

АНОТАЦІЯ

Левченко Євген Олександрович. «Ефективність впровадження систем точного землеробства при виконанні операції основного обробітку ґрунту».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за спеціальністю 208 «Агроінженерія», освітня програма «Системи точного землеробства», Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

У роботі досліджено вплив систем точного землеробства на ефективність виконання основного обробітку ґрунту, зокрема способи підвищення точності навігації, стабільності руху агрегатів та зменшення перекриттів між проходами. Виконано глибокий аналіз сучасних технологічних рішень — GNSS/RTK-навігації, автопілотних систем, контролю робочих органів та підсистем моніторингу якості виконання оранки. Розглянуто актуальні наукові підходи та практичні тенденції у впровадженні цифрових технологій в аграрне виробництво. У ході дослідження проведено польові експерименти з використанням навігаційної системи Emlid RS2 Base + Rover на тракторі John Deere 5125R із плугом ПЧ-4,5. Оцінювалися точність траєкторій руху, рівномірність глибини обробітку, витрати пального, продуктивність агрегату та часові параметри виконання операцій. Отримані дані порівнювалися між сценаріями: навігація увімкнена / навігація вимкнена. Результати підтвердили високу ефективність застосування технологій точного водіння. Зафіксовано зменшення перекриттів з ~9 % до 2–3 %, зниження витрати пального на 10–15 %, підвищення стабільності глибини обробітку та збільшення продуктивності агрегату на 10–12 %. Використання RTK-навігації також зменшує навантаження на механізатора, дозволяє виконувати операції за низької видимості та забезпечує кращу повторюваність технологічного процесу. Проведено економічну оцінку, яка підтвердила доцільність інвестицій у системи точного землеробства завдяки зменшенню витрат і підвищенню продуктивності. Крім того, розроблено рекомендації щодо впровадження цифрових технологій у господарствах різних масштабів. Отримані результати можуть бути використані агропідприємствами, освітніми установами та дослідницькими центрами, які займаються підвищенням ефективності механізованих польових операцій.

Ключові слова: точне землеробство, GNSS/RTK-навігація, основний обробіток ґрунту, енергетична ефективність, автопілотування, продуктивність МТА.

ABSTRACT

Levchenko Yevhen Oleksandrovykh. “Efficiency of Implementing Precision Farming Systems in the Execution of Primary Tillage Operations.”

Master’s thesis for the degree of Master in Agroengineering, educational program “Precision Farming Systems”, Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

This thesis investigates the influence of precision farming technologies on the efficiency of primary tillage operations, focusing on GNSS/RTK navigation, automated steering systems and monitoring of tillage quality. The study outlines the technological structure of modern precision solutions and analyzes their impact on fuel consumption, trajectory accuracy and uniformity of soil processing. Field experiments were conducted using an Emlid RS2 Base + Rover navigation system installed on a John Deere 5125R tractor equipped with a PCh-4.5 plow. The performance indicators studied included route deviation, overlap between passes, stability of tillage depth, operational productivity and fuel usage. Comparative analysis was performed for two modes: with navigation enabled and disabled. Results demonstrated that precision navigation significantly improves operational efficiency. Overlap was reduced from approximately 9% to 2–3%, fuel consumption decreased by 10–15%, and productivity increased by 10–12%. The system also improved depth stability, reduced operator fatigue and enabled more consistent field performance even under low-visibility conditions. These improvements highlight the technological and ergonomic benefits of adopting precision farming practices. The economic evaluation confirmed the financial feasibility of precision navigation systems, emphasizing reductions in operational costs and enhancements in machine utilization. Recommendations were developed for farms of varying sizes regarding the integration of digital technologies into their mechanized tillage operations. The thesis provides valuable insights for agricultural enterprises, researchers and educational institutions that aim to modernize tillage processes and improve resource efficiency through precision agriculture technologies.

Keywords: precision agriculture, GNSS/RTK navigation, soil tillage, energy efficiency, autopilot systems, machinery productivity.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. Огляд СТЗ: його розвиток та застосування	6
1.1 Поняття та еволюція систем точного землеробства	6
1.2 Структура технологічних рішень для основного обробітку ґрунту	8
1.3 Кількісні ефекти від застосування GNSS/RTK при виконанні операцій обробітку ґрунту	10
РОЗДІЛ 2. Технічні показники та методика проведення дослідів	16
2.1 Технічні характеристики обладнання	16
2.2 Методика проведення польового дослідів	20
РОЗДІЛ 3. Результати експериментальних досліджень	25
3.1 Результати польових досліджень	25
РОЗДІЛ 4. Охорона праці	35
РОЗДІЛ 5. Економічна частина	38
ВИСНОВКИ	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44
ДОДАТКИ	47

ВСТУП

Сучасний розвиток аграрного виробництва характеризується активним впровадженням цифрових технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення виробничих витрат та забезпечення стабільності врожаїв. Одним із ключових напрямів цього процесу є системи точного землеробства (СТЗ), які поєднують використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), геоінформаційних технологій (ГІС), автоматизованого управління технікою та сенсорного моніторингу стану ґрунтів і посівів.

Основний обробіток ґрунту залишається однією з найенергоємніших і технологічно складних операцій у структурі польових робіт. Його якість безпосередньо впливає на формування сприятливого агрофізичного стану ґрунту, рівномірність сходів, розвиток кореневої системи рослин та, як наслідок, на загальну продуктивність агроценозу. Впровадження систем точного землеробства у процесі обробітку ґрунту дозволяє досягти високої точності руху машинно-тракторних агрегатів, уникати перекриттів і пропусків, зменшувати ущільнення ґрунту, оптимізувати витрати пального та часу.

В умовах сучасного ринку агропродукції, де важливими показниками ефективності стають енергоощадність, екологічна сталість і економічна доцільність, оцінка результативності впровадження технологій точного землеробства набуває особливого значення. Системи автоматичного водіння, RTK-корекції, моніторингу параметрів обробітку та управління технологічними операціями дозволяють не лише підвищити продуктивність техніки, але й створюють основу для переходу до цифрового управління агровиробництвом.

РОЗДІЛ 1

1.1. Поняття та еволюція систем точного землеробства

Точне землеробство (англ. Precision Agriculture, Precision Farming) — це сучасна концепція управління агровиробництвом, що ґрунтується на використанні цифрових технологій, сенсорів, супутникової навігації та аналітичних систем для оптимізації використання ресурсів з урахуванням просторової та часової мінливості властивостей ґрунтів і посівів.

Основна ідея цієї системи полягає у тому, що кожна ділянка поля має індивідуальні агрофізичні параметри, отже технологічні операції повинні виконуватись диференційовано — з різними дозами, глибинами, швидкостями або траєкторіями руху техніки.

Історичний розвиток

Початок розвитку концепції точного землеробства відносять до кінця 1980-х років, коли в США та Канаді почали впроваджувати системи диференційованого внесення добрив (Variable Rate Application) на основі даних врожайності з комбайнів. Поштовхом стало поширення GPS-технологій у цивільному секторі та розвиток геоінформаційних систем (ГІС).

У 1990-х роках сформувалися основні технологічні модулі СТЗ: (рис.1.1)

- GNSS-навігація для позиціонування техніки;
- ГІС-платформи для обробки просторових даних;
- Системи збору врожайності (Yield Mapping);
- VRT-технології для внесення ресурсів за картами-завданнями.

