

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Весельський Владислав Іванович

УДК 631.372.2:681.5:629.021

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МАШИННО-
ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ МЕХАТРОННОЮ
СИСТЕМОЮ РУЛЬОВОГО УПРАВЛІННЯ**

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

_____ Весельський В.І.

Керівник роботи

Борак К.В.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Весельський Владислав Іванович. Підвищення ефективності роботи машинно-тракторного агрегату мехатронною системою рульового управління. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

У магістерській роботі представлено розробку та дослідження мехатронної системи рульового управління машинно-тракторного агрегату (МТА) для паралельного водіння, призначеної для підвищення точності виконання технологічних операцій у прецизійному землеробстві. Запропонована система ґрунтується на використанні супутникових радіонавігаційних технологій і включає апаратно-програмний комплекс із GPS-приймачем «OEMStar» (точність до 10 см), датчиком нахилу (гіроскопом), датчиком кута повороту коліс та електроприводом підрулюючого пристрою на базі 12-вольтового двигуна постійного струму. Програмна частина реалізована у середовищі Visual Studio 2018. Польові випробування на тракторах Belarus 320.4 та Belarus 82.1 показали значне підвищення точності руху та ефективності виконання технологічних операцій. В автоматичному режимі керування відхилення МТА від заданої траєкторії зменшувалося до 16 см порівняно з 40 см у ручному режимі. Застосування системи забезпечило зниження експлуатаційних витрат на 3,3%, збільшення продуктивності агрегату на 7,7% та приріст урожайності озимої пшениці на 8,5%. Отримані результати підтверджують, що автоматизація процесу паралельного водіння сприяє зменшенню стомлюваності оператора, підвищує стабільність руху в умовах обмеженої видимості та забезпечує оптимальне використання ресурсів.

Ключові слова: мехатронна система, паралельне водіння, рульове управління, машинно-тракторний агрегат, GPS-навігація.

ANNOTATION

Veselsky Vladislav Ivanovich. Improving the efficiency of machine-tractor units with a mechatronic steering system. – *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 presents the development and research of a mechatronic steering system for a machine-tractor unit (MTU) for parallel driving, designed to improve the accuracy of technological operations in precision farming. The proposed system is based on the use of satellite radio navigation technologies and includes a hardware and software complex with an OEMStar GPS receiver (accuracy up to 10 cm), a tilt sensor (gyroscope), a wheel angle sensor, and an electric steering assist device based on a 12-volt DC motor. The software part is implemented in the Visual Studio 2018 environment. Field tests on Belarus 320.4 and Belarus 82.1 tractors showed a significant increase in the accuracy of movement and the efficiency of technological operations. In automatic control mode, the deviation of the MTA from the set trajectory was reduced to 16 cm compared to 40 cm in manual mode. The use of the system resulted in a 3.3% reduction in operating costs, a 7.7% increase in unit productivity, and an 8.5% increase in winter wheat yield. The results confirm that the automation of the parallel driving process reduces operator fatigue, increases driving stability in conditions of limited visibility, and ensures optimal use of resources.

Keywords: mechatronic system, parallel driving, steering, machine-tractor unit, GPS navigation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ВОДІННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ.....	10
1.1. Перспективні напрямки розвитку систем керування сільськогосподарських машин та тракторів.....	10
1.2. Системи паралельного водіння МТА.....	18
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ.....	24
2.1. Структурна схема системи паралельного водіння з підрулювальним пристроєм.....	24
2.2. Основні параметри програмно-апаратної частини мехатронної системи.....	27
2.3. Методика проведення польових випробувань.....	39
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ВЕДЕННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ.....	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток прецизійного землеробства вимагає високої точності виконання технологічних операцій машинно-тракторними агрегатами (МТА), оскільки навіть незначні відхилення від заданої траєкторії можуть призводити до перевитрати ресурсів, зниження врожайності та зростання експлуатаційних витрат. Традиційні системи керування рухом МТА значною мірою залежать від професійних навичок оператора, рівня його фізичної та психоемоційної втоми, а також умов видимості, що знижує стабільність і точність роботи техніки у полі. У цих умовах впровадження мехатронних систем рульового управління, інтегрованих із супутниковими навігаційними технологіями, стає одним із ключових напрямів підвищення ефективності та надійності функціонування МТА.

Необхідність автоматизації процесу паралельного водіння зумовлена прагненням агровиробників до зменшення втрат добрив, пального та часу, а також до підвищення ефективності польових операцій за рахунок оптимізації траєкторії руху. Розробка і впровадження мехатронних систем рульового управління дозволяє суттєво покращити точність руху МТА незалежно від умов освітленості та тривалості зміни, що забезпечує зменшення відхилень від курсу, підвищення продуктивності та покращення агротехнічних показників.

Отже, дослідження, спрямоване на розробку, налаштування та експериментальне випробування мехатронної системи рульового управління для паралельного водіння МТА, є актуальним, оскільки забезпечує науково обґрунтовані шляхи підвищення точності руху, економічної ефективності та якості виконання сільськогосподарських операцій в умовах сучасного інтенсивного землеробства.

Тому в роботі поставлена наступна **мета дослідження** – підвищення ефективності роботи машинно-тракторного агрегату шляхом розроблення, впровадження та експериментального обґрунтування мехатронної системи

рульового управління для паралельного водіння, що забезпечує зменшення відхилень від заданої траєкторії, підвищення продуктивності та зниження експлуатаційних витрат.

У зв'язку з поставленою метою визначено завдання досліджень:

- проаналізувати сучасні системи паралельного водіння та тенденції впровадження мехатронних засобів керування у прецизійному землеробстві;
- розробити структуру та функціональну схему мехатронної системи рульового управління МТА із застосуванням GPS-навігації та датчиків положення;
- створити апаратно-програмний комплекс, що включає GPS-приймач, датчик нахилу, датчик кута повороту коліс та електропривод підрулювання;
- реалізувати програмне забезпечення в середовищі Visual Studio 2018 для забезпечення автоматичного керування рухом МТА;
- провести монтаж, налаштування та тестування системи в польових умовах;
- оцінити точність руху МТА в автоматичному та ручному режимах, визначити економічні та технологічні показники ефективності роботи;
- узагальнити результати досліджень та надати рекомендації щодо впровадження системи у ремонтно-технічних службах агропідприємств.

Об'єкт досліджень – процес керування рухом машинно-тракторного агрегату під час виконання сільськогосподарських технологічних операцій.

Предмет досліджень – мехатронна система рульового управління МТА, її апаратні та програмні засоби, а також вплив автоматизованого паралельного водіння на точність руху, продуктивність та ефективність роботи машинно-тракторного агрегату.

Методи наукового дослідження. В процесі виконання магістерської роботи використовувалися наступні методи дослідження:

1. Аналіз та систематизація літературних джерел (вивчення наукових праць, стандартів, технічної документації, патентів та світових тенденцій у сфері мехатронних систем керування МТА та технологій паралельного водіння).

2. Методи комп'ютерного моделювання (проектування алгоритмів керування рульовим приводом, моделювання поведінки МТА за допомогою програмних засобів Visual Studio, математичних моделей руху та алгоритмів стабілізації курсу).

3. Методи конструкторського проектування (розроблення апаратної частини системи: вибір GPS-приймача, датчиків, електроприводу підрулювання, створення структурної та принципової схем мехатронного комплексу).

4. Експериментальні методи польових досліджень (проведення випробувань точності руху МТА у ручному, напівавтоматичному та автоматичному режимах; визначення фактичних відхилень від траєкторії за GPS-логами та інструментальними вимірюваннями).

5. Агроінженерні методи оцінювання ефективності виконання технологічних операцій (визначення витрат добрив, пального, продуктивності агрегату, якісних показників виконання операції та врожайності культур).

6. Методи математичної статистики (обробка експериментальних даних, визначення середніх значень, дисперсій, похибок, порівняння режимів керування МТА для отримання достовірних висновків).

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. **Весельський В. І.** Системи паралельного водіння МТА. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 52-55.

2. **Весельський В. І., Борак К. В.** Аналіз наявних систем паралельного водіння сільськогосподарських машин. Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної

конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти, м. Рівне, 8-9 травня 2025 року. Рівне : НУВГП, 2025. С. 18-22.

3. Борак К.В., **Весельський В.І.** Перспективні напрямки розвитку систем керування сільськогосподарських машин та тракторів. 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.

Практичне значення одержаних результатів. тримані результати мають вагоме практичне значення для підвищення ефективності функціонування машинно-тракторних агрегатів у технологіях прецизійного землеробства. Розроблена мехатронна система рульового управління може бути впроваджена у ремонтно-технічних службах аграрних підприємств для модернізації існуючих тракторів без потреби у дорогому спеціалізованому обладнанні. Система забезпечує зменшення відхилень від заданої траєкторії, що дозволяє знизити витрати мінеральних добрив та пального, зменшити перекриття та пропуски під час обробітку ґрунту і внесення матеріалів.

Позитивний ефект застосування системи підтверджений результатами польових випробувань: підвищення продуктивності МТА, зростання врожайності на 8,5%, зменшення експлуатаційних витрат на 3,3%. Запропонована система також знижує залежність якості виконання робіт від кваліфікації та стомлюваності оператора, забезпечуючи стабільність руху у складних умовах видимості (туман, сутінки, нічний час). Реалізовані технічні рішення можуть використовуватися під час створення нових або модернізації наявних систем навігаційного підрулювання, а також у навчальному процесі для підготовки інженерів-мехатроніків, спеціалістів із технічного сервісу та експлуатації МТП.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 16 найменувань.

Загальний обсяг роботи становить 54 сторінки комп'ютерного тексту, містить 25 рисунків та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ВОДІННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ

1.1. Перспективні напрямки розвитку систем керування сільськогосподарських машин та тракторів

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 [5].

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 ультраширокопосмугових (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 [5].

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 [5].

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, 5].

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 [5].

Основні компоненти: сприйняття – планування – виконання [5].

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 [5].

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 [5].

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 % [5].

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, 5]. 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, 5].

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 [5].

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 [5].

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, культивуацію 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 [5].

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 [5].

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 [5].

Крім традиційних тракторів, розробляються малі робототехнічні платформи для конкретних завдань. Роботи для збирання врожаю оснащуються системою комп'ютерного зору та гріперами, 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 (AgXeod, Naïo), здатні працювати на невеликих фермах та в теплицях [1, 2, 5].

