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини

Технічні характеристики БПА і пристрою для електрозарядки крапель вносимої рідини представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики БПА і пристрою для електрозарядки крапель вносимої рідини

№	Найменування величини	Значення
1	Габарити (довжина/ширина/висота)	1740/1500/950 мм
2	Колія	900 мм
3	Колісна база	1050 мм
4.	Дорожній просвіт	500 мм
5	Маса без навантаження	100 кг
6	Максимальна дозволена маса	180 кг
7	Запас ходу	До 45 км
8	Швидкість руху агрегату	5-15 км/год
9	Напруга живлення	48
10	Об'єм бака для робочої рідини	100
11	Ширина захвату	1,5
12	Напруга живлення пристрою	48
13	Напруга (потенціал) на електроді	10-20 кВ
14	Продуктивність установки	0,64-1,53 га/год
15	Максимальна потужність сонячної панелі	400 Вт
16	Точність GPS приймача	до 5 см

БПА оснащений чотирма керованими мотор-колесами на основі БДПТ. Мотор-колесо являє собою мотор-редуктор з колесом з гумовою шиною і валом для можливої установки диска оптичного енкодера. Мотор-колеса багатофункціональні, оскільки є розподільними, перетворювальними, ходовими та гальмівними пристроями БПА. Окремі контролери забезпечують незалежне керування кожним мотор-колесом, що є необхідним через велику різницю в кількості обертів коліс при повороті агрегату. В результаті аналізу різних драйверів був зроблений висновок про раціональність використання Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Плата драйвера двигуна Pololu dual vnh5019

БПА має неповоротні колеса. Для повороту використовується метод бортового розвороту або «танковий поворот». Дане технічне рішення має наступні переваги

- можливість індивідуального управління силовим потоком таким чином, що мотор-колеса, які знаходяться в кращих умовах зчеплення, розвивають максимальне тягове зусилля;
- менші витрати на обслуговування в порівнянні з витратами при механічних, і тим більше гідромеханічних трансмісіях;
- простота і ефективність автоматизації управління рухом. БПА забезпечується автономним джерелом електроенергії – акумуляторною батареєю, заряду якої достатньо для проходження заданого маршруту, після чого можлива прискорена зарядка акумуляторів протягом короткого проміжку часу або швидка заміна акумуляторних батарей.

В основі системи управління лежить мікроконтролер, що дозволяє здійснювати управління контролером тягових електродвигунів з використанням зворотного зв'язку в функції постійності потужності, а також реалізовувати захист від перенапруг і струмів, що перевищують номінальні значення. Управління здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції напруги, що живить двигун. При даному способі управління за відсутності навантаження на одному з коліс швидкість обертання пропорційна коефіцієнту заповнення імпульсів. Ядром системи є однокристальний 8-бітний RISC мікроконтролер ATmega328 на базі апаратної платформи Arduino UNO. Arduino - це інструмент

для проектування електронних пристроїв з можливістю прийому сигналів від різних цифрових і аналогових датчиків і для взаємодії з навколишнім фізичним середовищем і управління різними виконавчими пристроями. Ця платформа призначена для управління процесами з використанням електронно-обчислювальних машин з відкритим програмним кодом, побудована на простій друкованій платі з сучасним середовищем для написання програмного забезпечення. Плати Arduino будуються на основі мікроконтролерів фірми Microchip [8], а також елементів обв'язки для програмування та інтеграції з іншими схемами. На платах присутній лінійний стабілізатор напруги +5 В або +3,3 В. Тактування здійснюється на частотах 8, 16 або 87 МГц кварцовим резонатором. У мікроконтролер попередньо прошивається завантажувач, тому зовнішній програматор не потрібен. На концептуальному рівні всі плати програмуються через RS-232. Середовище розробки засноване на мові програмування Processing, це мова C++, доповнена деякими бібліотеками.

Висновки по розділу

Запропоновано БПА з пристроєм для надання електричного заряду краплям вносимої рідини. БПА являє собою універсальне, модульне шасі з навісним обладнанням, приводом якому служать БДПТ. Агрегат має неповоротні колеса і здійснює поворот за допомогою різниці швидкостей окремих коліс.

Складена кінематична схема БПА, що враховує, що основними силами, що діють на БПА, є сила опору коченню.

Розроблено дослідний зразок БПА з пристроєм для надання електричного заряду краплям вносимої рідини.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Результати експериментальних досліджень щодо точності руху БПА

За викладеною в 2 розділі методикою в польових умовах проведені дослідження з визначення точності проходів в різних режимах роботи і при різній польовій вологоємності. На підставі отриманих даних побудовано залежність відхилення руху БПА від пройденого шляху на довжині гону 300 м в ручному режимі управління при різній польовій вологоємності (рис. 3.1)