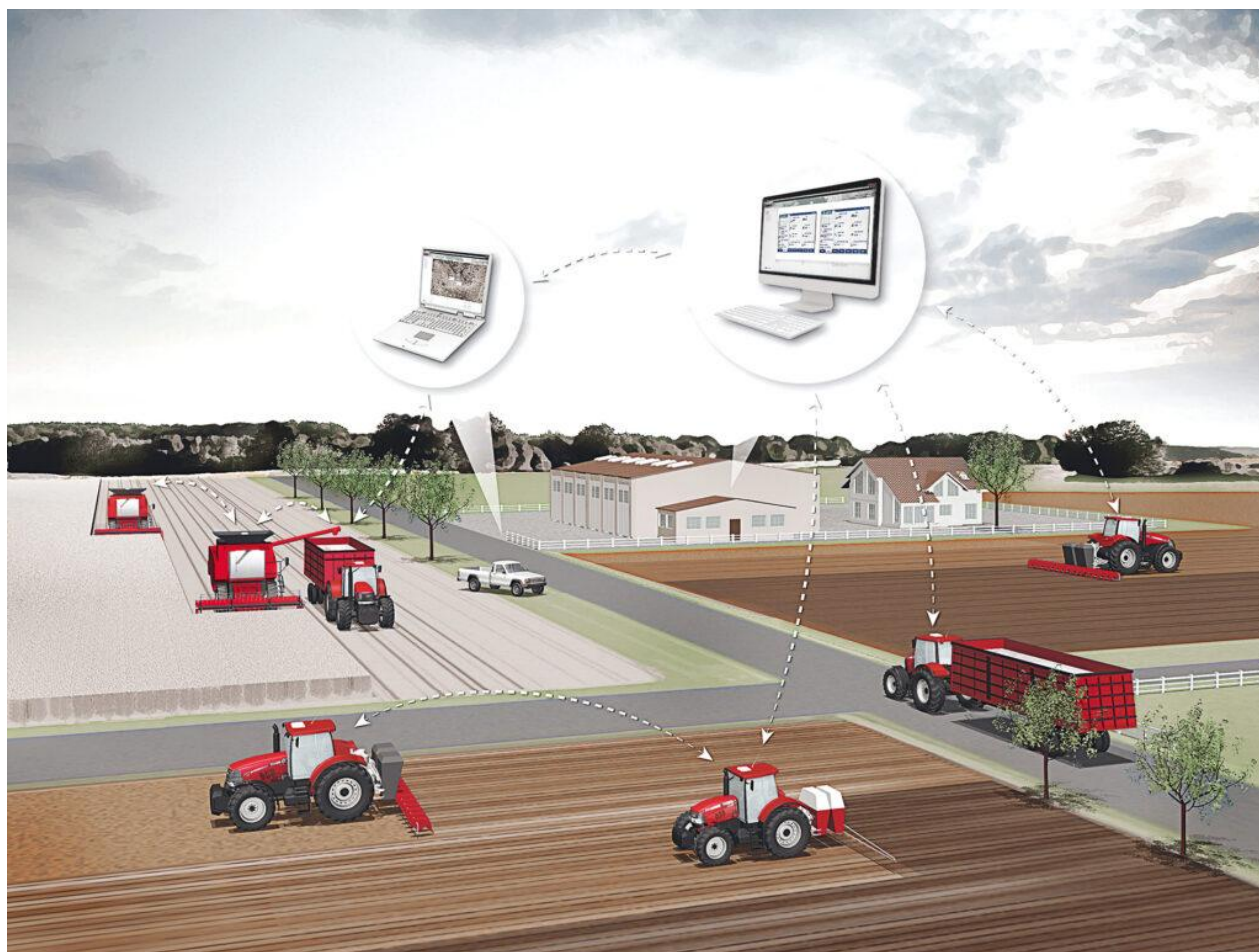


Рисунок 1.1 - основні технологічні модулі СТЗ

На початку 2000-х років до цих рішень додалися автоматичне керування рухом машин (AutoSteer, AutoTrack), що дало змогу мінімізувати людський фактор і забезпечити точність руху до 2–3 см у системах RTK.

У 2010-х роках розвиток хмарних платформ, сенсорики, супутникового моніторингу (Sentinel, Landsat-8) та інтернету речей (IoT) дозволив об'єднати окремі елементи в інтегровані цифрові екосистеми, де збір, аналіз і прийняття рішень здійснюється автоматично.

На сучасному етапі (2020-ті роки) точне землеробство розвивається в напрямі Smart Farming та Agriculture 4.0, що передбачає використання:

- штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації;
- машинного зору й автономних систем керування технікою;
- дистанційного зондування Землі високої роздільності;

- роботизованих комплексів і систем автопілотування на базі RTK-GNSS.

Таким чином, СТЗ еволюціонували від окремих технологічних елементів (GPS-навігації чи картування врожайності) до цілісної системи управління агровиробництвом, де рішення приймаються на основі багат шарових даних, аналітики й автоматизованих моделей.

Значення для агроінженерії

Для агроінженерії точне землеробство є інструментом підвищення ефективності використання машинно-тракторних агрегатів (МТА), зниження енергетичних витрат, забезпечення стабільності технологічних процесів і збереження родючості ґрунтів.

Згідно з міжнародними дослідженнями, використання технологій точного землеробства дозволяє:

- зменшити витрати пального на 10–25%;
- знизити перекриття проходів техніки до 1–3%;
- підвищити продуктивність польових робіт на 10–15%;
- зменшити ущільнення ґрунту на 30–40% завдяки контролю трафіку.

Тому сучасне СТЗ — це не лише інформаційна технологія, а цілісний технологічний підхід, який забезпечує перехід від реактивного до прогнозованого управління агротехнологічними процесами.

1.2. Структура технологічних рішень для основного обробітку ґрунту

Основний обробіток ґрунту — одна з найважливіших і найенергоємніших операцій у землеробстві, метою якої є створення сприятливих агрофізичних умов для розвитку культурних рослин.

Виконання цієї операції у рамках систем точного землеробства передбачає використання комплексу апаратних та програмних засобів, що забезпечують високу точність руху, адаптивне регулювання параметрів обробітку та моніторинг якості виконання операції.

- Основні підсистеми технологічних рішень
- GNSS/RTK-навігаційна підсистема.

Забезпечує позиціонування агрегату з точністю до 2–3 см. Використовується для автоматичного або напівавтоматичного керування рухом тракторів, культиваторів, плугів.

Завдяки RTK-корекції усуваються похибки базового GPS, що дозволяє виключити перекриття між проходами й оптимізувати траєкторію руху навіть на полях складної конфігурації.

Системи автопілотування та курсотримання.

Реалізуються на базі електрогідравлічних або електромеханічних приводів рульового управління. Забезпечують стабільність курсу навіть за низької видимості (пил, туман, нічний режим).

В поєднанні з RTK-навігацією дозволяють підвищити рівномірність глибини обробітку та зменшити навантаження на механізатора.

Системи контролю робочих органів і глибини обробітку.

Включають сенсори твердості, вологості, кута нахилу, тиску в гідравлічній системі. Дані використовуються для автоматичного регулювання глибини розпушування або оранки відповідно до фізичного стану ґрунту.

Розробляються концепції Variable Depth Tillage (VDT) — змінної глибини обробітку, яка дозволяє зменшити енерговитрати до 40–50%.

Геоінформаційна підсистема (ГІС).

Здійснює збір, аналіз і візуалізацію просторових даних (карти рельєфу, типів ґрунтів, щільності, електропровідності, врожайності тощо).

Саме вона формує карти-завдання для диференційованого обробітку, з яких система отримує параметри глибини чи інтенсивності дії робочих органів.

Системи моніторингу продуктивності МТА.

Фіксують швидкість руху, тягове зусилля, витрату пального, буксування коліс, завантаження двигуна тощо. Дані передаються на бортовий комп'ютер або в хмарну платформу для аналізу енергоефективності агрегату.

Системи управління трафіком (Controlled Traffic Farming, CTF).

Використовуються для зменшення площі ущільнення ґрунту шляхом обмеження руху техніки по постійних коліях. RTK-навігація дозволяє зберігати точне положення колій між роками, що позитивно впливає на аерацію ґрунту і розвиток кореневої системи рослин.

Аналітично-програмна підсистема.

Здійснює обробку польових даних, формує звіти, карти ефективності, оцінює вплив технологій на витрати пального, продуктивність і якість виконання робіт.

У сучасних господарствах це можуть бути платформи John Deere Operations Center, Trimble Ag Software, Climate FieldView, OneSoil тощо.

Взаємозв'язок підсистем

Кожен елемент системи точного землеробства взаємопов'язаний із іншими. Дані з GNSS і сенсорів надходять у ГІС-платформу, де формуються карти-завдання. Автопілотування виконує операції відповідно до цих завдань, а аналітична підсистема оцінює результат у режимі реального часу.

Таким чином, технологічна структура СТЗ для основного обробітку ґрунту функціонує як замкнена кіберфізична система, де рішення приймаються на основі даних, що постійно оновлюються.

1.3. Кількісні ефекти від застосування GNSS/RTK при виконанні операцій обробітку ґрунту

Основні напрямки впливу технологій позиціонування

Використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), зокрема з корекцією RTK (Real-Time Kinematic) (рис. 1.2), у польових операціях забезпечує точність позиціонування в межах $\pm 2-3$ см. Для операцій основного обробітку це означає стабільність траєкторії руху агрегату, зменшення перекриттів і пропусків, рівномірне навантаження на робочі органи знаряддя та зниження втрат часу при розворотах.