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 тон на рік [1, 5].

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 [5].

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 [5].

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 [5].

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 [5].

Попри значні досягнення, впровадження автономних систем має низку викликів [5]:

- 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 [5].

- Надійність та адаптивність. Польові умови є непередбачуваними (пил, дощ, рослинність), що може перешкоджати роботі сенсорів. Огляди підкреслюють необхідність багатосенсорного злиття та самодіагностики системи, щоб забезпечити стабільну навігацію [5].

- 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 [5].

- Кадрова підготовка. Хоча автономні системи зменшують потребу в операторах, вони вимагають нових компетенцій: налаштування, моніторингу та діагностики. Навчання персоналу лишається критичним для безпечного використання [5].

- Кібербезпека та захист даних. Інтеграція IoT і блокчейну збільшує ризик кібератак, тому необхідно впроваджувати механізми автентифікації та шифрування даних [5].

Подальший розвиток систем керування сільськогосподарських машин буде спрямований на [5]:

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 [5].

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 робіт і мультимашинних систем [5].

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 робіт із традиційною технікою [5].

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 МК-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 [5].

1.2. Системи паралельного водіння МТА

Керування машинно-тракторним агрегатом (МТА) під час виконання сільськогосподарських операцій є одним із найвтомливіших процесів для механізатора через тривалі години виконання повторюваних дій на малих швидкостях у поєднанні з підвищеною увагою до операції (міжрядний обробіток, внесення рідких мінеральних добрив тощо). Рулювання становить значне навантаження на розумову діяльність оператора під час виконання сільськогосподарських робіт. Palmer і Matheson визначили, що до 10 % витрат у рослинництві можна зекономити завдяки підвищенню точності руху МТА по полю [3].

Найпоширенішими приладами для керування рухом машинно-тракторного агрегату із використанням супутникових радіонавігаційних сигналів у сільському господарстві є: системи паралельного водіння (агронавігатори), автопілоти та підрульовальні пристрої [3].

Найпростішими (візуальними) навігаційними пристосуваннями для паралельного водіння МТА є маркер і слідовказівник, які використовуються для підвищення точності руху посівних агрегатів; вішки для розбивки полів на

загінки; креномір на крутонахилених тракторах для попередження про небезпечні ухили місцевості; спідометр для вимірювання швидкості руху та пройденої відстані; годинник для визначення часу руху. Під автоматизованим паралельним водінням розуміють дії, що виконуються без участі водія (механізатора), пов'язані з визначенням траєкторії руху за допомогою курсоуказівників (агронавігаторів), які формують маршрут на основі супутникових навігаційних сигналів (рис. 1.1, а) [3].

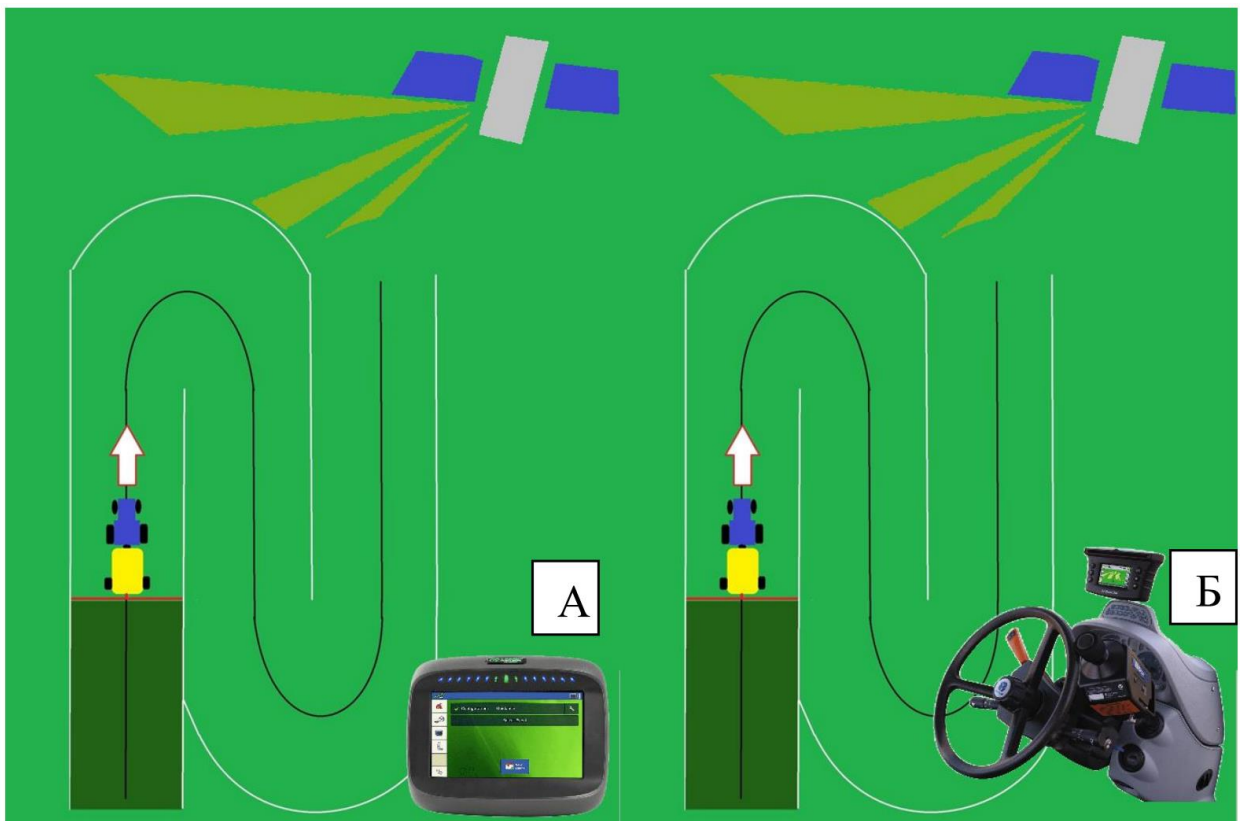


Рис. 1.1. Автоматизована система паралельного водіння: а – курсоуказівник (агронавігатор); б – автоматична система керування траєкторією МТА [3].

Під час виконання сільськогосподарських операцій у полі машинно-тракторний агрегат (МТА), як правило, повинен рухатися по траєкторії, наближеній до прямої лінії. Зазвичай траєкторія руху спрямована паралельно одній зі сторін оброблюваної ділянки поля, на кінцях якої здійснюється розворот.

У деяких випадках система може охоплювати й розвороти, керуючи рухом МТА. Автоматична система керування є складнішою порівняно з простими системами курсоуказівників (агронавігаторів). До складу такої системи входять

не лише приймач GPS і користувацький інтерфейс з алгоритмом планування маршруту, але й привід для керування рульовим механізмом МТА, датчики кута повороту коліс, гіроскоп (для захисту від перекидання) та контролер для оброблення всієї отриманої інформації (рис. 1.1, б) [3].

Під час виконання сільськогосподарських операцій у полі машинно-тракторний агрегат (МТА) зазнає відхилень від заданої траєкторії через збурення з боку опорної поверхні, її нахил, а також під дією сил інерції. Унаслідок цього збільшується шлях руху, утворюються огріхи (перекриття або пропущені ділянки), зростає витрата насіння та добрив, підвищується споживання палива, а також зростають психомоторні навантаження на машиніста-механізатора [3].

Одним із найефективніших способів зниження зазначених негативних факторів, що впливають на якісні та кількісні показники роботи МТА, є впровадження систем автоматичного паралельного водіння на основі супутникової навігації [3].

Наразі в Україні використовуються системи паралельного водіння таких компаній, як John Deere (США), Claas (Німеччина), Trimble (США), Raven (США/Нідерланди), Topcon (Японія), AgLeader (США), Leica (Швейцарія), FJDynamics (Китай) [3].

Суттєвим недоліком імпортованих систем точного землеробства є їх висока вартість для вітчизняних агровиробників, а також те, що у більшості випадків вони не можуть бути безпосередньо використані на українській (або пострадянській) сільськогосподарській техніці через невідповідність конструктивних параметрів і відсутність сумісності з вітчизняними електронними та механічними системами [3].

У табл. 1 наведено основні системи автоматичного водіння МТА, що використовуються на сільськогосподарських підприємствах України.

Таблиця 1.1 – Основні використовувані системи паралельного водіння на сільськогосподарських підприємствах [3].

№ п/п	Системи	Коротка характеристика
1	Компанія LEICA	Країна-виробник – Швейцарія. Точність – 0...20 см. Підрулювальний пристрій являє собою електродвигун, який за допомогою універсального кронштейна, передбаченого в комплекті, кріпиться до рульової колонки трактора та автоматично обертає рульове колесо. Тип приводу – редукторний (фрикційна передача).
2	Компанія Trimble	Країна-виробник – США. Точність – 0...20 см. Підрулювальний пристрій встановлюється на рульову колонку, керування здійснюється за допомогою фрикційного ролика, який безпосередньо приводить у обертання рульове колесо МТА. Тип приводу – редукторний (фрикційна передача).
3	Компанія FJ Dynamics	Країна-виробник – США. Точність – 0...20 см. Підрулювальний пристрій встановлюється на рульову колонку; керування здійснюється за допомогою фрикційного ролика, який безпосередньо приводить у обертання рульове колесо МТА. Тип приводу – редукторний (фрикційна передача).
4	Компанія Topcon	Країна-виробник – Японія. Точність – 0...20 см. Підрулювальний пристрій — завдяки малошумному безредукторному електродвигуну з високим крутним моментом система AES-25 забезпечує безшумну роботу та надзвичайно точне електричне керування. Тип приводу – безредукторний.

Автоматизована система паралельного водіння складається з приймача супутникових радіонавігаційних сигналів із зовнішньою антеною та курсоуказівника [3].

Ця система дає змогу підтримувати рух із точністю до 30 см. Її застосовують обмежено, переважно під час внесення добрив.

Для більш точного паралельного водіння використовують [3]:

- двочастотний навігаційний приймач для позиціонування;
- світлодіодну панель або дисплей (для візуалізації відхилень від заданого курсу);
- контролер для коригування напрямку руху та розрахунку відхилень, спричинених нерівностями поверхні, де розташована антена приймача;
- підрулювальний пристрій.