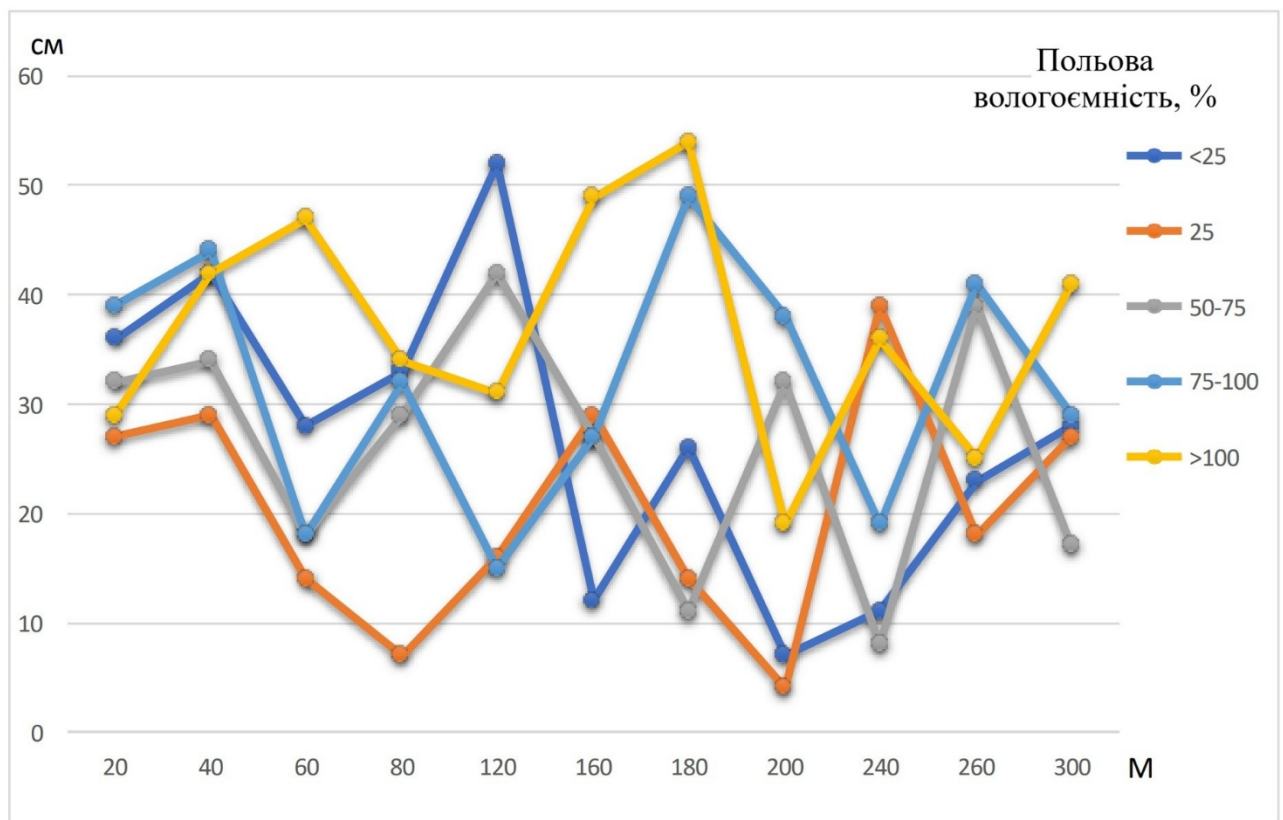


Рис. 3.1. Відхилення руху БПА від траєкторії руху в ручному режимі управління

З залежностей, представлених на рисунку 4.1, видно, що найсильніше відхилення від траєкторії руху БПА від траєкторії руху БПА на більш сухій

поверхні при ручному управлінні відбувається при польовій вологості більше 80 %. Це обумовлено тим, що прохідність в рази гірша, ніж під час руху БПА на більш сухій поверхні.

Так само можна спостерігати стагнацію в управлінні в залежності від пройденого шляху. Позначається людський фактор, монотонна робота сильно втомлює оператора БПА, внаслідок чого час реакції збільшується, а увага притупляється.

На рис. 3.2 представлений графік відхилення руху БПА при автоматичному режимі управління за супутниковими радіонавігаційними сигналами.

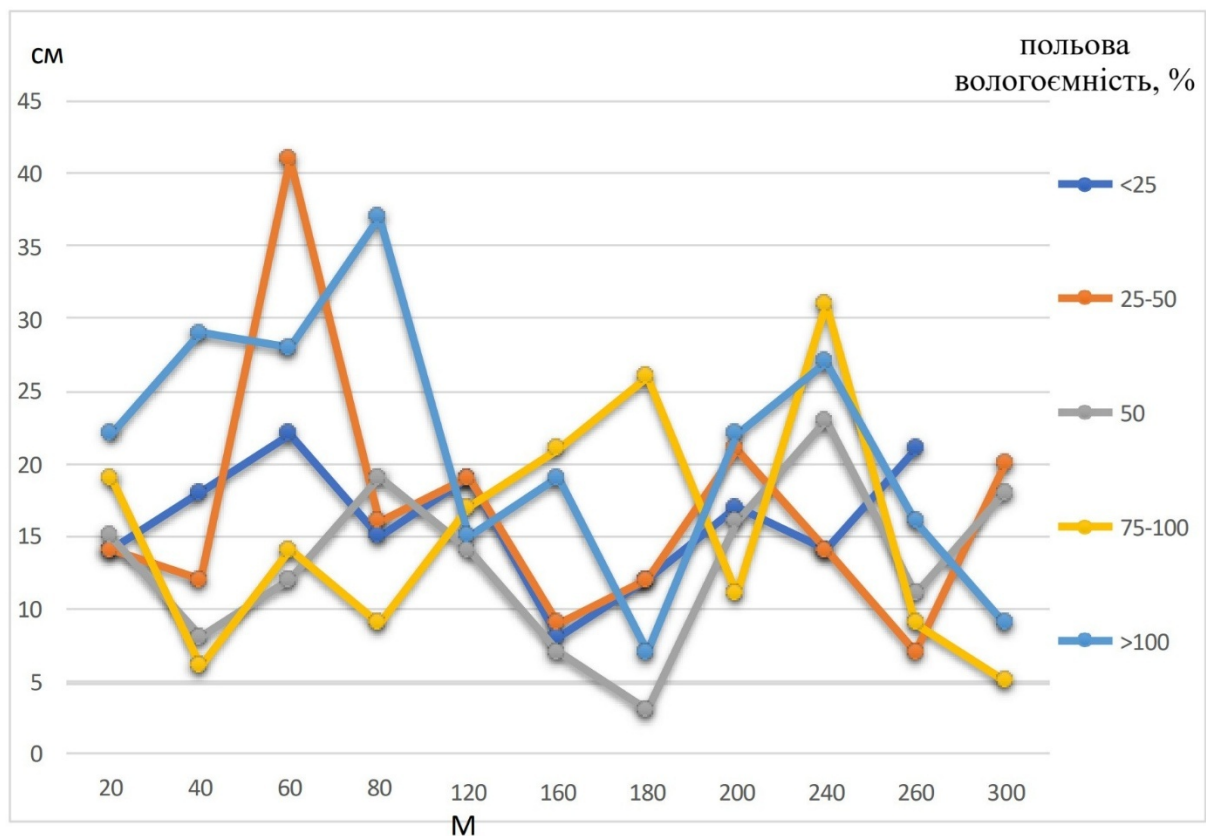


Рис. 3.2. Відхилення руху БПА від траєкторії руху в автоматичному режимі управління.