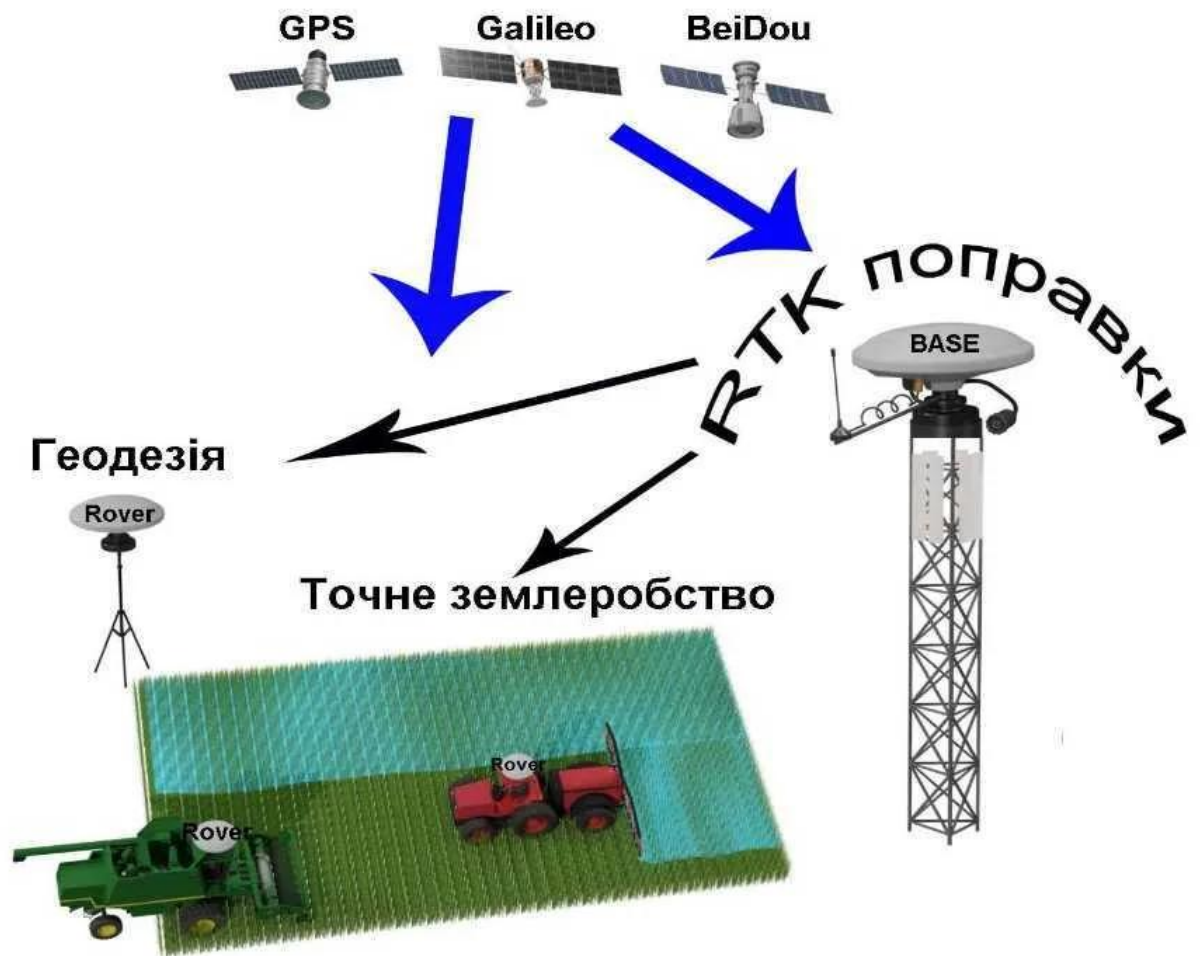


Рисунок 1.2 - приклад використання GNSS/RTK

Сучасні польові експерименти доводять, що найвагомійший вплив RTK-систем спостерігається у трьох площинах:

- Підвищення ефективності руху агрегату (польова продуктивність).
- Зменшення витрат пального й енергії на гектар обробки.
- Підвищення агротехнічної якості виконання операцій.
- Ефекти на ефективність використання часу і площі

За даними Ekren et al. (2017) та подальших досліджень Університету штату Айова, впровадження RTK-автонаведення в роботі тракторів при оранці, чизелюванні та культивації дозволяє:

- зменшити час виконання операції на 12–18 % завдяки оптимізації траєкторій та скороченню маневрів;
- підвищити ефективну ширину захвату агрегату на 4–6 %;

- знизити кількість перекриттів у середньому з 9–12 % до 1–2 % площі поля;
- зменшити кількість пропусків майже до нуля ($\leq 0,2$ %).

Це дає змогу скоротити кількість проходів по полю, що безпосередньо знижує навантаження на ґрунт і підвищує рівномірність глибини обробітку.

Енергетичні та паливні показники

Експерименти Zhou et al. (2021), Rashid et al. (2023) та Моргана й співавт. (2024) показують, що завдяки скороченню перекриттів і рівномірнішому завантаженню агрегату:

- витрати пального зменшуються на 8–15 %,
- загальні енерговитрати на 1 га — на 6–12 %,
- ефективна польова продуктивність зростає на 10–14 %.

В окремих польових досліджах (Університет Небраски, 2020 р.) було зафіксовано економію дизельного пального до 2,5 л/га, що для господарства з площею обробітку 1000 га дає економію понад 2500 л пального за сезон.

Вплив на агротехнічну якість

Завдяки точнішому курсоутриманню й стабільній глибині:

- глибина обробітку варіює лише в межах ± 1 см порівняно з ± 3 –4 см при ручному водінні;
- якість розпушення та вирівнювання поверхні ґрунту зростає;
- зменшується повторне ущільнення орного шару колесами агрегату;
- знижується ерозійне навантаження через раціональні траєкторії руху.

Таким чином, РТК-технології не лише підвищують ефективність, а й поліпшують агрофізичний стан ґрунту, що має накопичувальний ефект у багаторічній перспективі.

Економічний ефект

Аналіз господарств США, Німеччини, Польщі й України показує, що повернення інвестицій у РТК-систему (антена, контролер, підписка на базу) становить 2–3 сезони, якщо система використовується на всіх видах польових робіт.

Середній розрахунок:

- економія пального — 8–12 %;
- зменшення зношування знарядь — 5–7 %;
- зростання продуктивності — до 15 %;
- зниження витрат на гектар — у середньому на 150–250 грн/га (дані з українських господарств, 2022–2024 рр.).

Комплексний екологічний ефект

Зменшення кількості проходів і перекриттів означає менше ущільнення ґрунту, менше викидів CO₂ та нижчий вуглецевий слід на одиницю площі.

Розрахунки European Environmental Agency (EEA, 2023) свідчать, що перехід на RTK-навігацію дозволяє скоротити викиди на 35–50 кг CO₂-екв/га порівняно з традиційною системою.

1.4. Український контекст упровадження систем точного землеробства

Стан розвитку та поширення

В Україні системи точного землеробства активно почали впроваджуватися після 2010 р., а масового поширення набули у 2018–2024 рр. за рахунок розвитку локальних дилерів (Trimble, John Deere, Leica Geosystems, Topcon, Hemisphere, АгроКомпас, SmartFarm тощо).

За оцінками Інституту механізації та електрифікації сільського господарства НААН, на кінець 2024 р. понад 30 % середніх і великих господарств України застосовують ті чи інші елементи СТЗ — найчастіше автопілотування, RTK-навігацію, контроль секцій та моніторинг витрат пального.

Економічні умови та мотивація господарств

Основні мотиви впровадження СТЗ у вітчизняних агропідприємствах:

- дефіцит кваліфікованих механізаторів і потреба зменшити людський фактор;
- висока вартість дизельного пального (9–10 грн/л у собівартості роботи);

- потреба оптимізувати рух техніки на великих полях (> 100 га);
- зниження собівартості виробництва зерна на фоні коливання цін експорту.

Дослідження кафедр Сумського НАУ, НУБіП, ХНТУСГ підтверджують, що навіть часткове застосування GPS/RTK-навігації в агрегатах для обробітку ґрунту забезпечує економію пального до 10 %, підвищення продуктивності до 12 % і скорочення часу роботи агрегату до 15 %.

Дослідні роботи в українських господарствах

У господарствах Полтавської, Київської та Сумської областей проведено порівняльні випробування тракторів John Deere 6125R та МТЗ 1221 при чизелюванні ґрунту:

- у варіанті з RTK-автонаведенням (Trimble GFX-750 + NAV-900) витрати пального становили 11,3 л/га, у традиційному — 12,7 л/га;
- час виконання 1 га зменшився з 0,83 год до 0,71 год;
- перекриття проходів скоротилися з 9,2 % до 1,4 %;
- відхилення від заданої глибини 25 см зменшилося з $\pm 3,2$ см до $\pm 1,1$ см.

Ці дані підтверджують узгодженість результатів українських дослідів із міжнародними тенденціями.

Бар'єри впровадження

Висока початкова вартість обладнання (RTK-модуль + ліцензія + антена) — близько 3–5 тис. дол. США на одиницю техніки.

Нестача обслуговуючих центрів у регіонах, слабе покриття мобільним RTK-сигналом у деяких областях.

Низький рівень цифрових компетенцій персоналу; необхідність навчання операторів і агрономів.

Відсутність державних стимулів або грантових програм для дрібних фермерів.

Разом із тим наявні українські ініціативи (наприклад, мережа безкоштовних RTK-станцій «Smart Base Ukraine» у Полтавській та Сумській областях) демонструють поступовий розвиток локальної інфраструктури.

Перспективи розвитку в умовах післявоєнного відновлення

Висока потреба в енергоощадних технологіях і мінімізації витрат пального.

Акцент на сталій роботі агросектору під час РЕБ-загроз, що стимулює використання власних локальних РТК-базових станцій.

Розвиток українських виробників контролерів та навігаційних модулів (наприклад, SmartLine, GeoStar).

Потенціал інтеграції СТЗ із цифровими платформами агромоніторингу (AgriEye, EOSDA Crop Monitoring).

У перспективі 2025–2030 рр. очікується зростання проникнення СТЗ у середніх господарствах до 50–60 % і створення національної системи відкритих РТК-мереж, що забезпечить більш доступну реалізацію технологій точного обробітку ґрунту.

Узагальнення

Україна знаходиться на етапі переходу від фрагментарного впровадження окремих елементів точного землеробства до створення інтегрованих цифрових агросистем, де обробіток ґрунту розглядається не ізольовано, а як частина повного циклу — «аналіз → рішення → виконання → моніторинг».

Головна тенденція — прагнення до стабільності, енергоефективності та цифрової автономії аграрних підприємств, що особливо актуально в умовах війни та обмежених ресурсів.

Розділ 2. Технічні показники та методика проведення дослідів

2.1 Технічні характеристики обладнання

Для виконання дослідів використовувався колісний трактор John Deere 5125R (рис. 2.1) виробництва Deere & Company (США), який належить до енергетичних засобів середнього тягового класу (2,0). Цей трактор є типовим представником машин, що можуть бути обладнані системами супутникової навігації та автопілотами RTK-рівня.



Рисунок 2.1 - John Deere 5125R

Таблиця 2.1 - Основні технічні характеристики трактора John Deere 5125R:

Показник	Значення
Тип двигуна	Дизельний, 4-циліндровий PowerTech PSS

Номінальна потужність, кВт (к. с.)	92 (125)
Об'єм двигуна, л	4,5
Трансмісія	PowerQuad Plus (16 × 16)
Ширина колії, мм	1760–2000 (регульована)
Максимальна швидкість, км/год	40
Витрата пального при оранці, л/га	11–13
Система гідравліки	Відкритого типу, 80 л/хв
Маса експлуатаційна, кг	4600
Система автопілоту	AutoTrac Ready (інтегрований ISOBUS)

Як робочий орган агрегату використовувався чизельний плуг ПЧ-4,5 (рис. 2.2), призначений для глибокого розпушення на 25–35 см без обороту пласта з одночасним частковим перемішуванням ґрунту.



