

УДК 631.3:621.865.8

РОБОТОТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ В РОСЛИННИЦТВІ

Борак К.В.

Житомирський агротехнічний фаховий коледж

Савченко В.М., Корнійчук Ю.М.

Поліський національний університет

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.

Однак попри значні перспективи, рівень впровадження аграрних робіт поки що залишається відносно низьким у порівнянні з потенційним попитом. Причини цього – висока вартість технологій, недостатня обізнаність аграріїв та технічні обмеження перших поколінь робіт [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.

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.

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 робіт 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.

Отже, постановка проблеми полягає в тому, щоб знайти шляхи автоматизації ключових операцій у рослинництві – від обробки 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 ресурсоемні завдання в полі.

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.

Серед перших успішних польових роботів – данський FarmDroid FD20 (рис. 3), 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



Рис. 1. Польовий робот FarmDroid FD20.

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 $\sim 1,6$ кВт·год, чого вистачає на цілий день роботи в сонячну погоду. На одному заряді FD20 обробляє кілька гектарів, рухаючись зі швидкістю до $\sim 0,95$ 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 $\approx$ €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. 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.



Рис. 2. Агроробот Fendt Xaver.

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. 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



Рис. 3. Робот Oz.

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 виноградарників 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 виноградарників автономно протягом цілого дня.

Ще одна французька новинка – Orio, 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.



Рис. 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 робота 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.



Рис. 5. Роботизований прополювач Titan.

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.

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 лидарами, а у разі втрати сигналу чи помилки Anatis сам зупиняється і надсилає SMS оператору. Такий рівень технологій зробив його лауреатом конкурсу SIMA Innovation Awards.



Рис. 6. Роботи-культиватор. Carré Anatis.

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. 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.



Рис. 7. Дрон DJI Agras.

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.

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.

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.



Рис. 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 агрегатувати 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 пропалочні 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.

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 Ostinion 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 підрахували, 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. Ostinion 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.

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.



Рис. 9. Робот Tevel FAR для збирання фруктів.

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 робот-рукою 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.

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.

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:

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. 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 нейромережі, 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.

3. Взаємодія та координація множинних роботів. Майбутнє рослинництва може передбачати цілі «floti» роботів на полі. Уже зараз є проекти, де декілька однакових роботів координовано сіють або прополують (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.

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 навчатися переходити в режим енергозбереження, оптимізувати маршрути, використовувати рекуперацію енергії при гальмуванні тощо.

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 робота 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.

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.

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.

Робототехнічні засоби в рослинництві вже сьогодні переходять з площини експериментів у реальний аграрний виробничий процес. Проведений аналіз показав, що існує широкий спектр робіт 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.

Основні переваги роботизації рослинництва включають: зменшення залежності від людської праці (особливо сезонної), підвищення точності і своєчасності агротехнічних операцій, зниження ресурсоемності (пального, 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 робіт 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.

Перспективи розвитку робототехнічних засобів в рослинництві є надзвичайно широкими. Можна очікувати, що в недалекому майбутньому типовим явищем стануть «розумні» поля, де рій спеціалізованих робітів 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 робіт 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.

Список використаних джерел

1. 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>.

2. John Deere Reveals Fully Autonomous Tractor at CES 2022. URL: <https://www.deere.com/en>.

3. Guillaumot M. FarmDroid FD20 окупився фермеру за один сезон. URL: <https://surl.li/xdpcan>.

4. Офіційний сайт компанії Naïo Technologies URL: naio-technologies.com.