З наведеної на малюнку залежності випливає, що точність руху БПА по заданій траєкторії досить висока. Але варто відзначити рух при польовій вологості більше 80%, де спостерігаються більш сильні відхилення від

курсу. Налипання землі на протектор коліс ускладнює не тільки рух БПА, але і впливає на точність його руху.

При проведенні випробувань було виявлено, що найменше відхилення було досягнуто при автоматичному режимі управління. Найбільше при русі БПА при польовій вологоємності більше 80% в ручному режимі управління.

Результати відхилень від траєкторії руху БПА залежно від режимів управління при різній польовій вологоємності зведені в таблицю 4.2 і представлені на рисунку 3.3.

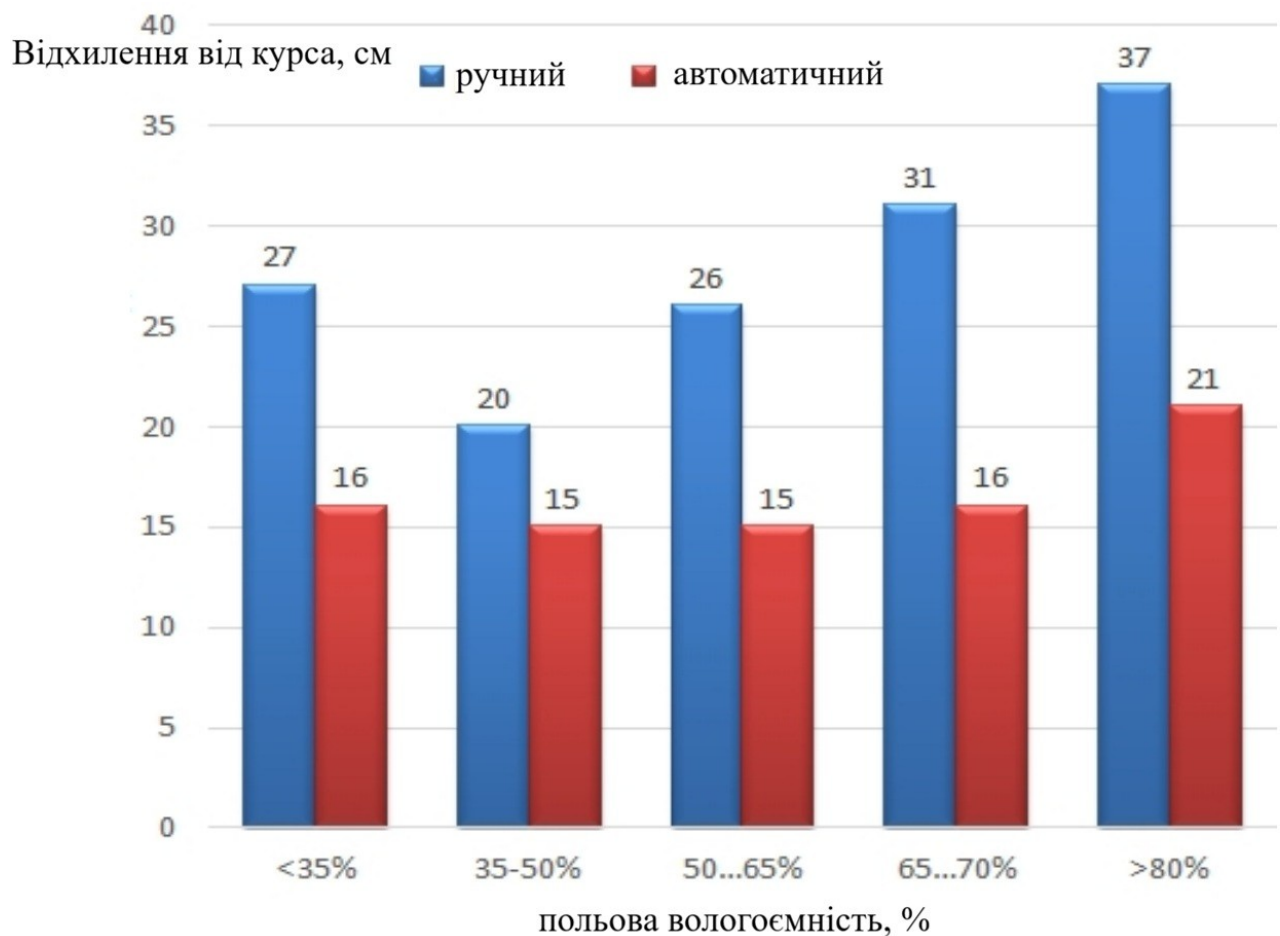


Рис. 3.3. Середнє відхилення від курсу при різних режимах руху і польовій вологоємності.

3.2 Результати експериментальних досліджень пристрою електрзарядки крапель вносимої рідини.

В результаті випробувань методом «великого колектора» отримано значення питомого заряду крапель вносимої рідини в залежності від швидкості руху агрегату (витрати рідини) при різній напрузі, що подається на електрод, дана залежність представлена на рисунку 4.4.