Послідовність роботи системи виглядає таким чином: спочатку задається маршрут, після чого МТА починає рух, і система безперервно виконує такі дії:

сигнали зі супутників приймаються GPS-приймачем і передаються до програми керування рухом МТА. Сигнал від датчика кута повороту керованих коліс також надходить до програми керування рухом МТА. На основі цих даних програма обчислює швидкість, напрямок руху, величину відхилення від заданої траєкторії, а потім, згідно із законом керування рухом, реалізує маневри наближення поточної траєкторії до необхідної. При цьому генеруються сигнали у вигляді напруги, що подається на привід рульового механізму, який повертає колеса МТА на потрібний кут. Така система забезпечує значно вищу точність руху за курсом без втручання оператора [3].

Оскільки точність водіння безпосередньо залежить від точності вимірювань GPS-приймача, надзвичайно важливо, щоб механізатори володіли основними принципами роботи цих приймачів [3].

На точність визначення місцеположення впливає кілька основних факторів: часові розбіжності сигналів, кількість супутників, що одночасно спостерігаються, атмосферні інтерференції, варіації орбіт супутників, багатопроменеве розповсюдження сигналу та інші. Слід зазначити, що окрім високоточної системи оброблення супутникових навігаційних сигналів, необхідна також відповідна автоматична система керування МТА, оскільки жоден механізатор вручну не здатен забезпечити потрібну точність руху [3].

Висновки по розділу

На сьогодні застосовують дві системи паралельного ведення – агронавігатори (курсопоказчики) або системи автоматичного підрулювання. Найпоширенішою системою автоматичного підрулювання є електродвигун на рульовій колонці машинно-тракторного агрегату з приводом рульового колеса без втручання в гідравлічну систему рульового керування. Така система мінімізує або повністю виключає суттєві зміни в конструкції рульового механізму. Однак подібні рішення мають низку недоліків: пробуксовування фрикційних елементів,

розтягування ланцюга/ременя, складність монтажу, додаткове зусилля на рульовому колесі при ручному керуванні тощо. На даний час у сільському господарстві використовуються системи автоматичного підрулювання таких компаній: Claas (Німеччина), Trimble (США), Raven (США), Topcon (Японія), AgLeader (США), Leica (Швейцарія), FJDynamics (Китай).

Розроблення системи паралельного ведення машинно-тракторного агрегату для сільськогосподарської техніки, яка використовується в АПК України, що характеризується високою точністю, низькою вартістю, високою надійністю, ремонтпридатністю та простотою монтажу, є гострою необхідністю сучасного виробництва в АПК і дасть змогу підвищити ефективність виконання сільськогосподарських операцій.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ

2.1 Структурна схема системи паралельного водіння з підрулювальним пристроєм

З урахуванням недоліків, виявлених у наявних системах автоматичного паралельного ведення (розділ 1), пропонується апаратно-програмний комплекс для мехатронної системи рульового керування МТА.

Структурна схема системи наведена на рисунку 2.1.

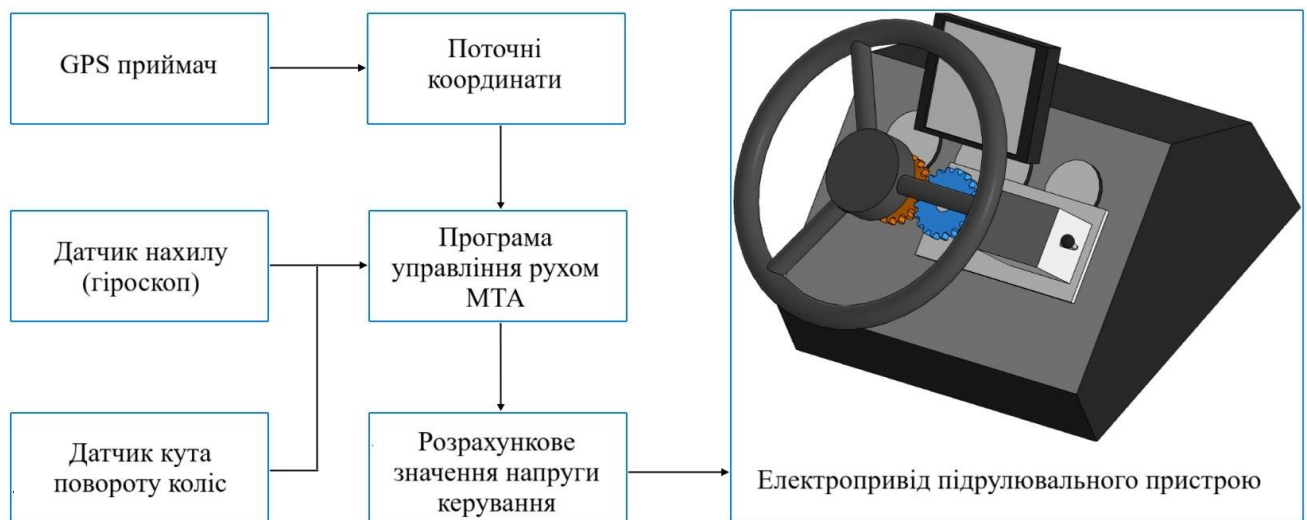


Рис. 2.1. Структурна схема мехатронної системи рульового керування для паралельного ведення МТА

Структурна схема розроблюваної системи складається з таких елементів: приймача GPS, електропривода керма, датчиків кута повороту коліс і нахилу, а також програмного забезпечення для керування МТА. Комплекс передбачає наявність планшета з операційною системою Windows, приймача GPS з антеною, блока керування електроприводом керма та датчика кута повороту керма [1].

Головним питанням, яке необхідно вирішити в системах паралельного ведення, є отримання інформації про поточне положення МТА відносно заданої траєкторії. У даній роботі положення МТА визначається на основі інформації,

отриманої за допомогою супутникових навігаційних систем GPS. Приймачем слугує електронна OEM-плата NovAtel (Канада).

Перевагою цих плат є наявність технології GLIDE [1]. Вона ідеально підходить за умов гарної видимості неба, коли користувачу необхідно постійно отримувати тісно пов'язані між собою згладжені навігаційні розв'язки з точністю саме відносних, а не абсолютних координат. Зазвичай різниця між розв'язками в сусідніх епохах не перевищує кількох сантиметрів. Таким чином, технологія GLIDE оптимально працює для систем, що потребують високої повторюваності координатних рішень, якими і є системи паралельного ведення.

Послідовність роботи системи має такий вигляд: спочатку задається маршрут, потім МТА починає рух, і система безперервно виконує такі дії. Сигнали від супутників приймаються GPS-приймачем і передаються до програми керування рухом МТА. Сигнал від датчика кута повороту керованих коліс надходить на АЦП, а потім у програму керування рухом МТА. На його основі програма визначає швидкість, напрям руху, величину відхилення від заданої траєкторії, а далі відповідно до закону керування рухом виконує маневри наближення поточної траєкторії до необхідної. При цьому формуються керуючі сигнали, які, проходячи через ЦАП, у вигляді напруги надходять на електропривід керма на основі електродвигуна постійного струму з робочою напругою 12 В, що через зубчасту передачу повертає колеса МТА на необхідний кут [4, 6]. Така система забезпечує вищу точність руху за курсом без втручання оператора.

Виконання такої вимоги під час проєктування підрулювальної системи забезпечується розрахунком із використанням методів теорії автоматичного керування [2, 6]. Слід врахувати, що розбіжність між фактичним положенням МТА та заданою траєкторією, яку повинна відстежувати й усувати система автоматичного ведення, визначається за поточною координатою та розрахунковою траєкторією руху МТА. Його поперечне зміщення відносно заданої траєкторії складається з двох складових:

$$\Delta Y = Y_0 + L \cdot \Psi, \quad (2.1)$$

де Y_0 – поперечне зміщення миттєвого центру повороту трактора від заданої йому траєкторії, м;

L – відстань від миттєвого центру повороту трактора до контрольованої точки (винесення вперед), м;

Ψ – курсовий кут між поздовжньою віссю трактора та заданою траєкторією, який визначається як інтеграл кутової швидкості повороту ω (вважається достатньо малою величиною, при якій можна прийняти, що $\sin \Psi \cong \Psi$), рад.

У виразі (2.1) враховується правило знаків. Воно полягає в тому, що додатний (або від’ємний) напрямок величини курсового кута має бути таким, щоб при збереженні його величини у процесі руху величина поперечного зміщення також збільшувалася (або зменшувалася).

Поведінка трактора як об’єкта керування поворотом при великих радіусах описується диференціальним рівнянням вигляду:

$$T \frac{d\omega}{dt} + \omega = k\alpha, \quad (2.2)$$

де T – постійна часу, с;

ω – реалізований кут повороту, рад;

k – коефіцієнт передавання;

α – заданий кут повороту, рад.

Керувальний вплив на рульовий механізм МТА задається електроприводом керма, кутова швидкість обертання якого регулюється ПД-регулятором залежно від зміщення від заданої траєкторії.

Основні кінематичні параметри автоматичного руху МТА під час руху вперед наведено на рисунку 2.2.