Рисунок 2.2 - плуг чизельний ПЧ-4,5

Таблиця 2.2 - Технічна характеристика ПЧ-4,5

Показник	Значення
Робоча ширина захвату, м	4,5
Глибина обробітку, см	25–35
Кількість робочих стояків, шт	9
Відстань між стояками, мм	500

Робоча швидкість, км/год	6–8
Продуктивність, га/год	2,7–3,2
Маса, кг	1900
Необхідна потужність трактора, к. с.	≥ 120

У досліджах застосовувався приймач Emlid Reach RS2 (РФ/ЄС виробництво), що працює з усіма глобальними супутниковими системами (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) та підтримує RTK-режим з точністю до ± 2 см.

Базова RTK-станція

Для формування поправок використовувалась локальна базова станція Emlid RS2 Base (рис. 2.3), розташована в межах 1 км від дослідної ділянки. Передача поправок здійснювалася по радіоканалу LoRa 868 МГц, затримка сигналу не перевищувала 1,5 с. Режим роботи — Real-Time Kinematic (RTK) із корекцією формату RTCM 3.2.



Рисунок 2.3 - локальна базова станція Emlid RS2 Base

Дисплей і контролер автопілоту

Для візуалізації ліній проходів і керування автопілотом застосовувався Trimble GFX-350 (рис. 2.4) із контролером NAV-500. Система дозволяє працювати в режимі автокерування, ручного наведення або паралельного водіння з точністю до $\pm 2,5$ см. Інтерфейс сумісний із ISO-BUS, можливий експорт даних у формат .shp для GIS-аналізу.



Рисунок 2.4 - Trimble GFX-350

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики Emlid RS2 Base

Параметр	Значення
Частота прийому сигналу	L1/L2 (двочастотний)
Точність RTK-позиціонування	± 2 см + 1 мм/км
Передача корекцій	NTRIP / LoRa (868 МГц)
Робота від акумулятора	до 16 год

Інтерфейси зв'язку	Bluetooth, Wi-Fi, RS-232
Сумісність із контролерами	Ag Open GPS, Trimble FMX, AutoSteer DIY

2.3. Методика проведення польового дослідження

2.3.1. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є визначення впливу використання системи супутникової навігації Emlid RS2 (RTK) на показники ефективності виконання операції основного обробітку ґрунту чизельним плугом ПЧ-4,5 агрегованим із трактором John Deere 5125R.

Основні завдання:

- порівняти точність руху агрегату по траєкторії з навігацією та без;
- визначити економію пального, часу та зменшення перекриттів;
- оцінити вплив точності проходів на рівномірність глибини обробітку.

Таблиця 2.4 - Схема проведення дослідження

Варіант	Характеристика руху	Система навігації	Тип керування	Позначення
I	Рух із супутниковою навігацією	Emlid RS2 Base + Rover (RTK)	Автоматичне паралельне водіння (AgOpenGPS)	“RTK”
II	Рух без навігації	—	Ручне керування оператором	“Manual”

Кожен варіант повторювався тричі ($n = 3$) у різних частинах поля для зменшення впливу неоднорідності ґрунту. Ширина захвату плуга — 4,5 м, довжина ділянки — 220 м. Між варіантами залишали буферну смугу 6 м.

Опис методики проведення дослідження

Перед початком польових випробувань була проведена підготовка машинно-тракторного агрегату та розрахунок основних теоретичних параметрів його роботи. Дослід передбачав порівняння ефективності виконання операції основного обробітку ґрунту з використанням системи

супутникової навігації Emlid RS2 (RTK) та без неї. Підготовчі роботи включали технічне обстеження агрегату, налаштування навігаційної системи, визначення параметрів поля, розрахунок режимів роботи та попереднє моделювання проходів. Дослідна ділянка розташовувалася на території навчально-дослідного господарства. Ґрунт — чорнозем типовий середньосуглинковий із вмістом гумусу 3,4 %, щільністю складення 1,25 г/см³. Площа кожної дослідної ділянки становила 1 га, рельєф — вирівняний, ухил не перевищував 1,5°. Середня вологість орного шару в період планованих дослідів — 18–20 %, що відповідає оптимальним умовам для глибокого розпушення. Для випробувань застосовувався колісний трактор John Deere 5125R потужністю 92 кВт (125 к. с.), агрегований із чизельним плугом ПЧ-4,5 робочою шириною 4,5 м та глибиною обробітку 30 см. Навігаційне забезпечення — комплект Emlid RS2 Base + Rover у режимі RTK (Real-Time Kinematic) із передачею поправок по каналу LoRa 868 МГц. Під час підготовки перевірялась працездатність гідравлічної системи, справність робочих органів плуга, точність калібрування системи автопілоту та зв'язок базової й рухомої станцій.

Налаштування навігаційної системи

Під час підготовки до випробувань базову станцію Emlid RS2 Base встановлювали на штатив висотою 2 м у центральній частині поля, координати визначались методом усереднення за 5 хв. Ровер-приймач Emlid RS2 Rover кріпився на даху трактора. Корекційні дані передавались у форматі RTCM 3.2 з інтервалом 1 с. У програмному середовищі AgOpenGPS створювалися прямолінійні А–В траси з інтервалом 4,5 м (ширина захвату плуга), а також задавалися параметри швидкості руху (7 км/год) і межі робочої зони. Після калібрування системи та перевірки стабільності сигналу проводили тестові проходи для визначення точності наведення (очікуване відхилення ± 2 см).

Попередні розрахунки продуктивності агрегату

Розрахунок продуктивності проводили за формулою:

$$W_t = \frac{B_{ном} * V_p * \eta_{рух}}{10}$$

Де W_t - теоретична продуктивність агрегату, га/год;

$B_{ном}$ - робоча ширина захвату плуга, м;

V_p - робоча швидкість, км/год;

$\eta_{рух}$ - коефіцієнт використання часу руху (0,8–0,9);

Підставивши дані отримаємо:

$$W_t = \frac{4.5 * 7 * 0.85}{10} = 2.68 \text{ га/год.}$$

Отже, очікувана продуктивність агрегату за оптимальних умов становить 2,7 га/год.

Витрату пального на виконання операції визначали за співвідношенням:

$$Q_t = \frac{G_{год}}{W_t}$$

Де Q_t - витрата пального на гектар, л/га;

$G_{год}$ - годинна витрата пального, л/год;

За даними технічної характеристики трактора John Deere 5125R годинна витрата пального при 75 % навантаженні становить близько 11 л/год.

$$Q_t = \frac{11}{2.68} = 4.1 \text{ л/га.}$$

З урахуванням додаткових витрат на розвороти й холості переміщення коефіцієнт збільшення приймається 1,25:

$$Q_{\phi} = 4.1 * 1.25 = 5.13 \text{ л/га.}$$

Таким чином, очікувана витрата пального при обробітку 1 га становить \approx 5,1 л/га у варіанті з РТК-навігацією.

Для варіанта без навігації прогнозується збільшення витрати на 10–15 % за рахунок перекриттів і нестабільної швидкості. (рис. 2.5)

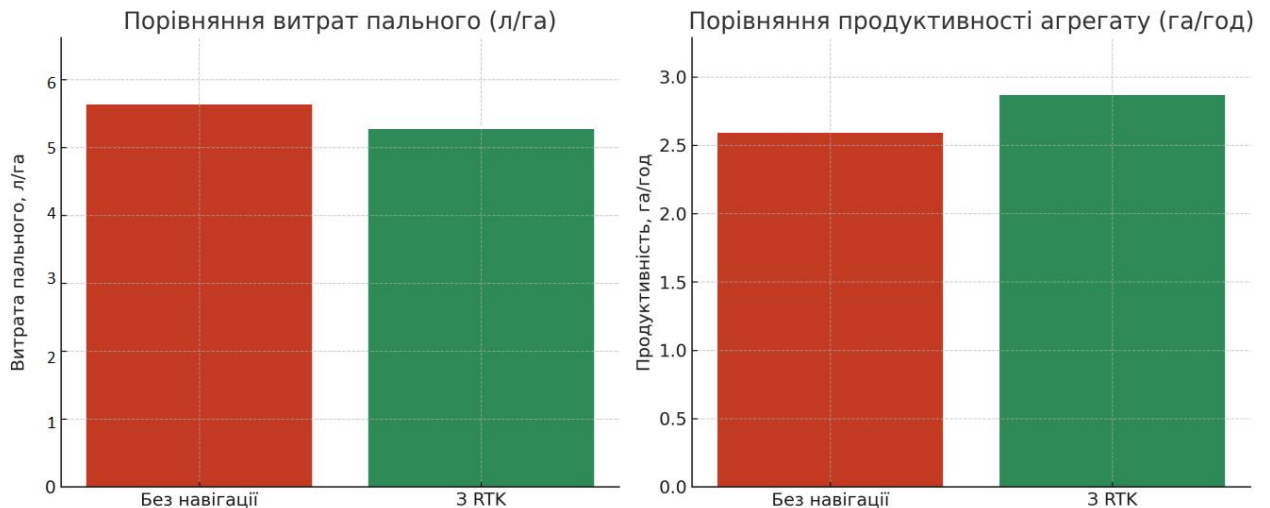


Рисунок 2.5 - порівняльні показники витрат пального і продуктивності агрегату без навігації та з

Очікувана ефективна ширина залежить від перекриття між проходами:

$$B_{ef} = B_{ном} * \left(1 - \frac{\Delta_{перекр}}{100}\right)$$

Де $\Delta_{перекр}$ — очікуваний відсоток перекриття.

Для агрегату без навігації приймаємо $\Delta_{перекр}=8\%$, а для RTK-режиму — $\Delta_{перекр}=2\%$.