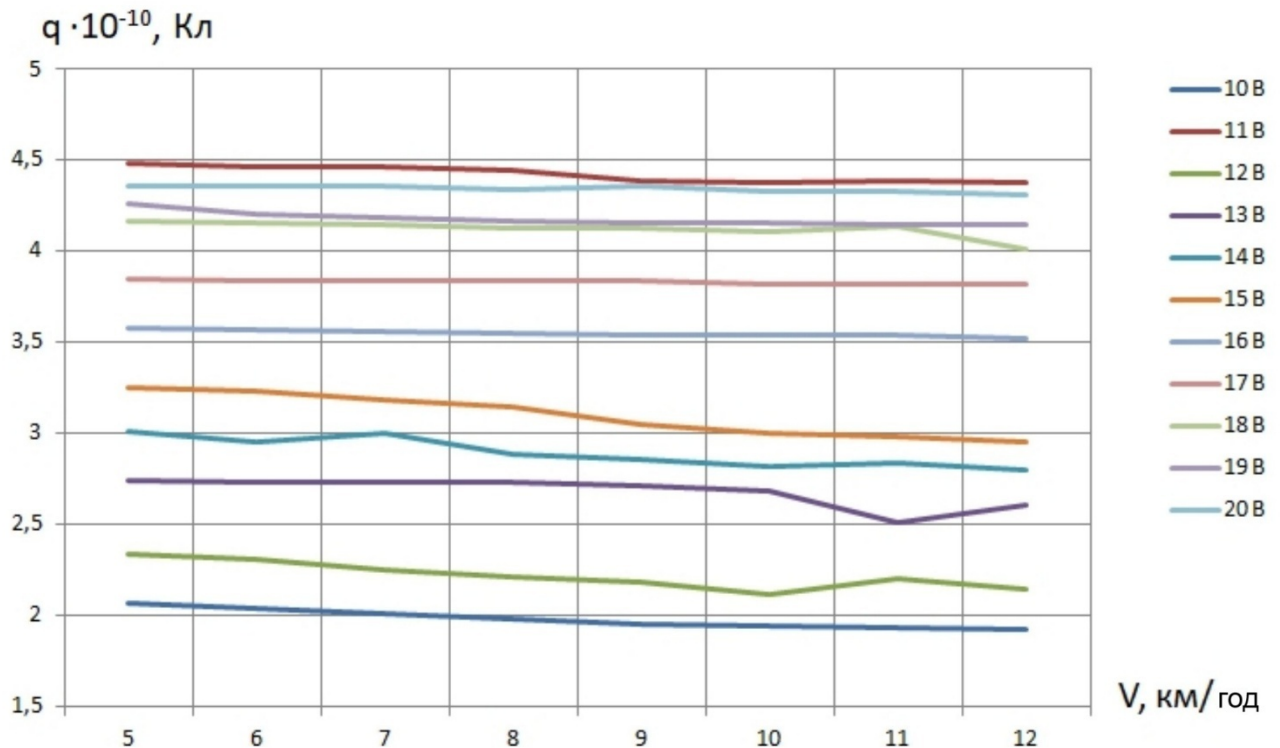


Рис. 3.4. Залежність питомого заряду крапель вноситься рідини від швидкості руху БПА при різній напрузі, що подається на електрод.

Оскільки робочий розчин, як правило, має в складі мінімум 90% води, то лінія, що характеризує залежність питомого заряду від швидкості руху БПА, майже паралельна осі швидкості. Таким чином, витрата рідини в даному випадку має незначний вплив на заряджання крапель. Домогтися більшої зарядженості можна за допомогою підвищення діелектричної постійної, наприклад шляхом додавання електропровідних присадок в розчин.

Згідно з експериментальними дослідженнями, описаними в третьому розділі, отримано залежність щільності осадження електрично заряджених крапель від напруги, що подається на електрод (рис. 3.5).

Зниження середньої питомої щільності осадження електрично заряджених крапель при подальшому збільшенні напруги пов'язане зі зменшенням діаметра

крапель через їх додаткове дроблення в електростатичному полі, в результаті краплі стають більш чутливими до руху повітряних мас. Зображення маркерів при обприскуванні буряка із застосуванням пристрою для надання електричного заряду краплям вносимої рідини з різною напругою, що подається на електрод, представлені на рис. 3.6.

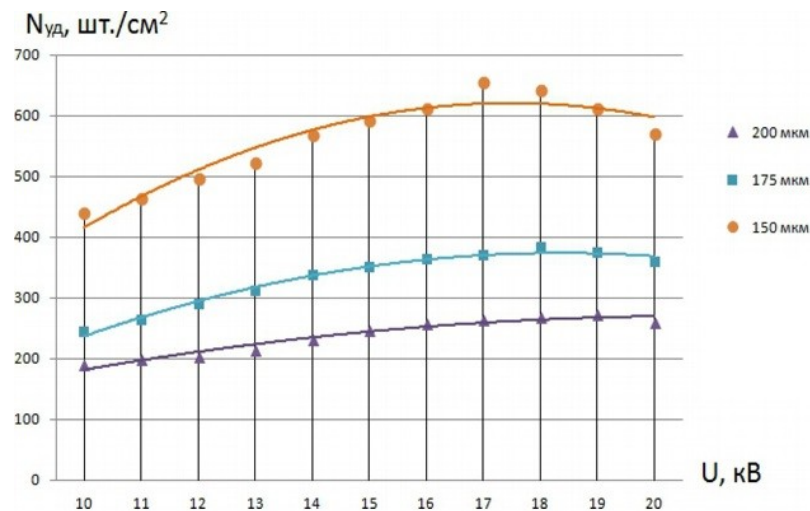


Рис. 3.5. Залежність питомої щільності осадження електрично заряджених крапель від напруги на електроді