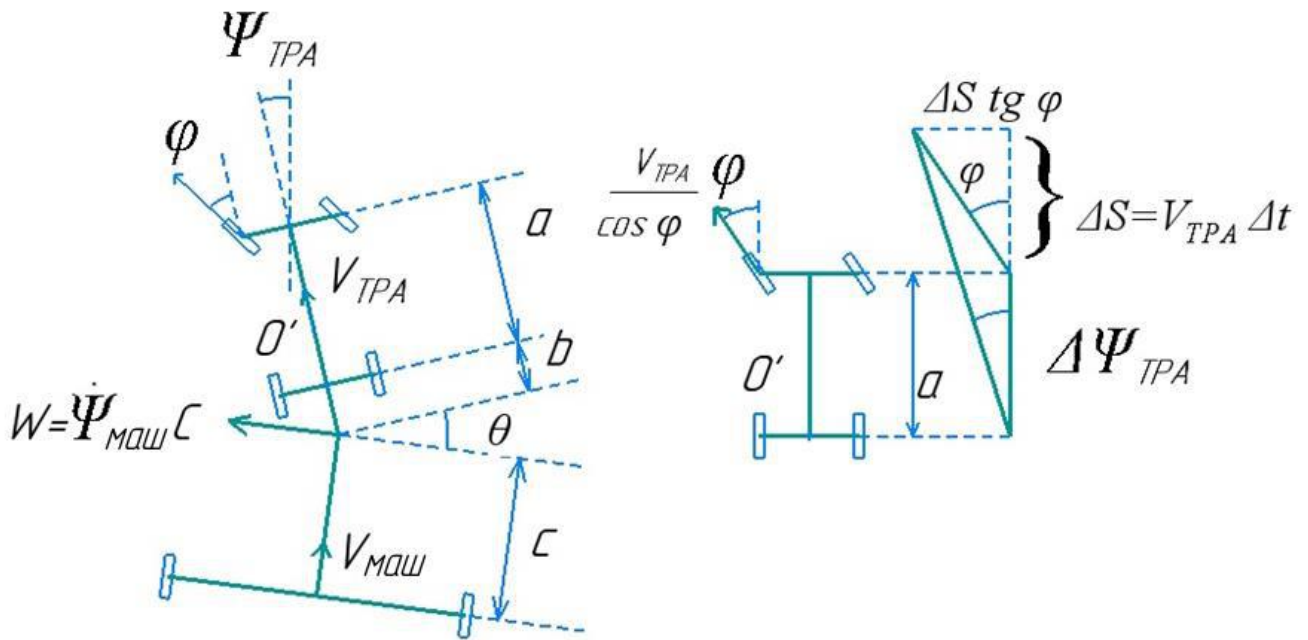


Рис. 2.2. Основні кінематичні співвідношення системи «трактор – машина»

2.2 Основні параметри програмно-апаратної частини мехатронної системи

Для реалізації моделі руху МТА за заданим курсом необхідно дотримуватися такого алгоритму:

1. Попередня фаза спостереження:

- запуск збору даних з GPS -приймача, обчислення початкової позиції;
- ініціалізація системи керування;
- вирівнювання рульового колеса, визначення напрямку руху та початкових параметрів.

2. Обчислення допоміжних змінних:

- на цьому етапі визначаються всі необхідні параметри для реалізації закону зміни положення рульового колеса (поточний кут повороту рульового колеса, швидкість і напрямок руху, поточні координати МТА тощо);
- перевірка та обмеження максимального кута повороту;

3. Реалізація маневру за законом керування:

– з використанням попередньо обчислених параметрів здійснюється маневр наближення МТА до заданої траєкторії протягом визначеного часу;

4. Перевірка:

– вирівнювання рульового колеса і перехід до кроку 2, якщо кінець траєкторії не досягнуто;

– у протилежному випадку – припинення керування.

Для реалізації даного алгоритму було обрано мову програмування С#, яка базується на платформі Microsoft .NET Framework [33]. Вона забезпечує кращу наочність і простоту моделювання об'єктно-орієнтованих застосунків. Програму було розроблено у візуальному середовищі Visual Studio 2018, що розкриває усі можливості платформи Microsoft .NET Framework.

Відповідно до принципу об'єктно-орієнтованого програмування, кожен об'єкт було реалізовано у вигляді класу, а саме такі класи:

- клас для роботи з NMEA-даними;
- клас МТА;
- клас Поле;
- клас Крива;
- клас Зв'язки;
- клас Масиви;
- клас Траєкторія.

Програма автоматично прокладає оптимальний маршрут руху по полю, враховуючи такі параметри, як тип трактора, його причіпне та навісне обладнання. Також дана програма у візуальному режимі відображає на дисплеї траєкторію, поточне положення трактора, оброблюване поле та його межі.

Під час визначення траєкторії спочатку обирається найбільша сторона поля, після чого прокладаються паралельні їй лінії маршруту з розворотами біля протилежних країв поля. Таким чином формується раціональний маршрут руху МТА по полю [4, 7].

Переважає більшість сучасних систем керування електроприводами реалізується на базі цифрових мікропроцесорів або мікроконтролерів. Це пояснюється значними обчислювальними та логічними можливостями, що дозволяють реалізовувати складні алгоритми керування.

Розроблення систем керування, які забезпечують високу ефективність роботи підрулювальних пристроїв МТА, є процесом постійного вдосконалення обладнання та методів керування. Щоб система керування відповідала всім наявним вимогам, необхідно враховувати існуючі наукові досягнення та рішення [4, 7].

Для найбільш ефективного керування необхідно застосовувати пристрої, що працюють у режимі реального часу. Кількість можливих варіантів виконання систем керування є досить великою.

Однак для стабільної роботи потрібна автоматизована система, здатна аналізувати поточний стан МТА.

Наразі, у зв'язку з підвищенням вимог до систем керування, зростає рівень інтеграції мікропроцесорів в автоматичних системах паралельного ведення. Одним із найпростіших мікроконтролерів є контролер Arduino з відкритими публічними бібліотеками даних (підпрограми). За їх допомогою можна задавати оптимальні параметри обертання рульового колеса та повністю контролювати весь процес роботи підрулювального пристрою (на основі інформації про положення поворотного колеса МТА проводити розрахунок моментів увімкнення та вимкнення підрулювального пристрою залежно від сигналу, який задається електронним блоком керування (ЕБК). Для цього необхідна розробка програмного забезпечення для розрахунку кута повороту керуваного колеса та оцінка точності цих розрахунків.

Платформа має 14 цифрових входів/виходів (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ), 6 аналогових входів, кварцовий генератор 16 МГц, USB-роз'єм, силовий роз'єм, роз'єм ICSP та кнопку перезавантаження.

Для роботи необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою USB-кабелю або подати живлення через адаптер AC/DC чи батарею. На рисунку 2.3 подано загальний вигляд плати та спрощену принципову схему. У табл. 2.1 наведено технічні характеристики.

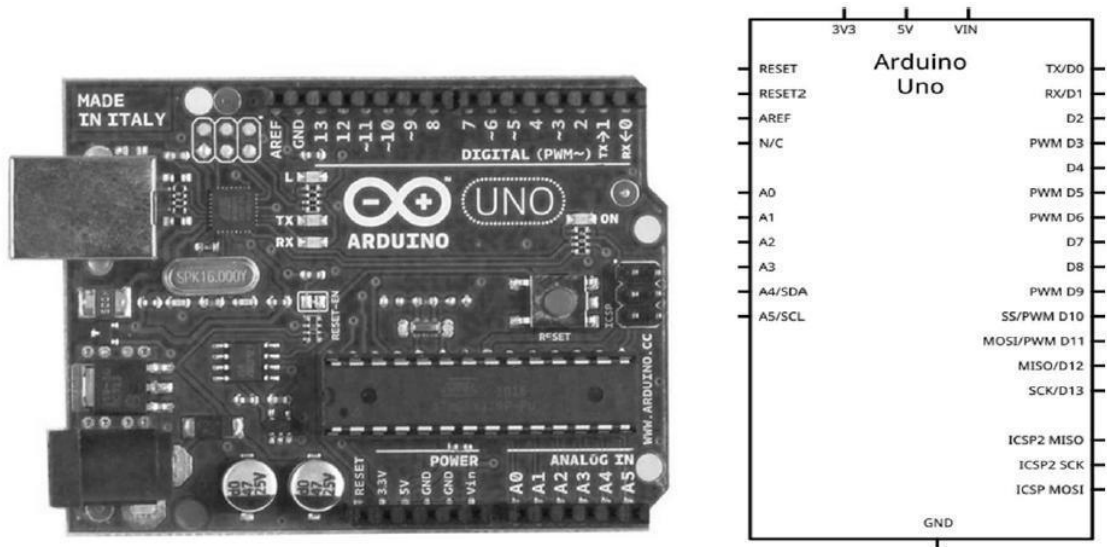


Рис. 2.3. Загальний вигляд і спрощена схема підключення плати Arduino UNO

Платформа Arduino за технічним оснащенням ідеально підходить для проектування різних мехатронних систем та їх комплексної автоматизації, завдяки зрозумілому середовищу програмування та можливості спостереження фізичних процесів у режимі реального часу [5].

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики плати Arduino UNO

Характеристики	Од. вимірювання	Параметри
Мікроконтролер		ATmega328
Робоча напруга	В	5
Вхідна напруга (рекомендована)	В	7-12
Вхідна напруга (гранична)	В	6-20
Цифрові Входи и Виходи	Шт.	14
Аналогові входи	Шт.	6
Постійний струм через вхід вихід	мА	40
Флеш-пам'ять	Кб	32
ОЗУ	Кб	2
EEPROM	Кб	1
Тактова частота	МГц	16

Для керування електроприводом підрулювального пристрою розроблена система керування, що базується на сучасній елементній базі. Частота оновлення, необхідна для ефективної роботи мехатронної системи рульового керування, становить 1–4 Гц, що не дозволяє застосовувати для керування релейно-контактну апаратуру.

Тому як драйвер двигуна було використано драйвер ІВТ-2 [7, 12], зображений на рисунку 2.4.

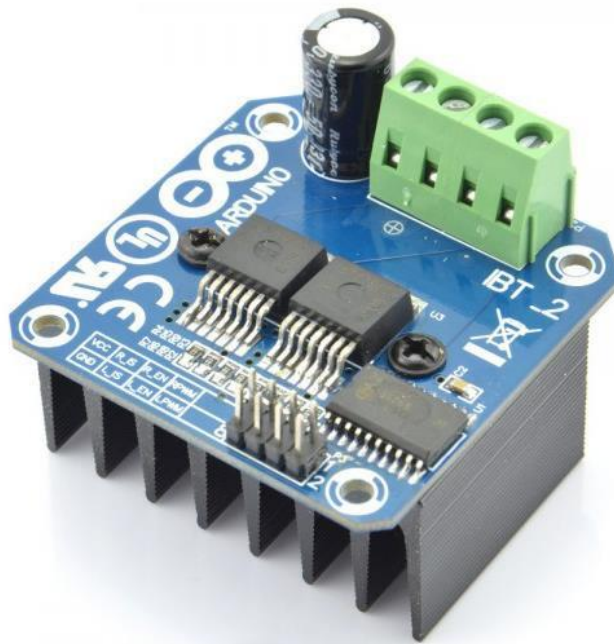


Рис. 2.4. Драйвер двигуна ІВТ-2

Система керування дає змогу здійснювати комутацію електродвигуна з бортовим джерелом живлення МТА, із ШІМ-керуванням на основі сигналу датчика кута положення керованого колеса.