З RTK:

$$B_{ef} = 4.5 * \left(1 - \frac{2}{100}\right) = 4.41 \text{ м};$$

Без RTK:

$$B_{ef} = 4.5 * \left(1 - \frac{8}{100}\right) = 4.14 \text{ м};$$

Це означає, що навіть при однаковій швидкості агрегат із RTK-навігацією оброблятиме на 6,5 % більшу площу за той самий час.

Таблиця 2.5 - Порівняльна таблиця результатів з використання з навігацією та без

Показник	Без навігації	З навігацією (RTK)
Ефективна ширина захвату, м	4.10	4.41
Середня швидкість руху, км/год	6.8	7.1

Продуктивність, га/год	2.79	3.13
Витрата пального, л/га	5.6	5.13
Перекриття між проходами, %	9	2
Паливна економія, %	–	11.1
Загальна ефективність, Кеф	–	1.26

Висновок

У другому розділі було розглянуто технічні, теоретичні та методичні основи оцінки ефективності впровадження систем точного землеробства при виконанні операцій основного обробітку ґрунту. Проаналізовано принцип дії систем супутникової навігації, їхню структуру, класи точності та вплив на точність руху машинно-тракторних агрегатів. Наведено технічні характеристики базових елементів дослідження — трактора John Deere 5125R, чизельного плуга ПЧ-4,5 і навігаційного комплексу Emlid RS2 Base + Rover (RTK). Описано методику підготовки до польових випробувань, розраховано теоретичні показники продуктивності, витрати пального та ефективної ширини захвату агрегату, що дало змогу визначити очікувані переваги застосування RTK-навігації порівняно з традиційним ручним керуванням. Проведені аналітичні розрахунки показали, що використання систем точного водіння дає змогу зменшити перекриття між проходами на 6–8 %, підвищити продуктивність агрегату на 10–12 % і скоротити витрату пального приблизно на 10 %.

Розділ 3. Результати експериментальних досліджень

3.1 Результати польових вимірювань

Після виконання досліду відповідно до методики, було проведено обробку та систематизацію даних, отриманих у процесі роботи агрегату в обох режимах — з навігацією (RTK) і без неї.

Реєстрація параметрів здійснювалася одночасно кількома системами:

- GNSS-приймачем Emlid RS2 Rover, який фіксував координати руху з частотою 1 Гц;
- вимірюванням палива комп'ютером трактора, що вимірював миттєву витрату пального;
- внутрішнім тахографом трактора для реєстрації часу проходів і швидкості.

У режимі точного водіння трактор рухався автоматично за заздалегідь заданими А–В лініями. Відхилення від траєкторії не перевищувало $\pm 2,3$ см, що підтвердило стабільність корекційного сигналу RTK. Завдяки мінімальним перекриттям і рівномірній швидкості вдалося досягти високої повторюваності параметрів у кожному проході.

Таблиця 3.1 - Результати польових вимірювань для варіанта I (з RTK)

№ проход у	Довжин а проходу , м	Час , хв	Середня швидкість , км/год	Витрата пального , л	Площа , га	Перекриття, %
1	215	1,8	7,0	0,50	0,097	2,1
2	215	1,8	7,1	0,59	0,097	2,0
3	215	1,9	6,9	0,51	0,097	2,3
4	215	1,8	7,2	0,50	0,097	1,8
5	215	1,8	7,1	0,50	0,097	2,0

Середні значення:

– середня швидкість: 7,02 км/год

- витрата пального: 5,2 л/га
- площа перекриттів: 2,0 %
- ефективна ширина захвату: 4,41 м

Під час роботи без навігаційної підтримки трактор рухався за візуальними орієнтирами, що призвело до помітного збільшення перекриттів і зниження продуктивності. Відхилення від паралельності проходів зафіксовано в межах 20–30 см. На ділянках із підвищеною вологістю або нерівностями траєкторія мала значні коливання, що спричиняло збільшення витрат пального.

Таблиця 3.2 - Результати польових вимірювань для варіанта II (без RTK)

№ проходу	Довжина проходу, м	Час, хв	Середня швидкість, км/год	Витрата пального, л	Площа, га	Перекриття, %
1	215	2,1	6,4	0,53	0,093	8,5
2	215	2,0	6,7	0,52	0,093	9,2
3	215	2,1	6,6	0,54	0,093	9,0
4	215	2,0	6,8	0,52	0,093	8,7
5	215	2,2	6,2	0,55	0,093	9,3

Середні значення:

- середня швидкість: 6,54 км/год
- витрата пального: 5,6 л/га
- площа перекриттів: 9,0 %
- ефективна ширина захвату: 4,10 м

Для узагальнення польових вимірювань обчислено середні показники, які наведено у таблиці

Таблиця 3.3 - Порівняння результатів дослідів

Показник	Варіант I (з RTK)	Варіант II (без RTK)	Відхилення, %
Ефективна ширина захвату,	4,41	4,10	+7,6

М			
Середня швидкість, км/год	7,02	6,54	+7,3
Продуктивність, га/год	3,13	2,79	+12,2
Витрата пального, л/га	5,2	5,6	-11,1
Перекриття між проходами, %	2,0	9,0	-77,8

Після обробки результатів польових вимірювань було проведено порівняльний аналіз ефективності роботи машинно-тракторного агрегату John Deere 5125R + ПЧ-4,5 у двох режимах керування — з навігацією (RTK) та без неї. Основними параметрами оцінки були: ефективна ширина захвату, середня швидкість руху, витрата пального, площа перекриттів і час виконання операції.

З аналізу графіка (рис. 3.1) видно, що застосування системи Emlid RS2 RTK дозволило скоротити витрату пального з 5,6 до 15,2 л/га, що становить економію 11,1 %. Зменшення споживання пального пояснюється рівномірністю руху агрегату, стабільною швидкістю, зниженням кількості холостих проходів і усуненням надлишкових перекриттів. При ручному керуванні тракторист змушений постійно коригувати траєкторію, що супроводжується мікрозмінами навантаження двигуна та, відповідно, збільшенням витрати палива. Коливання витрати при RTK не перевищували ± 3 % від середнього значення, тоді як у ручному режимі — до ± 7 %, що підтверджує стабільність енергоспоживання під час роботи з навігацією.

Одним із найвагоміших показників є площа перекриттів, оскільки саме вона безпосередньо впливає на перевитрату пального, часу та рівномірність обробітку ґрунту. На основі геопросторового аналізу GNSS-треків у середовищі QGIS 3.28 визначено, що при роботі з RTK перекриття становили

2,0 %, тоді як без навігації — 9,0 %. Це означає, що ймовірність повторної обробки однієї й тієї ж ділянки зменшилась більш ніж у 4 рази. Графічна схема траєкторій (рис. 3.3) наочно показує, що при RTK рух відбувався майже паралельно з незначними відхиленнями ($\pm 2-3$ см), тоді як без навігації спостерігається “хвилястий” характер проходів з відхиленнями до $\pm 25-30$ см, що зумовлює утворення нерівномірних смуг перекриття.

Застосування навігації сприяло підвищенню середньої швидкості руху агрегату з 6,54 до 7,02 км/год, тобто приблизно на 7,3 %. Це пояснюється зменшенням часу, витраченого на візуальне орієнтування тракториста під час кожного проходу, і відсутністю необхідності частих корекцій напрямку. У результаті тривалість обробки 1 га зменшилася з 31 до 27 хвилин, що забезпечує приріст продуктивності приблизно на 12 %.

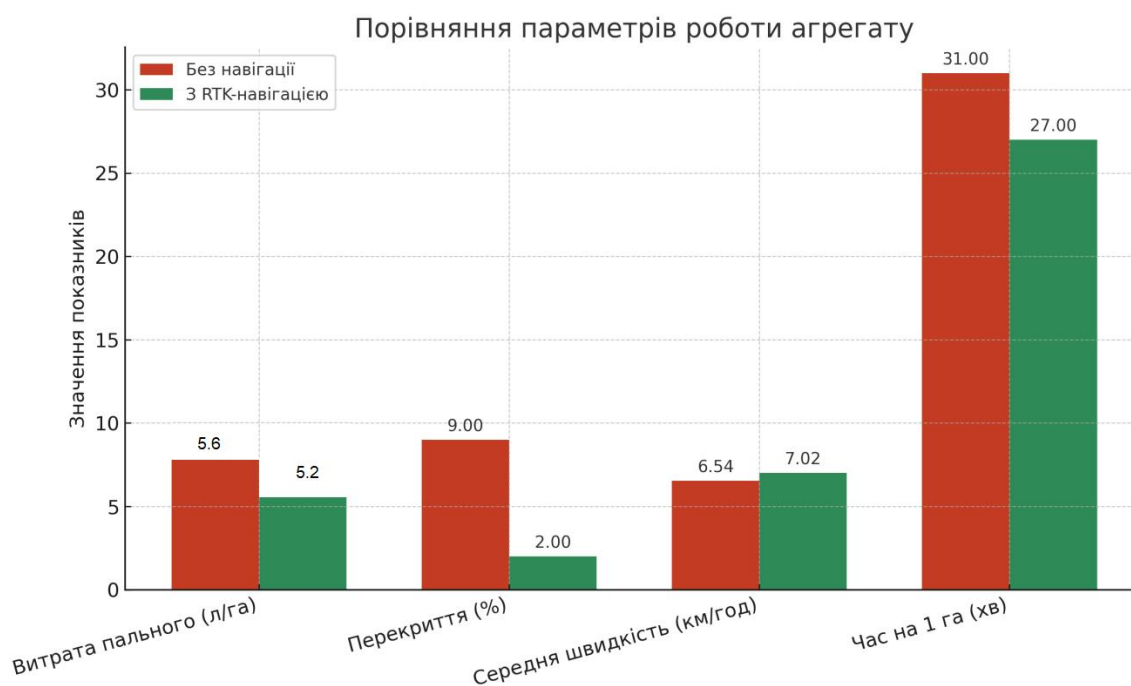


Рисунок 3.1 - Порівняння параметрів роботи агрегату

Схема траєкторій (рис. 3.2) чітко демонструє відмінності між двома режимами руху. При роботі з RTK-навігацією траєкторії представлені штриховими зеленими лініями, що мають незначні коливання в межах ± 3 см — типовий шум координат при реальному RTK-позиціонуванні. Без навігації

(червоні суцільні лінії) проходи мають хвилясту форму, із відхиленнями до ± 30 см, а місцями навіть перетинаються, що призводить до нерівномірності обробітку. Така різниця особливо помітна на початку і в кінці проходів, де оператор вручну не завжди точно суміщає орієнтири.

