

УДК 631.372

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН ТА ТРАКТОРІВ

*Борак К.В., Весельський В.І.
Поліський національний університет*

Зростання населення світу й глобальна конкуренція змушують аграрний сектор одночасно підвищувати урожайність та зменшувати навантаження на довкілля. Згідно з прогнозами ООН, до 2050 р. населення Землі сягне 9,7 млрд осіб, що потребує приблизно 60 % зростання аграрної продукції [1]. При цьому сільське господарство стикається з дефіцитом кваліфікованих працівників, енергетичною кризою та нерівномірністю кліматичних умов. Відповіддю на ці виклики є впровадження автономних машин і систем керування, які дають змогу працювати цілодобово, оптимізувати використання ресурсів та полегшити роботу фермерів.

Серцем автономних машин є навігаційні системи, що забезпечують траєкторію руху й точне розміщення. Традиційні системи GPS поступово доповнюються або замінюються комбінаціями RTK-GNSS, інерціальної навігації та ультраширококустових (UWB) датчиків. У нових розробках високоточне позиціонування забезпечується інтеграцією інерціальних навігаційних систем (INS) і супутникового навігаційного обладнання (GNSS), що дозволяє отримувати 3–5 см точність навіть при короткотривалих збоях сигналу [2]. Огляд IEEE Access показує, що в складних польових умовах найбільш поширеними є саме такі інтегровані системи, а алгоритми Кальмана та їхні розширені варіанти забезпечують роботу з мультимодальними даними та адаптацію до шумів [1]. Для навігації використовуються глобальне (при відомій карті поля) та локальне планування траєкторії; локальне планування адаптує маршрут, враховуючи дані від сенсорів і застосовуючи алгоритми об'єднання даних для досягнення вищої точності

Сучасні трактори використовують багатоспектральні, інфрачервоні й LiDAR-сенсори, які формують тривимірні карти та розпізнають об'єкти. Автономні машини базуються на трьох «пілонах»: сенсорах і актюаторах, з'єднаності та штучному інтелекті. LiDAR забезпечує тривимірне картування й виявлення перешкод, високорезольційні камери визначають стан рослин, а GPS з RTK-корекцією забезпечує точне слідування маршруту. Автономні трактори використовують мультиспектральні, інфрачервоні та LiDAR-сенсори для визначення вмісту поживних речовин у ґрунті та стану рослин, що дозволяє досягти сантиметрової точності навігації.

Алгоритми машинного навчання працюють над адаптацією параметрів посіву, добрив чи зрошення та виявленням шкідників. Платформи штучного інтелекту аналізують погодні прогнози, історичні врожаї та дані сенсорів у реальному часі, щоб приймати оптимальні рішення. У автономних машинах ці алгоритми забезпечують виявлення хвороб і потреб у добривах, а також виконують прогнозування технічних несправностей, завдяки чому час простою зменшується. Розвиток глибокого навчання дозволяє роботам працювати в складних умовах, зокрема під час відсутності GPS-сигналу, використовуючи комбіновані дані з камер і інерціальних датчиків [1].

Головною ознакою сучасних систем керування є постійний обмін даними між машинами, хмарними сервісами й операторами. Технологія телематики інтегрує сенсори, GPS та комунікаційні модулі, дозволяючи в реальному часі контролювати стан обладнання, умови поля та ефективність операцій. 5G-мережі та IoT забезпечують постійну передачу даних між технікою та хмарними платформами, оптимізуючи завдання та управління парком машин. Платформи тепер включають блокчейн-модулі, які забезпечують прозорість і надійність даних у ланцюгу поставок, а у робототехнічних фермах відкривають можливості для фіксації вуглецевого сліду та управління сертифікацією продукції.

Основні компоненти: сприйняття – планування – виконання.

В автономній навігації виділяють три ключові підсистеми:

Сприйняття навколишнього середовища. Вона включає високоточне позиціонування, розпізнавання рядків культур і виявлення перешкод. Розробки базуються на багатодатчиковому злитті: GPS/RTK поєднується з інерціальними датчиками, камерами та LiDAR-сенсорами. Дослідження показують, що інтегровані системи (INS + GNSS) є найефективнішими для складних польових умов, тоді як фільтри Кальмана забезпечують стійкість до шумів.