Концепцію побудови системи керування електроприводом було розроблено на основі аналізу інформації щодо приводів і сформульовано такі положення:

- електропривід має бути «замкнений» по положенню керованого колеса за допомогою регулятора системи керування;
- у зворотному зв'язку за положенням керованого колеса необхідно застосовувати кутовий датчик положення з високою роздільною здатністю — до часток градуса;

– сигнал зворотного зв'язку на вході регулятора не повинен містити шумів, перешкод і квантування, які можуть спричинити значні відхилення параметрів системи;

– для досягнення високої точності потрібна швидка реакція електродвигуна на керувальні впливи.

Як датчик кута повороту використовували потенціометричний датчик, підключений до АЦП плати Arduino UNO. У цьому пристрої механічне переміщення рульової тяги перетворюється на електричні сигнали, що несуть інформацію про напрямок повороту керованого колеса.

Плата Arduino UNO, на основі даних про відхилення від заданого курсу та кут повороту керованих коліс, керує електроприводом рульового колеса через драйвер двигуна.

Розроблення та налагодження програми керування електроприводом здійснюється за допомогою графічного середовища розробки програмного забезпечення Arduino IDE. Основою цього середовища є мова Processing/Wiring, яка широко застосовується в прикладних розробках. Це середовище забезпечує повний цикл розробки — від введення алгоритму та налагодження до внутрішньосхемного програмування мікроконтролера [2, 3, 5]. Середовище призначене для роботи під операційними системами Windows та Linux-подібними системами. Частина програмного коду реалізації системи керування електроприводом наведено у листингу 1.1.

1.1 – Лістинг програмного коду реалізації системи керування електроприводом

```
analogRead(A0); //скинутипочатковечитання
steeringPosition = analogRead(A0); delay(2);
steeringPosition = ( steeringPosition -300);
// перетворити положення в кут повороту
steerAngleActual = (float)(steeringPosition) / steerSensorCounts;
steerAngleError = (steerAngleActual - steerAngleSetPoint);
```

```

pValue = Kp * steerAngleError *Ko;
if (integrated_error>maxIntErr) integrated_error = maxIntErr;
if (integrated_error< -maxIntErr) integrated_error = -maxIntErr;
if (steerAngleError> 0) steerCurrentSign = 1;
elsesteerCurrentSign = 0;
if (steerCurrentSign - steerPrevSign == 0) integrated_error = 0;
steerPrevSign = steerCurrentSign;
iValue = Ki * integrated_error;
if (iValue>maxIntegralValue) iValue = maxIntegralValue;
if (iValue< -maxIntegralValue) iValue = -maxIntegralValue;
dError = steerAngleError - lastLastError;
dValue = Kd * (dError) * Ko; lastLastError = lastError;
lastError = steerAngleError;
drive = pValue + dValue + iValue;/
pwmDrive = (constrain(drive, -255, 255));
  if (pwmDrive>= 30)
  {
digitalWrite(13, pwmDrive);
digitalWrite(12,0);
  }
  if (pwmDrive<= -30)
  {
pwmDrive = -1 * pwmDrive;
digitalWrite(13,0);
digitalWrite(12, pwmDrive);
  }
  if ((pwmDrive> -30) and (pwmDrive< 30))
  {
pwmDrive = -1 * pwmDrive;

```

```
digitalWrite (12 , 0);
digitalWrite(13, 0);
}
```

На початку програми відбувається оголошення змінних із присвоєнням деяким із них початкових значень.

У функції `setup()` реалізуються такі дії:

- виконується ініціалізація послідовного порту для обміну даними з персональним комп'ютером на швидкості 115200 бод;
- налаштування портів як входів і виходів.

У функції `loop()` безпосередньо визначається положення керованого колеса та реалізується ШІМ-керування електроприводом рульового колеса.

Існує 4 типи датчиків кута повороту [24, 67]:

- потенціометричний датчик;
- резистивний датчик;
- ємнісний датчик;
- волоконно-оптичний датчик.

Потенціометричний датчик працює за принципом перетворення лінійного або кутового переміщення в електричний сигнал і являє собою змінний резистор, величина опору якого залежить від положення токознімного елемента. Основними характеристиками таких датчиків є: номінальна потужність розсіювання, величина активного опору, стабільність опору.

Основні переваги потенціометричних датчиків: висока точність і стабільність функції перетворення, мале значення перехідного опору, низький рівень власних шумів, невеликий температурний коефіцієнт опору.

Основні недоліки потенціометричних датчиків: невелике значення роздільної здатності, обмежені можливості використання при змінному струмі, наявність ковзного контакту, що зумовлює обмежений ресурс робочих циклів датчика.

Ємнісним датчиком називають перетворювач параметричного типу, у якому зміна вимірюваної величини перетворюється на зміну ємнісного опору. Ємнісний датчик являє собою плоский або циліндричний конденсатор, одна з обкладок якого здійснює контрольоване переміщення, що спричиняє зміну ємності.

Переваги ємнісних датчиків: висока потужність і рівень напруги вихідного сигналу, незалежність від температури та радіації.

Недоліки ємнісних датчиків: значна нелінійність, невеликі діапазони вимірювань, живлення змінним струмом, залежність від паразитних ємностей монтажу, великі розміри чутливих елементів, необхідність у індуктивному реакторі.

Виходом датчика є амплітудно-модульований сигнал, який необхідно детектувати і через АЦП вводити до процесора.

Волоконно-оптичний датчик кута повороту являє собою систему, що складається з джерела випромінювання, прямого передавального волоконно-оптичного каналу та фотоприймача. У цьому випадку потік випромінювання від джерела вводиться у передавальний світловод, і на його виході формується розбіжний потік випромінювання у вигляді конуса, обмеженого апертурою оптичних волокон. При падінні потоку на поверхню об'єкта частина його відбивається і потрапляє у приймальний світловод, проходить по ньому до фотоприймача, де перетворюється на електричний сигнал. Живлення волоконно-оптичного датчика здійснюється від джерела живлення.

Переваги волоконно-оптичних датчиків:

- пасивність (датчики повністю діелектричні);
- легкість;
- компактність;
- несприйнятливості до електромагнітних завад;
- здатність працювати за високих температур;
- широка смуга пропускання;

- стійкість до вібрації та ударів;
- висока чутливість;
- можливість мультиплексування електричних і оптичних сигналів.

До недоліків оптичних датчиків положення можна віднести:

- можливість хибних спрацювань під час роботи в умовах високої запиленості, туману, інтенсивного зовнішнього освітлення, низьких температур, сильної вібрації;
- неможливість виявлення об'єкта крізь непрозору перешкоду або стінку резервуара чи контейнера;
- трудомістка процедура суміщення оптичних осей випромінювача і приймача під час монтажу датчика, особливо якщо відстань між ними перевищує кілька десятків метрів;
- необхідність налаштування чутливості датчика залежно від відбивних властивостей поверхні контрольованих об'єктів;
- поступова деградація випромінювача (світлодіода) датчика, унаслідок чого інтенсивність його випромінювання з часом зменшується, і може виникнути потреба у повторному налаштуванні чутливості.

Найбільш придатним є потенціометричний датчик кута повороту, оскільки за невисокої вартості він має відповідні характеристики та достатню надійність.

Антени GPS використовуються для визначення спеціальним пристроєм місцезнаходження об'єкта на місцевості в певний момент часу. Сучасні антени забезпечують точність із радіусом похибки до одного метра.

Від правильного вибору характеристик антени залежить точність сигналу та працездатність пристрою загалом. Невірний вибір антени може ускладнити роботу пристрою за умов дощу або снігу. Також причинами непрацездатності можуть бути такі фактори:

- відсутність супутника в даний момент у цій місцевості;
- низька якість антени;
- неякісне програмне забезпечення.

Антени GPS поділяються на два типи:

- вбудовані або зовнішні;
- активні або пасивні.

Активні GPS-антени – це найпоширеніший тип пристроїв з інтегрованим підсилювачем сигналу. Їх зазвичай використовують у приладах, де спочатку не було приймача, але є можливість його підключення через роз'єм. Цей тип антени є високочутливим.

Пасивні GPS-антени, як правило, є вбудованими. Цей тип антен залежить від зовнішнього електромагнітного поля, і що більший його вплив на пристрій, то менш стабільний сигнал отримує антена.

Застосування зовнішньої активної GPS-антени з магнітною основою для кріплення на даху МТА та з класом захисту корпусу від проникнення пилу і вологи IP67 є найбільш доцільним рішенням.

Мехатронний модуль — це виріб, утворений конструктивним поєднанням електричної машини з робочим органом для здійснення заданого руху під керуванням інтелектуальної системи.

Мехатронний модуль являє собою редукторний електропривід постійного струму, який має забезпечувати точне позиціонування рульового колеса за допомогою зубчастої передачі (рис. 2.5) [4].

Порівняно з традиційним сервоприводом постійного або змінного струму, електропривід підрулювального пристрою має низку специфічних конструктивних особливостей, таких як відсутність внутрішнього струмового контуру керування, використання датчика кута положення коліс як датчика положення, а також наявність зубчастої передачі, що ускладнює обертання рульового колеса.

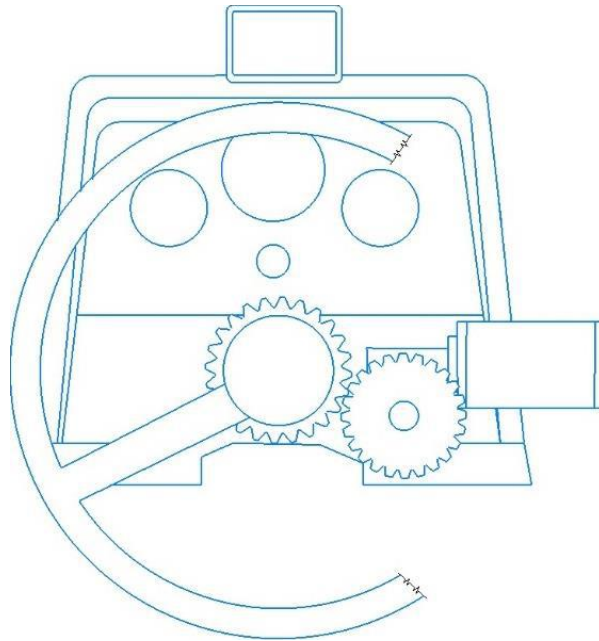


Рис. 2.5. Мехатронна система рульового керування

Оскільки на тракторі Беларус 82.1 момент опору на рульовому механізмі становить не більше 5–6 Н·м і завдяки системі гідрооб'ємного рульового керування з насос-дозатором навантаження не змінюється, оптимальна швидкість обертання рульового колеса становить 40–50 об/хв [3]. Механічна характеристика рульового колеса матиме вигляд прямої лінії (рис. 2.6).