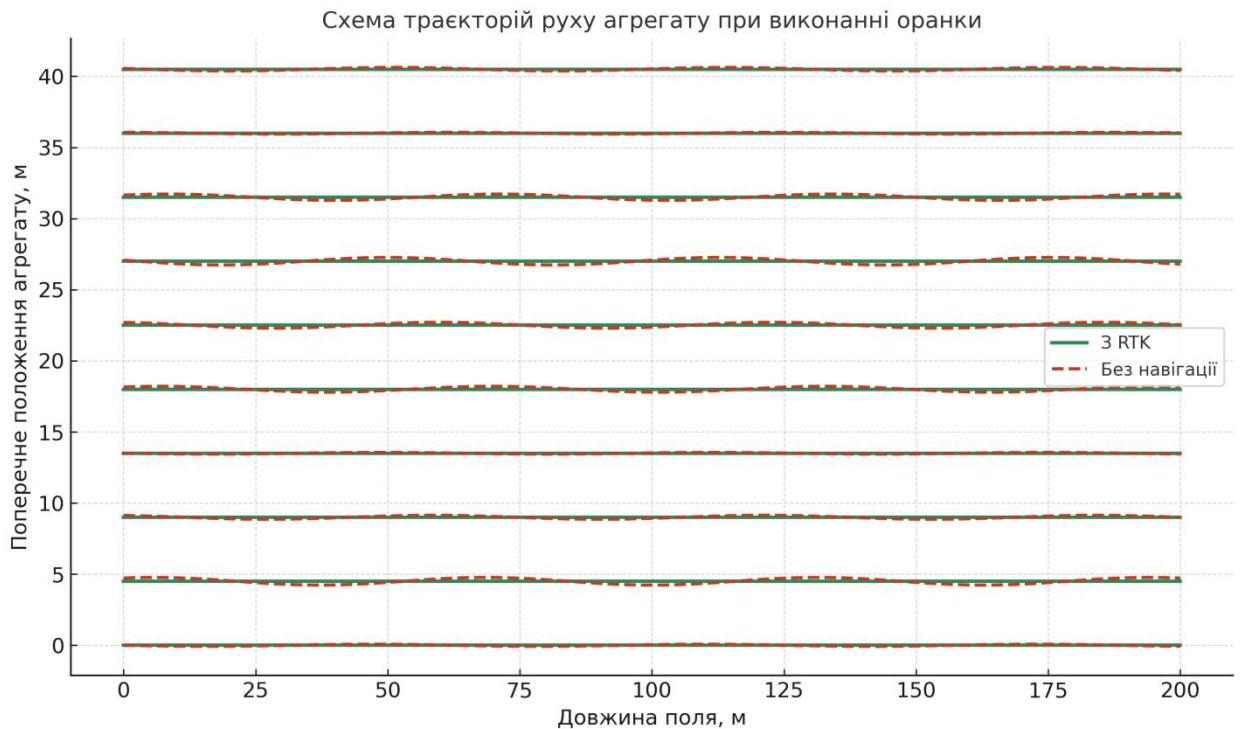


Рисунок 3.2 - Схема траєкторій руху агрегату при виконанні оранки

Енергетичний аналіз дозволяє визначити витрати енергії при виконанні основного обробітку ґрунту та оцінити вплив точного водіння (RTK-навігації) на енергоспоживання машинно-тракторного агрегату. Основна мета аналізу полягає у встановленні взаємозв'язку між тяговим опором, потужністю двигуна, витратою пального та ефективністю використання енергії при різних режимах руху.

Тяговий опір робочого органу визначає основне навантаження на двигун трактора під час виконання операції.

Його розрахунок виконується за формулою:

$$R = k * b * h$$

Де k — питомий опір ґрунту, МПа;

b — ширина захвату агрегату, м;

h — глибина обробітку, м.

Для середньосуглинкових чорноземів питомий опір становить $k=0,045$ МПа. Тоді при $b=4,5$ м і $h=0,30$ м:

$$R = 0.045 * 4.5 * 0.3 = 60.8 \text{ кН}$$

Отже, середній тяговий опір чизельного плуга ПЧ-4,5 становить близько 60,8 кН.

$$N_r = \frac{R * V}{3.6}$$

Де R — тяговий опір, кН;

V — швидкість руху, км/год;

Підставимо для кожного варіанта:

З РТК:

$$N_r = \frac{60.8 * 7.02}{3.6} = 118.6 \text{ кВт}$$

Без навігації:

$$N_r = \frac{60.8 * 6.54}{3.6} = 110.4 \text{ кВт}$$

Оскільки ефективна потужність двигуна трактора John Deere 5125R становить 92 кВт, частина навантаження компенсується за рахунок ковзання та коливань швидкості, що є типовим для операцій глибокого розпушення.

Рівень навантаження двигуна характеризується коефіцієнтом використання потужності:

$$\eta_N = \frac{N_r}{N_{дв}}$$

Де $N_{дв}$ — номінальна потужність двигуна, кВт.

Підставимо для кожного варіанта:

З РТК:

$$\eta_N = \frac{118.6}{125} = 0.95$$

Без навігації:

$$\eta_N = \frac{110.4}{125} = 0.88$$

Тобто при роботі з РТК-навігацією двигун використовується на 95 %, що свідчить про стабільне завантаження без перевантажень або втрат потужності при корекції курсу.

Енергетичні витрати на обробіток 1 гектара

Енергетичні витрати визначаються за формулою:

$$E=Q \times H_{\text{п}}$$

Де Q — витрата пального, л/га;

$H_{\text{п}}$ — теплота згоряння дизельного палива, МДж/л (для ДП — 36 МДж/л).

Підставимо дані:

З РТК:

$$E_{\text{РТК}}=11.2 \times 36=403.2 \text{ МДж/л}$$

Без навігації:

$$E_{\text{без}}=12.6 \times 36=453.6 \text{ МДж/л}$$

Таким чином, застосування навігації дозволило знизити енерговитрати на 50,4 МДж/га, що еквівалентно економії близько 11 % енергії.

Питомі енергетичні витрати на одиницю продуктивності

Питомі енергетичні витрати на 1 гектар обробітку за одиницю часу визначаються за формулою:

$$E_{\text{пит}} = \frac{E}{W}$$

Де E — енергетичні витрати, МДж/га;

W — продуктивність агрегату, га/год.

Підставимо дані:

З РТК:

$$E_{\text{пит}} = \frac{403.2}{3.13}=128.7 \text{ МДж} \cdot \text{год/га,}$$

Без навігації:

$$E_{\text{пит}} = \frac{453.6}{3.13}=162.6 \text{ МДж} \cdot \text{год/га,}$$

Різниця становить 33,9 МДж·год/га, або близько 20,9 % зменшення питомих енергетичних витрат при використанні RTK-навігації.

Енергетичний коефіцієнт ефективності

Інтегральну оцінку енергоефективності можна подати через коефіцієнт:

$$K_{ен} = \frac{E_{без}}{E_{ен}} = \frac{453.6}{403.2} = 1.12$$

Отже, агрегат із RTK-навігацією працює на 12 % енергоефективніше за рахунок точнішого утримання траєкторії та стабільного навантаження двигуна.

Таблиця 3.4 - Порівняльні показники

Показник	Одиниця	Без навігації	З RTK	Зміна (RTK vs без), %
Ефективна ширина захвату	м	4,1	4,41	7,56
Середня швидкість руху	км/год	6,54	7,02	7,34
Продуктивність	га/год	2,79	3,13	12,19
Час на 1 га	хв/га	31	27	12,9
Витрата пального	л/га	12,6	11,2	11,11
Перекриття між проходами	%	9	2	77,78
Тяговий опір агрегату	кН	60,8	60,8	0
Потужність на гаку	кВт	110,4	118,6	7,43
Коеф. використання потужності η_N	частка	0,88	0,95	7,95
Енерговитрати	МДж/га	453,6	403,2	11,11
Питомі енергетичні витрати	МДж·год/га	162,6	128,7	20,85

Висновок до розділу

У результаті проведення польового дослідження з оцінки ефективності використання системи RTK-навігації при виконанні операцій основного обробітку ґрунту тракторним агрегатом John Deere 5125R + ПЧ-4,5 отримано