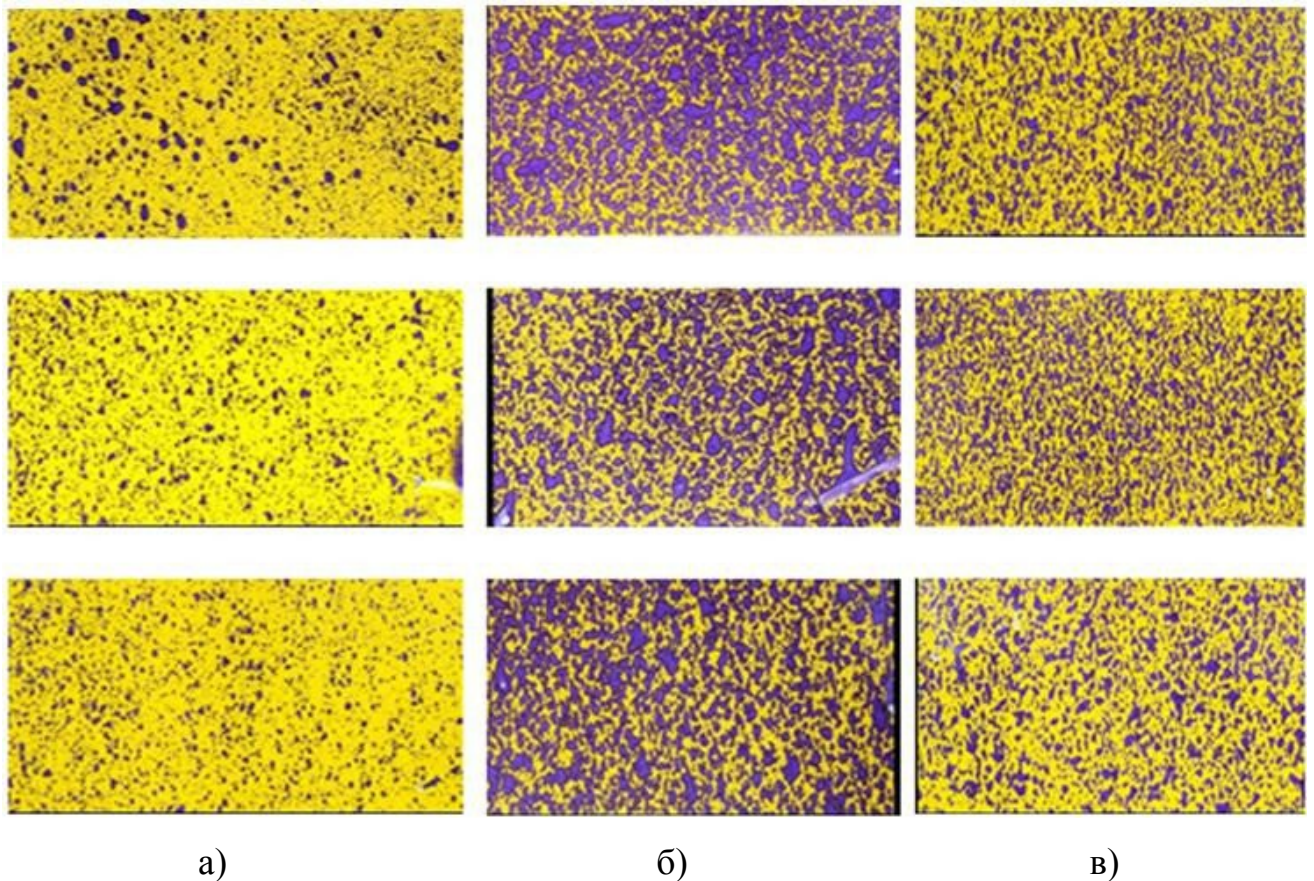


Рис. 3.6. Зображення маркерів при електростатичному обприскуванні буряка: а – 15 кВ; б – 17 кВ; в – 20 кВ.

3.3 Результати експериментальних випробувань обприскування та внесення РМД за допомогою БПА з пристроєм електрзарядки крапель вносимої рідини

На рисунках показано залежності кількості крапель (густоти покриття, крапель/см²) на оброблюваній поверхні листа від вологості повітря і температури навколишнього середовища при обприскуванні сільськогосподарських культур без пристрою електрзарядки крапель вносимої рідини (рис. 3.7) і із застосуванням пристрою електрзарядки крапель вносимої рідини (рис. 3.8).

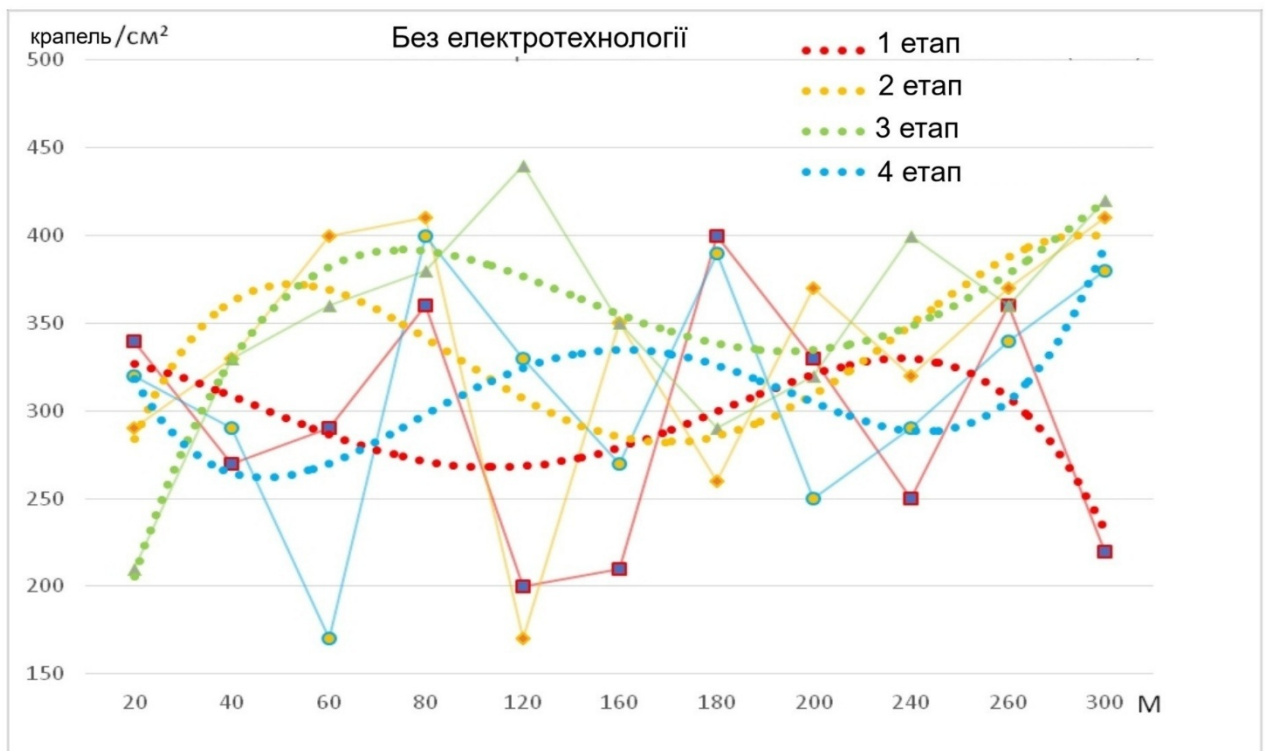


Рис. 3.7. Залежності кількості крапель (густоти покриття) на оброблюваній поверхні листа від вологості повітря і температури навколишнього середовища при обприскуванні сільськогосподарських культур без пристрою електрзарядки крапель вноситься рідини