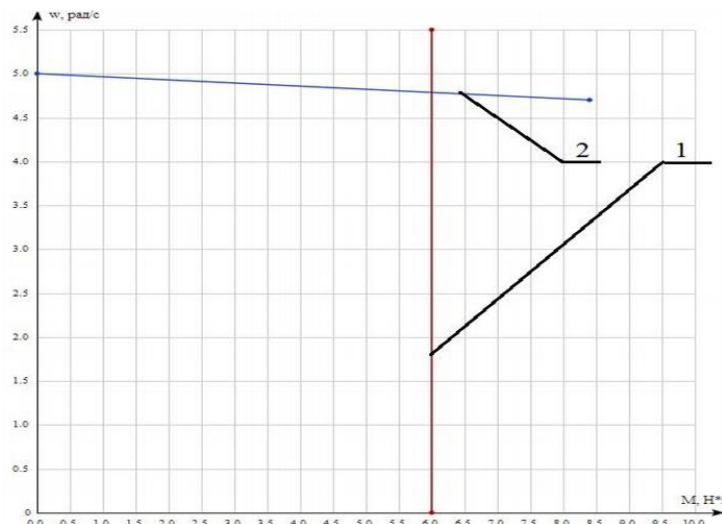


Рис. 2.6. Механічна характеристика електропривода керма мехатронної системи рульового керування.

Редукторний електропривід на базі двигуна постійного струму зі швидкістю обертання 40...50 об/хв, крутним моментом 5–6 Н·м і напругою 12 В

буде достатнім для обертання рульового колеса МТА в системі паралельного ведення.

2.3 Методика проведення польових випробувань

Система автоматичного керування МТА з використанням GPS -навігації є максимально простою в установці, налаштуванні та експлуатації. Орієнтовне розміщення встановлювального комплексу на прикладі трактора Belarus-320.4, що складається з підрулювального пристрою 1, моноблока (електронного блока керування із сучасним сенсорним дисплеєм) 2, датчика кута повороту коліс 3, високоточної антени з магнітною основою 4, наведено на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Встановлювальний комплект автоматичної системи керування МТА з використанням GPS-навігації на тракторі Belarus-320.4

Технологія монтажу мехатронної системи рульового керування МТА має такий вигляд:

На рульову колонку було встановлено підрулювальний пристрій на основі редукторного приводу із зубчастим типом передавання на рульовий вал (рис. 2.8).

Для зручності механізатора моноблок (електронний блок керування із сучасним сенсорним дисплеєм) встановлено між рульовим колесом і лобовим

склом, що дає змогу вільно користуватися функціоналом системи, не обмежуючи його лише ручним керуванням (рис. 2.9).



Рис. 2.8. Місце встановлення підрулювального пристрою.



Рис. 2.9 Місце встановлення електронного блока керування з сенсорним дисплеєм.

На вісь переднього моста було встановлено датчик кута повороту коліс для визначення кута (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Датчик кута повороту коліс

Для досягнення максимальної точності високоточну антену з магнітною основою було встановлено на кришці капота над передньою віссю трактора у горизонтальному положенні (рис. 2.11) [4].



Рис. 2.11. Місце встановлення високоточної антени з магнітною основою

Для мінімізації перешкод GPS-сигналу антену необхідно встановлювати щонайменше на відстані 2 м від інших антен (зокрема радіоантени). Під час роботи техніки на відстані менше 100 м від ліній електропередач, радіолокаційних антен або передавальної станції мобільного зв'язку можуть виникати перешкоди у функціонуванні системи [3].

Монтаж системи зазвичай займає не більше 1 години з використанням мінімального набору інструментів. Після встановлення необхідно перевірити працездатність системи, а саме:

- контакти та з'єднання у місцях підключення;
- візуальний огляд механічних частин;
- фіксацію датчиків та іншого обладнання;
- напругу бортової мережі;
- роботу датчика кута повороту коліс;
- кількість і якість приймання сигналів від супутників.

Далі здійснюється налаштування системи у меню моноблока (рисунок 3.8).

У ньому необхідно лише ввести розміри транспортного засобу, провести калібрування — і система готова до роботи (рисунок 3.9).

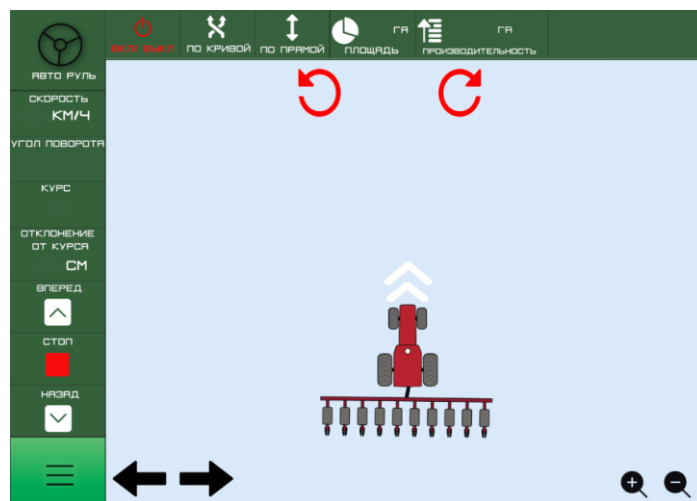


Рис. 2.12. Інтерфейс автоматичної системи керування МТА.



Рис. 2.13. Інтерфейс автоматичної системи керування МТА.

Після внесення всіх необхідних даних у систему, виконання налаштування, перевірок і калібрування можна переходити до наступних етапів.

Для передачі керування системі необхідно вивести трактор на прямолінійну або криволінійну борозну та натиснути кнопку «Авторуль», після чого система розпочне автоматичне керування та маневрування. Якщо потрібно взяти керування на себе, достатньо натиснути кнопку «Авторуль» або злегка повернути рульове колесо, і система вимкнеться.

Після кількох хвилин використання системи ви переконаєтеся, що вона акуратно керує трактором і точно веде його по заданій траєкторії. Таким чином усуваються помилки тракториста-механізатора, спричинені втомою або неуважністю.

Випробування проводилися 28 вересня 2025 р. Досліди виконувалися у різний час доби в декілька етапів, що склалися з кількох режимів роботи (табл. 2.1):

- Ручний — режим, за якого керування траєкторією руху МТА здійснюється безпосередньо трактористом-механізатором без використання мехатронної системи рульового керування МТА.

- Напівавтоматичний — режим курсопоказчика, за якого тракторист-механізатор керує траєкторією руху МТА за побудованим маршрутом за допомогою курсопоказчика.

- Автоматичний — режим роботи, за якого тракторист-механізатор подає команду на запуск підрулювального пристрою, а все подальше керування траєкторією руху виконується автоматично за допомогою розробленої мехатронної системи.

Завдяки такому підходу стало можливим об'єктивно оцінити працездатність автоматичної системи керування МТА з використанням GPS - навігації та порівняти різні способи керування МТА, а також перевірити теоретичні та лабораторні дослідження в польових умовах, наближених до реального середовища роботи МТА на сільськогосподарських операціях [4].

Таблиця 2.1 – Режими роботи та етапи проведення польових випробувань

№ етапу	Режим роботи	Період проведення досліджень	Час проведення
I	ручний	Початок зміни	9:00
	напівавтоматичний		
	автоматичний		
II	ручний	Середина зміни	13:00
	напівавтоматичний		
	автоматичний		
III	ручний	Кінець зміни	17:00
	напівавтоматичний		
	автоматичний		
IV	ручний	Темна пора доби (сумерки)	19:00
	напівавтоматичний		
	автоматичний		

Випробування проводилися восени протягом усього робочого дня, а також у темний час доби з метою визначення точності проходів у різних режимах роботи (рис. 2.14).

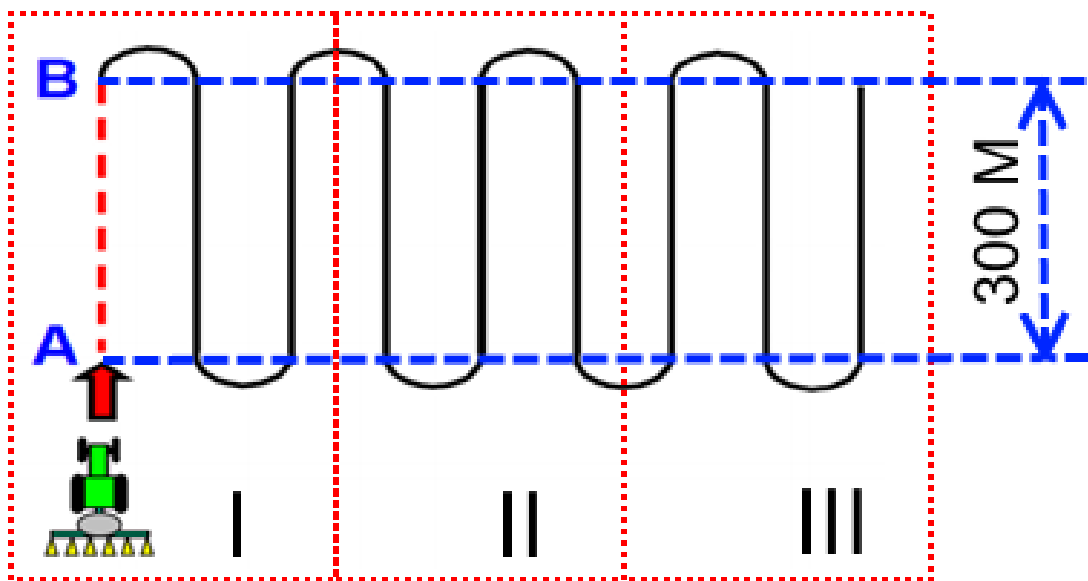


Рис. 2.14. Схема руху МТА під час проведення випробувань (I – ручний режим, II – напівавтоматичний режим (курсопоказчик), III – автоматичний режим).