Планування траєкторій. Планування поділяється на глобальне (за відомої карти поля) і локальне (реактивне). Локальне планування використовує дані сенсорів для побудови маршруту в реальному часі, що дозволяє машині об'їжджати перешкоди й адаптуватися до змін у середовищі. Сучасні алгоритми працюють із функціональним перетворенням даних, використовуючи фільтри Кальмана, часткові фільтри та методи нейромережевої локалізації.

Виконавчий контроль. Цей рівень реалізує траєкторію шляхом точної координації рульових приводів, тягових механізмів і інструментів. Геометричні й динамічні моделі тракторів забезпечують точне відстеження шляху, скорочуючи перекриття до 6 % та прогалини до 16 %, що підвищує ефективність роботи на 20 %.

Автономні системи використовують дані з кількох сенсорів, оскільки польове середовище складне й неструктуроване. Із визначенням швидкості та становища справляються фільтри Кальмана, розширені та адаптивні модифікації, а також часткові фільтри. Огляд багатосенсорної навігації вказує, що інтеграція INS+GNSS є найпоширенішою, а фільтри Кальмана демонструють високу стійкість і адаптивність при злитті даних [1]. Подальший розвиток включає застосування глибинних нейронних мереж для прогнозування позиції при перебоях GNSS і розробку гібридних алгоритмів, які комбінують традиційні фільтри з машинним навчанням [1].

Окремим напрямком є координація кількох автономних машин або «рій» роботів. Ройова робототехніка передбачає роботу численних невеликих роботів – наземних або повітряних, які колективно обстежують поля та виконують завдання, що підвищує швидкість операцій і зменшує потребу в людях. Такі системи потребують розподіленої координації, де кожен агент використовує дані з сенсорів і комунікує з іншими, щоб уникати зіткнень, підтримувати заданий інтервал і реагувати на зміни у середовищі. У перспективі координація кількох тракторів дозволить виконувати комплексні роботи (орні, сівба, внесення добрив) в стислі терміни та оптимізувати навантаження на ґрунт.

Проривною тенденцією є перехід від окремих функцій автопілота до повноцінних автономних тракторів, що працюють без оператора. Крім серійних моделей, великі виробники й стартапи пропонують ретрофіт-комплекти, які перетворюють існуючі трактори в автономні. Наприклад, Sabanto Autonomy System підключається до систем керування та гідравлічних систем трактора, використовує GNSS-антени, камери та датчики виявлення перешкод і надає дистанційне керування через мобільні та настільні застосунки. Комплект пропонує функції обмеження робочої зони (геозона), аварійні кнопки й оперативний моніторинг, що підвищує безпеку.

Carbon Robotics представила набір AutoTractor для тракторів John Deere 6R та 8R. Система використовує існуючі кріплення та бортову електропроводку і працює без зупинок 24/7. Вона виконує підготовку ґрунту, оранку, культивування та кошення без водія, а також інтегрується з лазерними прополювачами. Набір оснащено RTK-GPS, 360° камерами, радарними датчиками безпеки та фізичними й дистанційними кнопками аварійної зупинки. Дистанційний центр керування (ROCC) відстежує роботу в реальному часі й може перехопити управління при виникненні перешкод чи несподіваних ситуацій. Завдяки цьому фермеру не потрібно виїжджати в поле для усунення несподіваних випадків, що мінімізує зупинки.

Компанія AGCO реалізує ретрофіт-стратегію під назвою OutRun, яка поєднує їхні наявні технології (навігація, автономія, комп'ютерний зір).

Система дозволяє автономне керування зерновими причепами та tillage-функціями і буде сумісна з трактори Fendt та John Deere. Під час випробувань відзначено, що робота на 85 % потужності двигуна дає 7–8 % економії пального, а цілодобова робота розширює вікно польових операцій. Управління виконується через планшет: фермер після першого обхідного проходу задає параметри роботи та отримує план-місію, а система виконує її з високою точністю. Крім економії пального, автономне управління знижує кількість помилок та втоми оператора.