З графіка видно, що найбільша густота покриття листа відбувається на 3 етапі. Це обумовлено тим, що такі параметри відповідають агротехнічним

вимогам. Також можна помітити зниження густоти покриття листа на 1 і 4 етапах. Це пов'язано з тим, що медіанні діаметри краплі менше 210 мкм і вони схильні до знесення вихровими потоками (вітром), а при високих температурах навколишнього середовища - до випаровування. Даний спосіб обробки сільськогосподарських культур через малий розмір крапель має недоліки в порівнянні з повнооб'ємною обробкою.

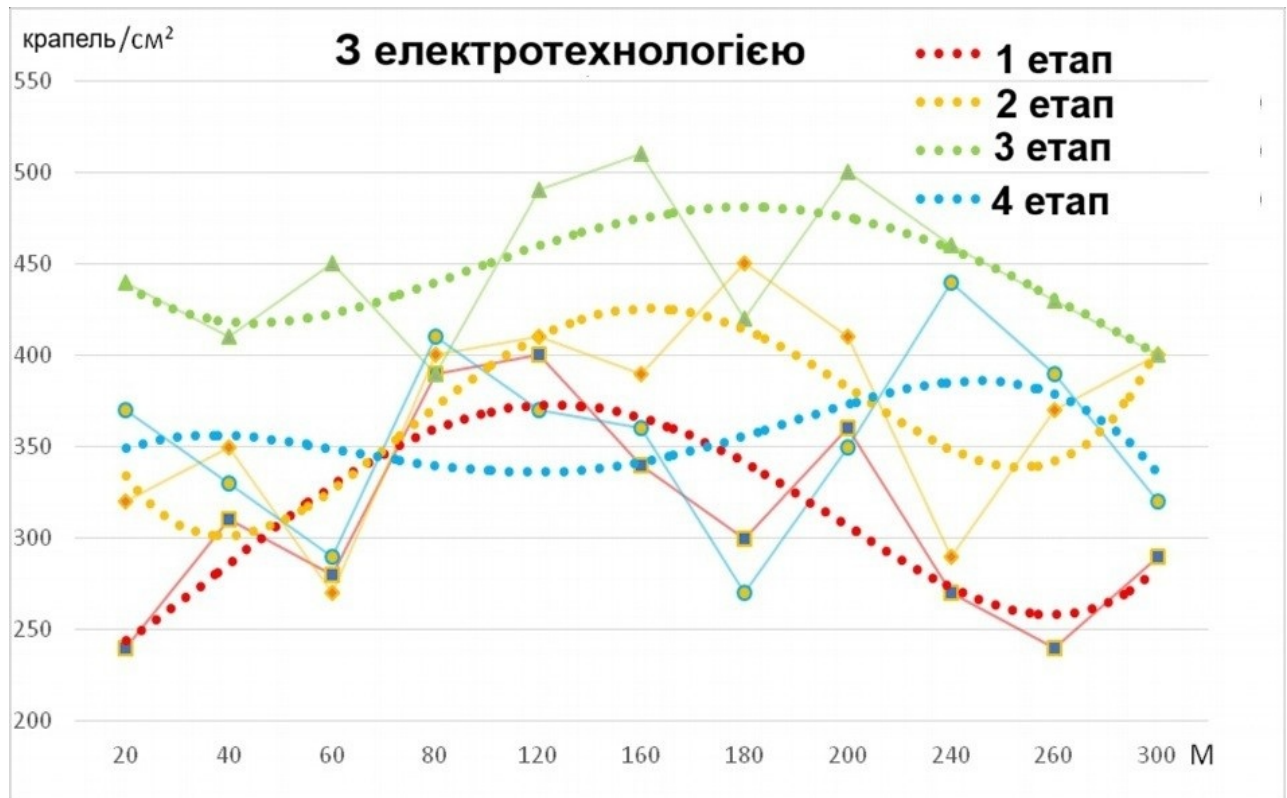


Рис. 3.8. Залежності кількості крапель (густоти покриття) на оброблюваній поверхні листа від вологості повітря і температури навколишнього середовища при обприскуванні сільськогосподарських культур з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини.

Завдяки електротехнології густина покриття листа більш рівномірна і може конкурувати з повнооб'ємною обробкою (обприскуванням). При проведенні випробувань було виявлено, що найбільша кількість крапель (густина покриття, крпель/см²) була досягнута із застосуванням електротехнології при температурі повітря 16...22°C і вологості 30...50%.

Найменша кількість крапель (густина покриття, крапель/см²) при температурі повітря 0...70С і вологості більше 70% без застосування електротехнології.

Залежність густоти покриття (середнє значення) на оброблюваній поверхні листа від вологості повітря і температури навколишнього середовища при експериментальних дослідженнях обприскування сільськогосподарських культур на різних етапах показана на рис. 3.9.