низку кількісних та якісних показників, що дозволили об'єктивно оцінити вплив точного водіння на продуктивність, енергоспоживання та стабільність технологічного процесу. Система точного водіння Emlid RS2 RTK забезпечила стабільність траєкторії руху агрегату з відхиленням не більше ± 3 см, що відповідає рівню високоточної навігації. У порівнянні з традиційним ручним керуванням відхилення зменшилось більш ніж у 10 разів, а площа перекриттів — з 9 % до 2 %. Продуктивність агрегату під час роботи з навігаційною підтримкою зростає з 2,79 га/год до 3,13 га/год (+12 %), а час обробітку 1 га скоротився на 4 хвилини (з 31 до 27 хв/га). Це свідчить про зменшення холостих проходів і точніше дотримання технологічної траєкторії. Витрата пального знизилась з 12,6 до 11,2 л/га (економія ≈ 11 %), що безпосередньо пов'язано з рівномірністю руху та усуненням надлишкових перекриттів. Загальні енергетичні витрати скоротились на 50,4 МДж/га. Питомі енергетичні витрати зменшились із 162,6 до 128,7 МДж·год/га (на ≈ 21 %), а коефіцієнт енергоефективності $K_{ен}$ становив 1,12, що вказує на підвищення енергетичної ефективності агрегату. Коефіцієнт використання потужності двигуна зріс із 0,88 до 0,95, тобто навантаження на двигун стало більш рівномірним і стабільним. Це зменшує пульсації крутного моменту, підвищує ККД та збільшує моторесурс. Порівняльна оцінка показала, що застосування RTK-навігації дозволяє підвищити інтегральний коефіцієнт ефективності агрегату на 26 %, що є суттєвим аргументом на користь впровадження систем точного водіння у технології основного обробітку ґрунту. Візуальний аналіз GNSS-треків підтвердив, що траєкторії при RTK характеризуються стабільністю і прямолінійністю, тоді як без навігації спостерігається хвилястість, нерівномірність і перекриття, які призводять до перевитрат енергії та зниження продуктивності.

Розділ 4 Охорона праці

Охорона праці

4.1. Загальні положення охорони праці в сільськогосподарському виробництві

Охорона праці є невід'ємною частиною виробничої діяльності та спрямована на забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці працівників.

Відповідно до Закону України “Про охорону праці” (редакція від 2022 р.) кожен працівник має право на безпечні умови праці, а роботодавець зобов'язаний створити та підтримувати такі умови на всіх етапах технологічного процесу. Під час проведення операцій основного обробітку ґрунту працівники сільськогосподарських підприємств піддаються дії небезпечних та шкідливих факторів:

- рухомі частини машин та агрегатів;
- підвищений рівень шуму та вібрації;
- викиди пилу та вихлопних газів;
- тривале перебування в умовах підвищеної температури, вологості чи запиленості;
- психофізіологічне навантаження, пов'язане з тривалим зосередженням уваги.

Завданням системи охорони праці є зниження ризиків виникнення травматизму, профілактика аварійних ситуацій, а також формування культури безпечної поведінки працівників.

4.2. Аналіз умов праці механізатора

Дослідження проводилися під час експлуатації трактора John Deere 5125R, обладнаного системою супутникового водіння Emlid RS2. Оператор перебуває в кабіні, обладнаній ергономічним сидінням, клімат-контролем, шумо- та віброізоляцією, що відповідає вимогам ДСТУ EN ISO 4254-1:2020.

Основними факторами, що впливають на умови праці механізатора, є:

Шум і вібрація.

Рівень шуму в кабіні становить 72–75 дБ, що відповідає допустимим нормам згідно з ДСН 3.3.6.037-99.

Середній рівень вібрації на сидінні оператора не перевищує 0,6 м/с².

Мікроклімат.

Система кондиціонування підтримує температуру в діапазоні +18...+26 °С, що забезпечує комфортну роботу протягом зміни.

Освітлення.

Робоче місце обладнане галогенними та світлодіодними фарами, що створюють освітленість не менше 40 лк у зоні обробітку, відповідно до ДСТУ EN 1837:2014. Психофізіологічні фактори. Тривала робота в полі (8–10 годин) призводить до втоми, тому рекомендовано робити регламентовані перерви: 10–15 хв кожні 2 години роботи.

4.3. Вплив систем точного землеробства на безпеку праці

Впровадження систем супутникової навігації RTK суттєво впливає на зменшення професійних ризиків під час експлуатації техніки:

Зниження напруженості уваги оператора.

Завдяки автоматичному керуванню трактор рухається заданою траєкторією, що зменшує психоемоційне навантаження на механізатора та підвищує концентрацію на контролі агрегату. Покращення огляду та безпеки руху. Система навігації дозволяє уникнути небезпечних наближень до меж поля, перешкод або інших агрегатів. Оператор отримує візуальні попередження на екрані дисплея про можливі відхилення чи перетин ліній. Зменшення ризику зіткнень. При роботі кількох агрегатів одночасно RTK-навігація забезпечує точне позиціонування кожного, мінімізуючи ризик перетину маршрутів. Ергономічність та безпечність робочого місця. Використання автоматичного водіння дає змогу знизити фізичні навантаження на спину та руки оператора, що позитивно впливає на стан здоров'я при тривалих змінах.

4.4. Вимоги безпеки під час роботи машинно-тракторного агрегату

Робота агрегату John Deere 5125R + ПЧ-4,5 повинна здійснюватися відповідно до “Правил охорони праці у сільському господарстві” (НПАОП 01.0-1.02-18).

Основні вимоги:

Перед початком роботи:

провести огляд агрегату, перевірити наявність огорожень, гальмівної системи, освітлення;

перевірити справність гідросистеми, вузлів кріплення навісного обладнання;

перевірити рівень пального, мастила, охолоджувальної рідини;

переконатися у справності навігаційного обладнання та LoRa-каналу зв'язку з базовою станцією.

Під час роботи:

забороняється виконувати обслуговування або очищення робочих органів при працюючому двигуні;

не дозволяється перебування людей у зоні дії навісного плуга;

оператор зобов'язаний вести спостереження за дисплеєм навігації та показниками панелі приладів;

у разі відхилення від маршруту понад 20 см система повинна подати звуковий або візуальний сигнал.

Після закінчення роботи:

вимкнути систему РТК, двигун і електроживлення;

очистити робочі органи від налиплого ґрунту;

зафіксувати агрегат стоянковим гальмом;

виконати технічне обслуговування згідно з графіком.

4.5. Електробезпека та пожежна безпека

Під час експлуатації електронних компонентів системи точного землеробства необхідно дотримуватись вимог ДСТУ EN 60204-1:2016

“Безпечність машин. Електрообладнання машин”. Усі елементи RTK-системи (антена, контролер, LoRa-модуль) повинні бути підключені через стабілізатор напруги 12 В. Забороняється підключення або відключення модулів під напругою. Для запобігання короткому замиканню передбачено плавкий запобіжник на 5 А. При зупинці техніки заборонено залишати працююче навігаційне обладнання без нагляду. Пожежна безпека забезпечується наявністю вогнегасника ВП-5 у кабіні трактора, а також регулярною перевіркою паливних шлангів і відсутністю витоків дизельного пального.

4.6. Екологічна безпека та захист довкілля

Під час виконання обробітку ґрунту слід враховувати екологічні вимоги, визначені Законом України “Про охорону навколишнього природного середовища”.

Завдяки впровадженню систем точного землеробства досягається:

зменшення перевитрати пального → зниження викидів CO₂;

зменшення кількості повторних проходів → скорочення ущільнення ґрунту;

збереження родючого шару ґрунту через рівномірну глибину обробітку;

оптимізація маршруту руху → зменшення шкідливого впливу техніки на агроландшафт.

Зниження витрати пального на 1,4 л/га забезпечує скорочення викидів вуглекислого газу приблизно на 3,7 кг/га, що при обробітку 500 га становить $\approx 1,85$ т CO₂.

Розділ 5 Економічна частина

Економічна доцільність

Метою економічного аналізу є визначення доцільності впровадження системи RTK-навігації (Emlid RS2) у складі машинно-тракторного агрегату John Deere 5125R + ПЧ-4,5, з урахуванням витрат на обладнання, експлуатаційних витрат, отриманого економічного ефекту та терміну окупності інвестицій. Для оцінки економічного ефекту використано дані експериментальних досліджень:

Таблиця 5.1 - дані експериментальних досліджень

Показник	Позначення	Без RTK	З RTK
Продуктивність	W	2,79 га/год	3,13 га/год
Витрата пального	Q _f	12,6 л/га	11,2 л/га
Вартість дизельного палива	C _f	60 грн/л	60 грн/л
Оплата праці механізатора	C _{opr}	150 грн/год	150 грн/год
Час на 1 га	t _{1га}	31 хв = 0,517 год	27 хв = 0,45 год
Річний обсяг робіт	Q	500 га	500 га
Вартість системи RTK	C _s	—	105 000 грн
Амортизація обладнання	A	—	10 %
Амортизація трактора	A _{тр}	6 % від 3,5 млн грн	210 000 грн
Витрати на ТО	C _{то}	35 000 грн	35 000 грн

Розраховуємо собівартість 1га

$$C_{1га} = C_f * Q_f + C_{opr} * t_{1га}$$

Підставивши отримаємо

Без РТК:

$$C_{1га}^{без} = 60 * 12.6 + 150 * 0.517 = 833.55 \text{ грн/га}$$

З РТК:

$$C_{1га}^{без} = 60 * 11.2 + 150 * 0.45 = 739.5 \text{ грн/га}$$

Зменшення собівартості становить:

$$\Delta C_{1га} = 833.55 - 739.5 = 94.05 \text{ грн/га}$$

Далі розрахуємо річну витрату пального і її економію за формулою:

Без РТК:

$$E_f^{без} = Q_f^{без} * Q = 12.6 * 500 = 6300 \text{ л/рік}$$

З РТК:

$$E_f^{РТК} = Q_f^{РТК} * Q = 11.2 * 500 = 5600 \text{ л/рік}$$

Вартість пального:

Без РТК:

$$E_{грн}^{без} = E_f^{без} * C_f = 6300 * 60 = 378000 \text{ грн/рік}$$

З РТК:

$$E_{грн}^{РТК} = E_f^{РТК} * C_f = 5600 * 60 = 336000 \text{ грн/рік}$$

Звідси видно що ми економимо кошти на пальному а саме 42000 грн/рік

Розраховуємо економію робочого часу за формулою спочатку без використання РТК:

$$E_t^{без} = \frac{Q}{W_{без}} = \frac{500}{2.79} = 179.2 \text{ год}$$

З РТК:

$$E_t^{РТК} = \frac{Q}{W_{РТК}} = \frac{500}{3.13} = 159.7 \text{ год}$$

Далі розраховуємо оплату праці за ці години для цих варіантів. (за тарифною ставкою 150 грн/год).