У більшості випадків автономні трактори залишають можливість ручного керування, що підвищує гнучкість експлуатації. Вартість автономного трактора John Deere 8R складає 500–600 тис. USD, тоді як комплекти для ретрофіту коштують 50–70 тис. USD і окупаються за 2–4 роки за рахунок скорочення операційних витрат.

Крім традиційних тракторів, розробляються малі робототехнічні платформи для конкретних завдань. Роботи для збирання врожаю оснащуються системою комп'ютерного зору та ґріперами, що обережно знімають ягоди та помідори, запобігаючи пошкодженням. Роботи-бур'яни використовують мультиспектральні камери й лазери для точкового знищення бур'янів, що значно скорочує використання гербіцидів. Роботи для моніторингу ґрунту розміщують підземні датчики, які аналізують кореневі системи та розподіл поживних речовин. Створюються й компактні автономні трактори (AgXeed, Naïo), здатні працювати на невеликих фермах та в теплицях.

Окрім автоматизації, майбутнє систем керування пов'язане з переходом доелектричних та гібридних приводів. Компанія Monarch Tractor створила MK-V – перший у світі 100 % електричний, «водій-опціональний» трактор. Машина має модульну електроплатформу, працює на штучному інтелекті WingspanAI і може здійснювати повністю автономне переміщення кормів у молочних господарствах. Державна програма California CORE надає до 68750 USD субсидії для придбання таких тракторів, що стимулює перехід до беземісійних машин. Оператори відзначають підвищення молочної продуктивності та зменшення витрат, а ферма Gamble Estate випробувала економію 10–12 тис. USD на пальному й скорочення викидів CO₂ на 40–50 тонн на рік.

Електрифікація сприяє зменшенню викидів і підвищенню енергоефективності. Сучасні роботи все частіше використовують акумулятори з високою щільністю енергії та сонячні панелі, що робить їх незалежними від викопних ресурсів. Об'єднання електроприводу, автоматизації та штучного інтелекту дозволяє створювати так звані «програмно визначувані трактори», функціональність яких можна розширювати оновленнями ПО, адаптуючи машину до нових задач.

У майбутньому значну увагу приділятимуть координації та спільній роботі кількох автономних машин. Ройова робототехніка передбачає, що десятки дрібних роботів (дрони, наземні машини) працюють синхронно, обмінюючись даними та розподіляючи завдання. Такі рої можуть швидко обстежувати великі поля, підвищуючи швидкість робіт і зменшуючи потребу в людській праці. Крім дронів, розвиваються підземні роботи для моніторингу кореневої системи та стану ґрунту, а також роботи для внесення добрив і посіву, які координуються між собою через хмарні платформи. Ключовим завданням є створення алгоритмів розподіленої навігації та управління, які дозволять кожному агенту реагувати на зміну середовища, уникати конфліктів та забезпечувати глобальну оптимальність.

Системи керування сільськогосподарських машин активно переходять на телекерування та дистанційний моніторинг. Технології IoT та 5G дозволяють передавати дані від сенсорів та машин до хмарних систем у реальному часі. Телематичні рішення інтегрують датчики, GPS і комунікаційні системи, забезпечуючи моніторинг продуктивності обладнання, умов поля й ефективності операцій. Сучасні системи телематики використовують блокчейн для забезпечення трасуваності й надійності даних, що важливо при контролі якості та карбоновому обліку.

Великі виробники та стартапи також розгортають центри дистанційного керування, де оператори можуть контролювати кілька машин. Carbon Robotics створила центр ROCC, що дозволяє віддалено втручатися у роботу автономних тракторів, використовуючи відео з камер та RTK-GPS. Це рішення забезпечує безперервність робіт навіть при виникненні непередбачуваних ситуацій.

Попри значні досягнення, впровадження автономних систем має низку викликів:

- Висока вартість і фінансова доступність. Високоточні сенсори, програмне забезпечення та комунікаційне обладнання поки що залишаються дорогими, що ускладнює впровадження на дрібних фермах. Хоча ретрофіт-комплекти знижують поріг входу, повністю автономні трактори коштують сотні тисяч доларів.