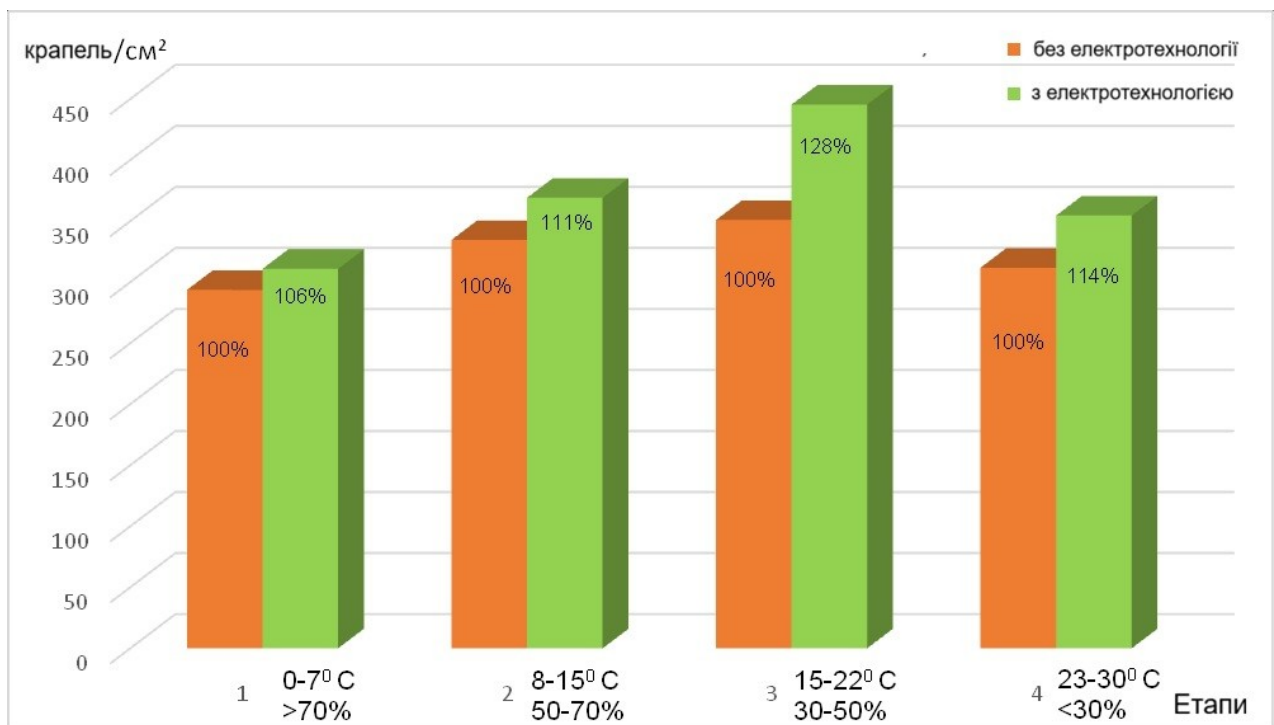


Рис. 3.9 Залежність щільності покриття (середнє значення) на оброблюваній поверхні листа від вологості повітря і температури навколишнього середовища при обприскуванні сільськогосподарських культур.

Густота покриття крапель залежить від температури і вологості навколишнього середовища. Найменша кількість крапель виявлена на 1 етапі (температура 0-7⁰ С, вологість >70%), це пов'язано з тим, що висока вологість повітря і низька температура призводять до уповільненого випаровування, і краплі вносимої рідини зносяться вихровими потоками за периметр обробки, що в свою чергу позначається на ефективності обробки. Застосування пристрою електрзарядки крапель дає приріст кількості крапель всього на 6%, що є недостатнім як з агротехнічної точки зору, так і з економічної. На 4 етапі

(температура 23-30° С, вологість <30%) видно, що чим вища температура і нижча вологість, тим швидше краплі випаровуються і можуть повністю висихати, тобто ефективність препарату, що приземлився на рослину у вигляді такої «сухої» краплі, знижується. Застосування пристрою електрочарядки крапель дає приріст у 14%.

Обробка ж із застосуванням електротехнології дозволяє збільшити кількість крапель, що осідають на рослину при відносній вологості повітря 30%-70% і температурі 8-22°С до 28%. Такі параметри вологості повітря і температури навколишнього середовища найбільш сприятливі для стікання електричних зарядів. Отже, осадження (прилипання) заряджених крапель вносимої рідини при такому способі обробки є більш ефективним способом внесення в порівнянні з традиційною обробкою (без застосування електротехнології).

Внесення РМД за допомогою БПА з пристроєм надання електричного заряду краплям вносимої рідини дозволило підвищити кількість продуктивних стебел, довжину колоса, масу 1000 зерен, і відповідно збільшити врожайність пшениці сорту Ватан.

Максимальну врожайність яра пшениця сформувала на варіанті внесення БПА з пристроєм електрочарядки крапель вносимої рідини і дозою НРК 5л/га +200 л. води, і вона склала 2,6 т/га, що більше на 0,2 т/га, ніж при внесенні добрив традиційним способом. Результат забезпечений завдяки рівномірному розподілу розпилюваних крапель на поверхні і посиленому прилипанню робочого розчину. Зі зменшенням дози робочого розчину зростання врожайності не спостерігалось, вирішальну роль тут міг зіграти знос або дрейф крапель за рахунок малого обсягу робочої рідини. Також поведінка крапель залежить від багатьох факторів, таких як розміри, інерція і сила тяжіння.

Висновки по розділу

Результати польових випробувань на точність руху за супутниковими радіонавігаційними сигналами доводять працездатність розробленої системи управління. Реалізована траєкторія БПА відрізняється від заданої в середньому на 0,16 м при середній швидкості 7 км/год.

Результати лабораторних випробувань дозволили довести, що електрозарядка крапель дозволяє отримати більш рівномірне внесення рідини по всій площі оброблюваної поверхні. Найбільш ефективно прикладати напругу в 17 кВ на електрод, так як при даному значенні спостерігається найбільша щільність осадження вноситься рідини на оброблюваній поверхні.

Польові випробування БПА з пристроєм для надання електричного заряду краплям вносимої рідини при обприскуванні доводять високу ефективність застосування розробленого технічного рішення.

Максимальна врожайність ярої пшениці при внесенні РМД за допомогою БПА склала 2,6 т/га, що більше на 7,7%, ніж при внесенні добрив традиційним способом. Обприскування гербіцидом Хілер конопель посівної дозволило зменшити суху масу бур'янів на 16,6 г/м² в порівнянні з традиційним обприскуванням.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Підвищення ефективності обприскування сільськогосподарських культур забезпечується за рахунок застосування БПА на електротязі з інтелектуальною системою управління і пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини шляхом зменшення трудовитрат, збільшення врожайності продукції і підвищення екологічних показників технологічного процесу в цілому.