Для проведення випробувань до колісного трактора Belarus-320.4 був приєднаний агрегат із робочою шириною захвату 5,5 м (рис. 2.15).



Рис. 2.15. Агрегат для проведення випробувань.

Маршрут руху колісного трактора Belarus-320.4 по полю позначався сигнальною стрічкою (рис. 2.16, 2.17).



Рис. 2.16. Сигнальна стрічка вздовж напрямку руху агрегату.



Рис. 2.17. Фіксування маршруту руху агрегату по полю

Наприкінці пройденого шляху колісного трактора Belarus-320.4 відмічені сигнальною стрічкою відстані вимірювалися рулеткою (рис. 2.18).

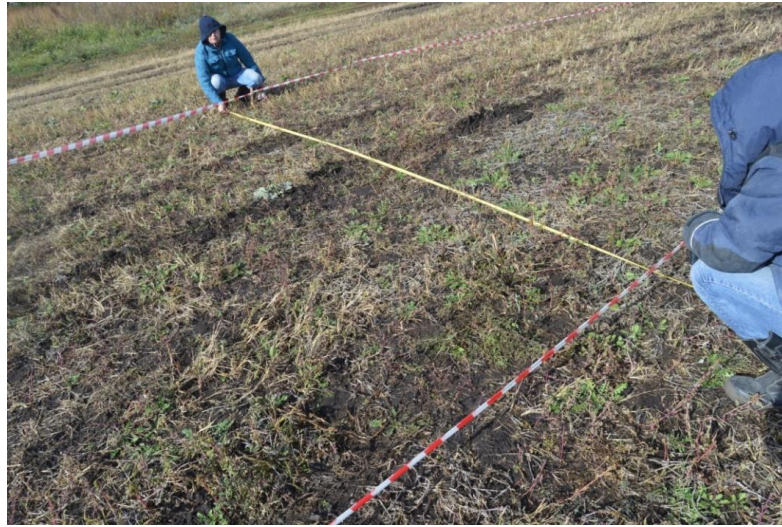


Рис. 2.18. Вимірювання траєкторії руху, відміченої сигнальною стрічкою

Таким чином було виконано всі 4 етапи польових випробувань. Проведено вимірювання за різних режимів руху МТА та у різний час доби. Отримані дані були проаналізовані та сформульовані висновки.

РОЗДІЛ 3
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ
РУЛЬОВОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ВЕДЕННЯ
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ

Результати досліджень наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Результати проходів на початку зміни в різних режимах роботи

Початок зміни	Ручний режим											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,9	5,82	5,98	7,04	7,02	7,1	5,9	5,97	5,92	5,97	5,87
	Напівавтоматичний режим (с використанням тільки курсопоказчика)											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,8	5,78	5,82	5,77	5,78	5,77	5,74	5,72	5,74	5,70	5,72
	Автоматичний режим (з використанням підрулювального пристрою)											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,7	5,74	5,77	5,72	5,7	5,77	5,7	5,7	5,54	5,58	5,72
	Середина зміни	Ручний режим										
Відстань від початку шляху, м		20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
Ширина, м		5,87	5,9	5,88	5,94	5,92	5,84	5,8	5,87	5,82	5,87	5,78
Напівавтоматичний режим (с використанням тільки курсопоказчика)												
Відстань від початку шляху, м		20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
Ширина, м		5,84	5,88	5,87	5,84	5,8	5,78	5,78	5,74	5,77	5,70	5,70
Автоматичний режим (з використанням підрулювального пристрою)												
Відстань від початку шляху, м		20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
Ширина, м		5,74	5,7	5,78	5,7	5,78	5,77	5,72	5,48	5,54	5,58	5,7
Кінець зміни		Ручний режим										
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,72	5,77	5,72	5,42	5,78	5,7	5,4	5,87	5,74	5,88	5,78
	Напівавтоматичний режим (с використанням тільки курсопоказчика)											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,74	5,77	5,47	5,7	5,74	5,72	5,84	5,57	5,77	5,70	5,72
	Автоматичний режим (з використанням підрулювального пристрою)											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,72	5,78	5,8	5,7	5,72	5,54	5,47	5,48	5,57	5,7	5,5

Продовження таблиці 3.1

Темна пора доби (сумерки)	Ручний режим											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,8	5,87	7,2	7,22	5,7	5,0	4,4	5,1	5,9	7,3	7,02
	Напівавтоматичний режим (с використанням тільки курсопоказчика)											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,84	5,77	5,77	5,5	5,42	5,7	7,2	7,22	5,78	5,70	5,78
	Автоматичний режим (з використанням підрулювального пристрою)											
	Відстань від початку шляху, м	20	40	70	80	120	170	180	200	240	270	300
	Ширина, м	5,82	5,74	5,7	5,77	5,72	5,52	5,48	5,54	5,58	5,7	5,52

На наступних зображеннях показано відхилення від ідеальної траєкторії руху МТА за різних режимів керування та у різний робочий час.

На рис. 3.1 наведено відхилення руху МТА від ідеальної траєкторії на довжині гону 300 м при ручному керуванні у різний час доби. З графіка чітко видно, що найбільше відхилення від ідеальної траєкторії руху при ручному керуванні відбувається в темний час доби. Це пояснюється тим, що видимість у цей період значно гірша, ніж під час руху МТА у світлий час.

Також можна спостерігати поступове погіршення точності керування залежно від тривалості робочого часу. Впливає людський фактор: монотонна робота суттєво втомлює оператора МТА, унаслідок чого збільшується час реакції, а увага знижується [1].

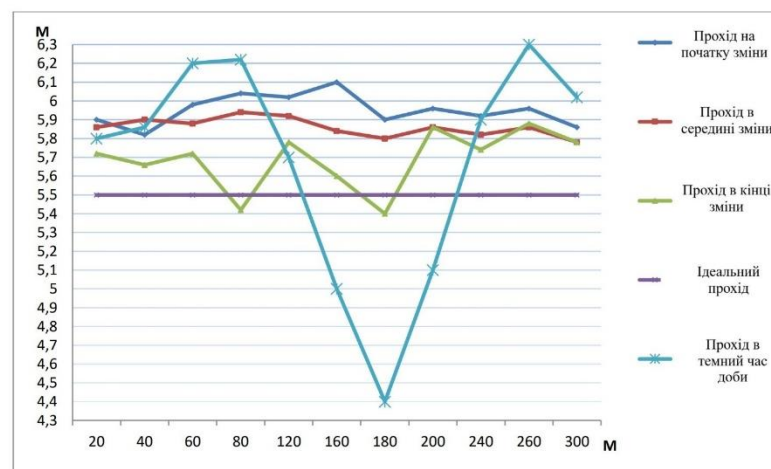


Рис. 3.1. Відхилення руху МТА від ідеальної траєкторії у ручному режимі керування

На рис. 3.2 показано відхилення руху МТА при напівавтоматичному режимі керування (курсопоказчик) у різний час доби. На графіку видно, що найменше відхилення спостерігалось на початку робочого дня, а найбільше — у темний час доби. Можна помітити, що точність керування щоразу знижується ближче до завершення робочої зміни. Тут також впливає втома тракториста-машиніста на точність проходження, однак загалом спостерігається позитивна динаміка порівняно з ручним керуванням. Зниження точності керування у нічний час відбулося лише через погіршену видимість і «остережність» тракториста-механізатора щодо можливості «на щось наїхати», тобто впливав суто психологічний фактор, унаслідок чого впевненість та концентрація під час керування МТА знизилися.

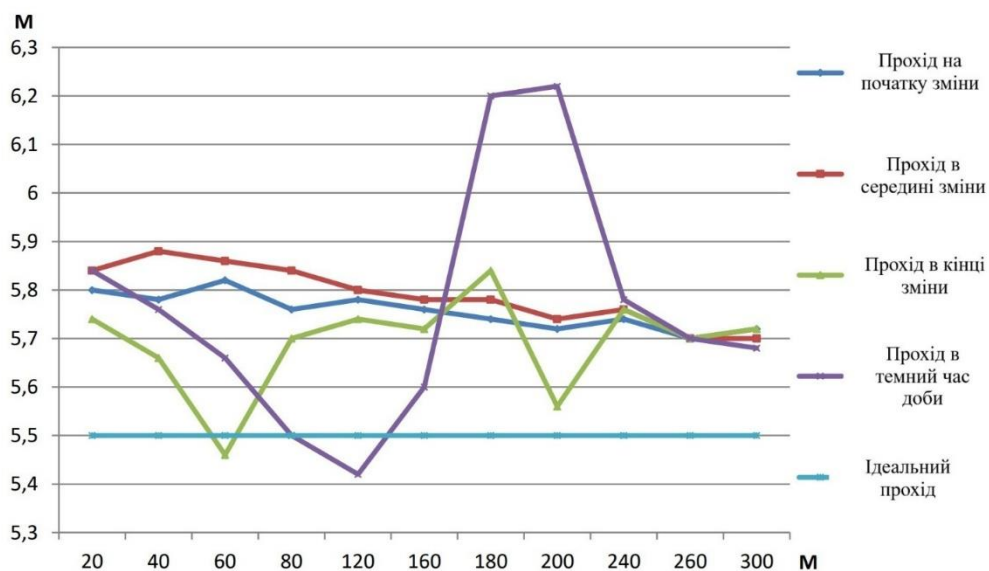


Рис. 3.2. Відхилення руху МТА від ідеальної траєкторії у напівавтоматичному режимі керування.

На рис. 3.3 представлено графік відхилення руху МТА в автоматичному режимі керування, тобто функцію керування поворотними колесами взяло на себе підрулювальне пристрій. З графіка видно, що точність руху МТА по заданій траєкторії практично не змінюється. Слід звернути увагу на рух у темний час доби. Проте, як зазначалося вище, це пояснюється недовірою тракториста-машиніста до нових технологій.