- Надійність та адаптивність. Польові умови є непередбачуваними (пил, дощ, рослинність), що може перешкоджати роботі сенсорів. Огляди підкреслюють необхідність багатосенсорного злиття тасамодіагностики системи, щоб забезпечити стабільну навігацію.

- Регуляторні та безпекові вимоги. Норми ISO 18497 та Регламент ЄС 2023/1230 вимагають сертифікації автономних машин і можуть впливати на проектування систем безпеки. Компанії повинні розробляти системи аварійного зупинення, контролю швидкості та обмеження робочих зон, що ускладнює розробку.

- Кадрова підготовка. Хоча автономні системи зменшують потребу в операторах, вони вимагають нових компетенцій: налаштування, моніторингу та діагностики. Навчання персоналу лишається критичним для безпечного використання.

- Кібербезпека та захист даних. Інтеграція IoT і блокчейну збільшує ризик кібератак, тому необхідно впроваджувати механізми автентифікації та шифрування даних.

Подальший розвиток систем керування сільськогосподарських машин буде спрямований на:

1. Інтелектуальні гібридні системи. Поєднання GNSS, UWB, INS, машинного зору та штучного інтелекту дозволить забезпечити точність кілька сантиметрів навіть у складних умовах. Розробка адаптивних і нейромережевих фільтрів Кальмана підвищить надійність навігації.

2. Енергонезалежні платформи. Використання сонячних панелей, водневих паливних елементів та акумуляторів із високою щільністю енергії зменшить залежність від викопного палива. Підвищена ефективність дозволить працювати автономним машинам довше без підзарядки.

3. Розподілене та крайове обчислення. Перенесення обробки даних на край (edge computing) дозволить зменшити затримки та виконувати аналіз у реальному часі. Це стане основою для координації роєв роботів і мультимашинних систем.

4. Людино-машинна взаємодія та соціальні аспекти. Боротьба з «цифровим розривом» включає навчання фермерів і операторів, розробку інтуїтивних інтерфейсів та безпекових стандартів. Потрібно враховувати етичні й соціальні наслідки автоматизації, щоб забезпечити справедливий перехід у сфері зайнятості.

5. Стандартизація. Створення відкритих протоколів та уніфікованих платформ (ISOBUS, ISO 11783) дозволить різним машинам і сенсорам легко взаємодіяти. Розвиток стандартизованих інтерфейсів прискорить інтеграцію роботів із традиційною технікою.

Розвиток систем керування сільськогосподарських машин і тракторів переживає бурхливий етап завдяки поєднанню високоточної навігації, датчиків, штучного інтелекту та комунікаційних технологій. Інтегровані платформи GNSS/INS та багатосенсорне злиття забезпечують сантиметрову точність у польових умовах, а розвиток ретрофіт-комплектів робить автономію доступнішою. Важливими напрямками залишаються електрифікація (як показує приклад трактора MK-V), роєва робототехніка та дистанційне управління. Попри виклики (високу вартість, нормативні вимоги та необхідність навчання персоналу) тенденції свідчать про те, що автономні машини стануть ключовим елементом сталого та продуктивного сільського господарства. Подальші дослідження мають зосередитися на

створенні адаптивних, безпечних і енергоефективних систем, які можуть співпрацювати між собою та покращувати життя фермерів у всьому світі.

Список використаних джерел

1. Yang J., Zulkarnain N., Ibrahim M. F., Nordin Ili N. A. M., Vaghefi S.A. A comprehensive review of agricultural ground automatic navigation systems based on Multi-sensor fusion. January 2025 IEEE Access PP(99). DOI:10.1109/ACCESS.2025.3612811.

2. Jiang L., Xu B., Husnain N., Wang Q. Overview of Agricultural Machinery Automation Technology for Sustainable Agriculture. Agronomy 2025, 15(6), 1471; <https://doi.org/10.3390/agronomy15061471>.