Розроблено програмно-апаратний комплекс і конструкцію БПА з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини. Обґрунтовано технологічні параметри розробленого технічного рішення. Дослідний зразок БПА з програмно-апаратним комплексом і пристроєм надання електричного заряду краплям вносимої рідини загальною масою 180 кг оснащений акумуляторами ємністю 20 А·год, що дозволяє мати запас ходу до 45 км на одному заряді з можливістю обробки до 1,53 га на годину. Пристрій електрозарядки крапель видає напругу до 20 кВ з живленням від літій-іонних акумуляторів напругою 48 В і дозволяє заряджати краплі до 4,5 мкКл/мл.

Експериментальні дослідження підтверджують працездатність безпілотного агрегату з пристроєм електрозарядки крапель вносимої рідини. Результати показали, що відхилення агрегату від курсу в режимі автоматичного управління в середньому становить 16,6 см при швидкості БПА 5-12 км/год. Дана точність є достатньою відповідно до агротехнічних вимог. Найбільша ефективність обприскування рослин і внесення РМД електрично зарядженими краплями вносимої рідини спостерігається при напрузі на електроді $U_z=17$ кВ, при швидкості агрегату $V_{БПА}=7$ км/год, щільність осадження крапель оброблюваної поверхні

Обприскування електрично зарядженими краплями за допомогою безпілотного агрегату дозволяє досягти більш високої рівномірності внесення

рідини по всій площі оброблюваної поверхні в порівнянні з традиційними способами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корнійчук Ю.М. Опис безпілотного агрегату з пристроєм електрозаряджання крапель внесеної рідини. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операцій. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 70-72.
2. Борак К.В., Савченко В.М., Корнійчук Ю.М. Робототехнічні засоби в рослинництві. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 588-601.
3. Корнійчук Ю.М. Застосування безпілотних агрегатів для обприскування сільськогосподарських культур. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операцій. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 27-30.
4. Spagnuolo Todde G., Caria M., Furnitto N., Schillaci G., Failla S. Agricultural Robotics: A Technical Review Addressing Challenges in Sustainable Crop Production. *Robotics* 2025, 14(2), 9; <https://doi.org/10.3390/robotics14020009>.
5. John Deere Reveals Fully Autonomous Tractor at CES 2022. URL: <https://www.deere.com/en>.

6. Guillaumot M. FarmDroid FD20 окупився фермеру за один сезон. URL: <https://surl.li/xdpcan>.
7. Офіційний сайт компанії Naïo Technologies URL: naio-technologies.com.
8. OECD. Report on the state of the knowledge – literature review on unmanned aerial spray systems in agriculture. Paris : OECD Publishing, 2021. 156 p.
9. Wang C., He X., Wang X., et al. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayers in a vineyard. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 777.
10. Chen X., Liu Y., Zhang H., et al. Pesticide spray drift and risk assessment using unmanned aerial vehicle spraying. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 910.
11. Gatkal N. R., Bagi S., Patil S. Review of UAVs for efficient agrochemical spray application. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2025. Vol. 18(1). P. 1–15.
12. Qin W., Xue X., Zhou L., et al. Analysis of spray droplet deposition and drift by plant protection UAVs. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13.
13. ISO 22866:2005. Equipment for crop protection – Methods for field measurement of spray drift. Geneva : International Organization for Standardization, 2005.
14. Godyń A., Hołownicki R., Doruchowski G. Spray deposition, drift and equipment contamination during UAV spraying. *Agriculture*. 2025. Vol. 15(23).
15. ANSES. Comparaison de la dérive de pulvérisation lors des applications de produits phytopharmaceutiques par drone. Rapport PHYTO2022AST0026. Maisons-Alfort, 2022.
16. Santé Canada. Gestion de la dérive de pulvérisation des pesticides. Ottawa, 2020.
17. Pesticides : les épandages par drones autorisés en France pour certaines cultures. *Le Monde*. 2025. 11 avril.

18. Efficacité de la pulvérisation aérienne du café par drones. *Cultivar – Édition française*. 2025.
19. AGRIBIO DRONE. Services de pulvérisation aérienne par drone. 2024.
20. Neitzke J. Einflussfaktoren auf die Genauigkeit von Sprühdrohnen in der Landwirtschaft : Masterarbeit. Dresden : HTW Dresden, 2025. 92 S.
21. Delpuech X. Qualitative Bewertung des Einsatzes von Drohnen im Pflanzenschutz. *IVES Technical Reviews*. 2022.
22. Umweltbundesamt. Nebulization of biocides – derivation of risk reduction measures. Dessau-Roßlau, 2020.
23. Sprühen mit Drohnen: Eine Revolution in der Düngung und Schädlingsbekämpfung. *Wonder Corporation*. 2024.
24. Uso de drones para aplicar fitosanitarios. *SAMA 2.0 – Smart Agriculture*. 2024.
25. Aplicar fitosanitarios con drones: una batalla entre tecnología y legislación. *Agricultura de Precisión*. 2025.
26. Aspectos técnicos clave para una aplicación eficiente con drones. *RedAgrícola*. 2024.
27. Drones para proteger los bosques de las plagas. *NEIKER – Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario*. 2023.
28. Una tesis doctoral explora el potencial de los drones y la inteligencia artificial en la gestión agrícola. *Cadena SER*. 2025.
29. 農林水産省. 無人航空機による農薬等の空中散布に関するQ&A. 東京, 2023.
30. ドローンによるきめ細かな薬剤散布に係るガイドライン. 日本植物防疫協会, 2023.
31. 湯浅一康. マルチローターによる農薬散布技術の現状と課題. 農研機構, 2022.

32. ドローンによる農薬散布の効果と留意点. *Agriport*. 2022.
33. 農薬工業会. 航空防除・無人航空機防除に関するQ&A. 東京, 2023.