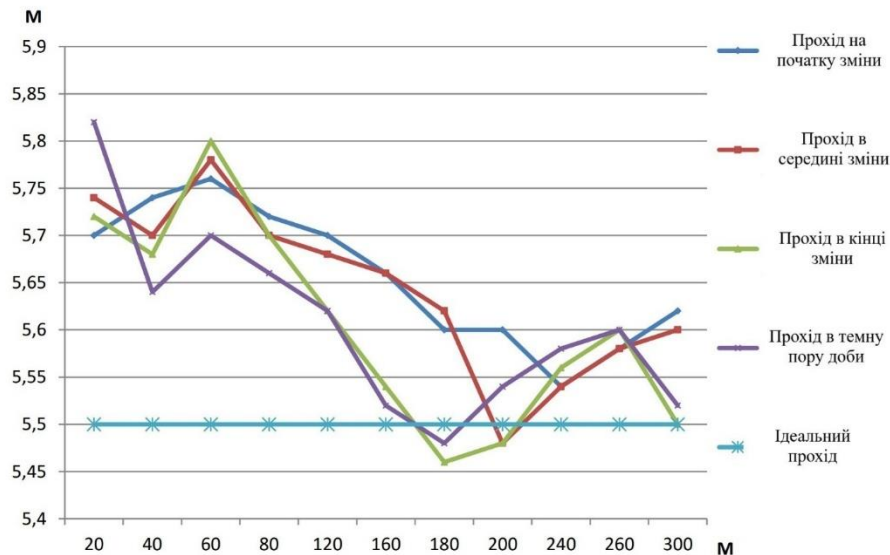


Рис. 3.3 Відхилення руху МТА від ідеальної траєкторії під час автоматичного режиму

Під час проведення випробувань було встановлено, що найменше відхилення досяглося в автоматичному режимі керування за допомогою підрулювального пристрою в середині робочої зміни. Найбільше відхилення спостерігалось в темний час доби при ручному режимі керування. Результати наведено в таблиці 3.2 та на рис. 3.4.

Таблиця 3.2 – Відхилення від ідеальної траєкторії руху залежно від режимів керування та робочого часу.

Робочий час / Режим керування	Відхилення від ідеальної траєкторії руху, см			
	Початок зміни	Середина зміни	Кінець зміни	Темна пора доби
ручне	46	27	37	54
напівавтоматичне	27	24	22	26
автоматичне	17	14	17	18

Найбільші відхилення від курсу були зафіксовані під час ручного режиму керування. На точність водіння в такому режимі впливає значна кількість факторів, що, у свою чергу, знижує чіткість контролю над МТА.

Пів автоматичний режим керування показав себе як ефективний помічник під час руху МТА у темний час доби, проте втома машиніста-механізатора за умов постійної необхідності коригувати рух та утримувати трактор на правильному курсі впливає на точність.

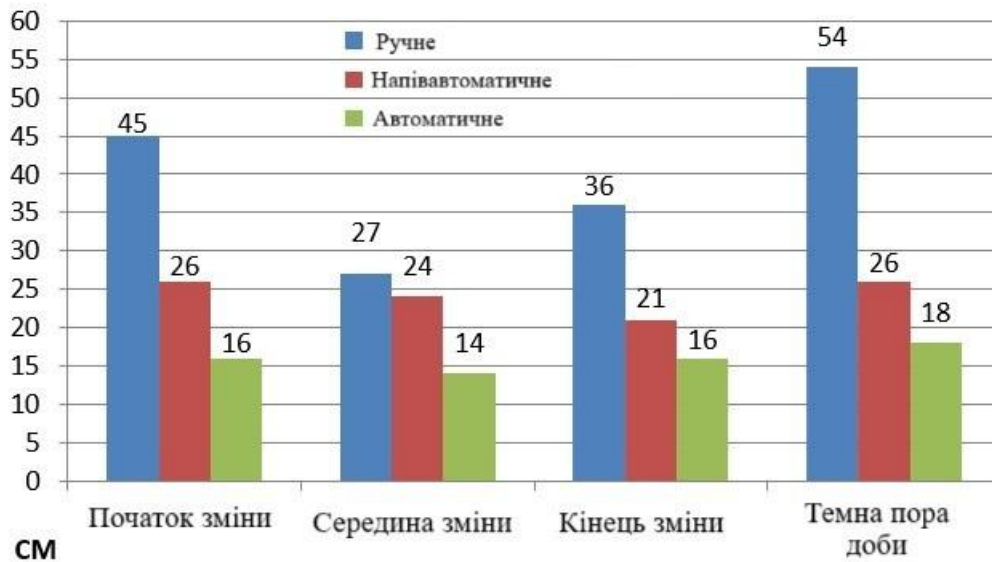


Рис. 3.4. Середнє відхилення від курсу у різних режимах руху, см.

Найменші відхилення спостерігалися при русі МТА в автоматичному режимі за допомогою підрулювального пристрою. Незалежно від робочої зміни або часу доби цей режим забезпечив мінімальні середні відхилення від заданого курсу.

Досліджувана мехатронна система рульового керування для паралельного водіння МТА дала змогу підвищити кількість продуктивних стебел, довжину колоса, масу 1000 зерен і відповідно, збільшити урожайність пшениці. Максимальна урожайність озимої пшениці була отримана у варіанті з розробленою мехатронною системою рульового керування МТА та склала 7,85 т/га, що на 1,5 т/га більше порівняно з внесенням добрив традиційним способом.

Застосування агронавігатора (курсказівника) дозволило підвищити урожайність на 1,15 т/га, що підтверджує переваги впровадження сучасних систем паралельного водіння, проте більш ефективною виявилася саме розроблена мехатронна система.

Очевидно, такий результат забезпечено завдяки мінімальним перекриттям, зменшенню кількості пропусків та підвищеній увазі машиніста-механізатора до технології внесення добрив через відсутність необхідності постійно утримувати МТА на заданому курсі.

Таблиця 3.3 – Вплив дози рідких добрив на урожайність озимої пшениці

Варіант	Схема досліджу	Урожайність, т/га
1	Контроль (традиційна технологія) NPK 5л/га+200 л води	6,35
2	За допомогою агронавігатора NPK 5л/га +200 л води	7,5
3	За допомогою розробленої мехатронної системи NPK 5л/га +200 л води	7,85

Завдяки мінімальному відхиленню стало можливим зменшити експлуатаційні витрати (добрива та паливо), знизити втому оператора та підвищити продуктивність праці (можливість роботи у денний і нічний час, а також за умов поганої видимості).

Висновки по розділу

Проведені польові випробування показали, що найбільші відхилення МТА від курсу (40 см) спостерігалися при ручному режимі керування, а найменші – під час руху МТА в автоматичному режимі (16 см) із застосуванням розробленої мехатронної системи для паралельного водіння МТА, незалежно від робочої зміни та часу доби.

Найвища урожайність озимої пшениці була отримана при використанні розробленої мехатронної системи рульового керування МТА та становила 7,85 т/га, що на 1,5 т/га більше порівняно з внесенням добрив традиційним способом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В магістерській роботі розроблено мехатронну систему рульового управління МТА для паралельного водіння з використанням супутникових радіонавігаційних систем у прецизійному землеробстві, що включає в себе апаратно-програмний комплекс, GPS приймач фірми «OEMStar» з точністю до 10 см, датчик нахилу (гіроскоп), датчик кута повороту коліс і електропривод підрулюючого пристрою на базі двигуна постійного струму напругою 12В. Апаратно-програмна частина реалізована у візуальному середовищі розробки VisualStudio 2018.

Проведено польові випробування на точність руху (трактор Belarus 320.4) та ефективність виконання сільськогосподарської операції (внесення рідких мінеральних добрив під озиму пшеницю на Belarus 82.1+обприскувач), які показали, що найбільші відхилення МТА від курсу (40 см) виявлені в ручному режимі управління, а найменші – при русі МТА в автоматичному режимі (16 см) за допомогою розробленої мехатронної системи для паралельного водіння МТА незалежно від робочої зміни та часу доби. При цьому експлуатаційні витрати знизилися на 3,3%, продуктивність МТА (га/зміна) зросла на 7,7% при виконанні сільськогосподарської операції, а врожайність (т/га) на 8,5%. Підвищення ефективності виконання сільськогосподарських операцій при паралельному керуванні МТА мехатронною системою рульового управління досягається зниженням стомлюваності оператора і збільшенням продуктивності праці (можливість роботи в нічний час, а також в умовах поганої видимості) і зменшенням експлуатаційних витрат.

Представлені в роботі результати досліджень, монтаж і налаштування мехатронної системи можна реалізувати в ремонтно-технічних службах, що обслуговують МТА.

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 2025IEEE 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>
3. Весельський В. І. Системи паралельного водіння МТА. *Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей*. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 52-55.
4. Весельський В. І., Борак К. В. Аналіз наявних систем паралельного водіння сільськогосподарських машин. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти*. м. Рівне, 8-9 травня 2025 року. Рівне : НУВГП, 2025. С. 18-22.
5. Борак К.В., Весельський В.І. Перспективні напрямки розвитку систем керування сільськогосподарських машин та тракторів. *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.
6. риценко А. А., Мельничук О. В. Системи навігації та автопілотування для МТА: огляд сучасних рішень. *Техніка і технології АПК*. 2019. № 4. С. 33–39.
7. Топольний Ф. В. Мехатронні системи в агроінженерії: навч. посіб. Львів : Новий Світ, 2020. 312 с.

8. Trimble Agriculture. Operator Manual: GFX Series Displays and NAV-900 Autopilot Controller. Westminster, CO, USA : Trimble Inc., 2022. 186 p.
9. John Deere. AutoTrac Implement Guidance: Technical Guide. Moline, USA, 2021. 104 p.
10. Claas Group. Steering Systems for Agricultural Machinery: Engineering Manual. Harsewinkel, 2020. 92 p.
11. Zhang Q., Pierce F. J. Agricultural Automation: Fundamentals and Practices. CRC Press, Boca Raton, 2013. 367 p.
12. Auernhammer H. Precision Farming—The Way to Sustainable Agriculture. *Engineering in Agriculture*. 2024. Vol. 5, № 2. P. 56–63.
13. Blackmore B. S., Fountas S., Tang L. Developing a Framework for Autonomous Field Operations. *Agricultural Engineering International*. 2023. Vol. 28. P. 112–124.
14. Rekoumis G. Development of a GNSS-Based Auto-Steering System for Agricultural Tractors. *IFAC PapersOnLine*. 2025. Vol. 54(2). P. 254–259.
15. Mahadevan S., Wang Z. Intelligent Mechatronic Control Systems for Off-Road Machinery. *Journal of Terramechanics*. 2024. Vol. 90. P. 1–12.
16. Тарасов В. М. Дослідження точності рульових систем тракторів при супутниковому керуванні. *Сільськогосподарські машини*. 2024. № 37. С. 45–52.