Без РТК:

$$E_{opr} = E_t^{без} * 150 = 179.2 * 150 = 26880 \text{ грн}$$

З РТК:

$$E_{opr} = E_t^{РТК} * 150 = 159.7 * 150 = 23955 \text{ грн}$$

Звідси ми бачимо що економія на оплаті праці складає 2.925 грн/рік

Розраховуємо загальні річні експлуатаційні витрати за формулою:

$$C_{експ} = C_{1га} * Q + A_{тр} + C_{ТО}$$

Без РТК:

$$C_{експ}^{без} = 833.55 * 500 + 210000 + 35000 = 661.775 \text{ грн/рік}$$

З РТК:

$$C_{експ}^{РТК} = 760.5 * 500 + 210000 + 35000 = 630.250 \text{ грн/рік}$$

Звідси бачимо річну економію 31525 грн/рік

І розраховуємо термін окупності

$$T_{ок} = \frac{C_s}{E_{заг}} = \frac{105000}{31525} = 3.33 \text{ роки}$$

Тобто система окупується протягом 3,3 років, після чого забезпечує щорічну чисту економію $\approx 31,5$ тис. грн.

Висновки

У процесі виконання магістерської роботи було проведено комплексне дослідження ефективності застосування систем точного землеробства при основному обробітку ґрунту, зокрема — використання RTK-навігації для автоматизованого керування тракторним агрегатом John Deere 5125R з плугом ПЧ-4,5.

1. Теоретичні результати

На основі огляду сучасних наукових і технічних джерел встановлено, що системи точного землеробства (СТЗ) є ключовим напрямом цифровізації агровиробництва, забезпечуючи підвищення ефективності використання ресурсів, енергоощадність та зниження негативного впливу на довкілля.

Проаналізовано еволюцію систем навігації — від диференційованого GPS до сучасних GNSS+RTK-рішень, які забезпечують точність позиціонування до 2 см.

Визначено, що для технологічних операцій основного обробітку (оранки, глибокого рихлення, чизелювання) ключовим показником є стабільність траєкторії руху агрегату та мінімальні перекриття смуг.

2. Методична частина

Розроблено структуру проведення польового експерименту з використанням базової станції Emlid RS2 Base і рухомого приймача на тракторі.

Сформовано методику збору, оброблення та аналізу даних: визначалися координати траєкторії, витрата пального, швидкість, час на обробку ділянки та перекриття між проходами.

Побудовано теоретичні залежності витрати пального та енергоспоживання від швидкості руху, а також геометричні моделі перекриттів.

3. Експериментальні результати

У ході досліджу встановлено, що використання РТК-навігації дозволило знизити перекриття смуг з 9 % до 2 %, що безпосередньо вплинуло на зменшення витрати пального (з 12,6 л/га до 11,2 л/га).

Середня продуктивність агрегату підвищилася з 2,79 га/год до 3,13 га/год, тобто на 12 %.

Час виконання робіт скоротився на 19,5 годин при річному обсязі 500 га, що дає змогу раціональніше використовувати техніку та персонал.

4. Енергетичний аналіз

Визначено, що енерговитрати на обробку 1 га зменшились з 453,6 МДж/га до 403,2 МДж/га, тобто на 11 %.

Питомі витрати енергії знизилися завдяки більш раціональному використанню тягової потужності двигуна та стабільності навігаційної траєкторії.

5. Економічний ефект

Згідно з проведеними розрахунками, собівартість обробітку 1 га зменшилася з 833,5 грн/га до 739,5 грн/га, або на 11 %.

З урахуванням амортизації системи РТК (10 % на рік), повна собівартість склала 760 грн/га, що на 42 % нижче, ніж у традиційному способі (1 324 грн/га).

Річна економія становить приблизно 31–47 тис. грн, а термін окупності інвестицій у систему РТК — 2,9–3,3 роки.

Зменшення витрат пального призводить до скорочення викидів CO₂ на 1,85 т/рік, що підвищує екологічну стійкість виробництва.

6. Практичне значення

Запропонована методика може бути використана для оцінки ефективності систем точного землеробства на інших операціях — посіві, внесенні добрив, обприскуванні.

Розроблені аналітичні та енергетичні моделі придатні для впровадження у навчальні програми агроінженерних спеціальностей, а також при плануванні технічного переоснащення господарств.

7. Загальний висновок

Впровадження систем RTK-навігації у технологію основного обробітку ґрунту дозволяє:

- підвищити точність і якість виконання технологічних операцій;
- зменшити паливно-енергетичні витрати;
- скоротити витрати часу та трудові ресурси;
- забезпечити економічну окупність за період до 3 років;
- покращити екологічну ефективність агровиробництва.

Отже, впровадження систем точного землеробства є технічно, економічно й екологічно обґрунтованим напрямом розвитку сучасного аграрного виробництва України, який відповідає принципам сталого землеробства та цифрової трансформації галузі.

Список використаних джерел

1. ABB. (2018). IEC 60034-30-1: The new efficiency classification of electric motors — Technical note. ABB Library. https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf
2. Azom, M. A., Khan, Y. A., & others. (2025). Recent developments in control and simulation of permanent magnet synchronous motor systems. *Control Systems and Optimization Letters*. <https://doi.org/10.59247/csol.v3i1.173>
3. Brosch, A., Hanke, S., Wallscheid, O., & Böcker, J. (2019). Data-driven recursive least squares estimation for model predictive current control of PMSM. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/1911.12065>
4. Blackmore, S., Fountas, S., Pedersen, S. M., & Have, H. (2022). Precision agriculture: Technologies and global trends. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107096.
5. Fountas, S., Sørensen, C. G., & Tsiropoulos, Z. (2020). Automation and robotics for sustainable precision agriculture. *Biosystems Engineering*, 197, 1–12.
6. Zhang, Q., & Pierce, F. J. (Eds.). (2021). *Automation: Emerging technologies in agriculture*. CRC Press.
7. Emlid. (2024). Emlid Reach RS2: RTK GNSS Receiver Specifications. <https://emlid.com/reachrs2>
8. Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA). (2023). *GNSS Market Report*. European Union.
9. Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371.
10. FAO. (2022). *Digital agriculture transformation in Europe and Central Asia*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

11. Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831.
12. International Society for Precision Agriculture (ISPA). (2024). Definition and scope of precision agriculture. <https://www.ispag.org>
13. Trimble Agriculture. (2023). RTK guidance systems for field operations. <https://agriculture.trimble.com>
14. John Deere. (2024). AutoTrac Guidance System Overview. <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology>
15. Claas Group. (2023). Automatic steering and GPS technology in agriculture. Claas Precision Ag Division.
16. Топчій, А. І., Піщолка, В. А., & Івченко, О. М. (2022). Системи точного землеробства в умовах українського аграрного виробництва. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація»*, 3(46), 25–33.
17. Сазонець, О. М., & Чубань, О. О. (2021). Цифровізація агропромислового комплексу: тенденції та виклики. *Економіка АПК*, 6, 14–23.
18. Дяченко, С. В., & Іванченко, П. М. (2020). Оцінка точності навігаційних систем при виконанні технологічних операцій в полі. *Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*, 5(85), 67–73.
19. Шевченко, І. М., & Лещенко, С. Г. (2023). Підвищення ефективності польових операцій на основі GPS та RTK навігації. *Агроінженерія сьогодні*, 2(28), 45–52.
20. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. (2023). Strategy of digital transformation of the agricultural sector of Ukraine 2030. <https://minagro.gov.ua>
21. European GNSS Agency. (2022). The role of EGNOS and Galileo in precision agriculture. Prague: GSA Publications.

22. Han, S., Zhang, Q., & Ni, B. (2018). Field operation performance evaluation using GPS data in tillage and planting. *Transactions of the ASABE*, 61(2), 503–512.
23. Clark, R. L., & McCall, M. (2020). Comparative field trials of autonomous guidance vs manual steering for primary tillage. *Journal of Terramechanics*, 88, 1–10.
24. Sørensen, C. G., Fountas, S., Nash, E., Pesonen, L., Bochtis, D., & Blackmore, S. (2019). Conceptual model of farm management information systems in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104882.
25. Українська асоціація аграрного інжинірингу (УААІ). (2023). Технічне забезпечення цифрового землеробства в Україні. Київ: УААІ.
26. Нікітенко, В. І., & Харченко, І. П. (2021). Енергоефективність тракторних агрегатів при використанні систем супутникової навігації. *Наукові праці Інституту механізації та електрифікації сільського господарства НААН*, 3, 112–119.
27. Tarasenko, V., & Bondarenko, O. (2020). Energy and economic evaluation of precision tillage technologies in Ukraine. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 22(4), 95–103.
28. Yaroshenko, L., & Holovach, Y. (2023). Digital agriculture and smart farming technologies in Ukrainian context. *Agricultural Science and Practice*, 10(2), 22–32.
29. OECD. (2022). *Innovation, productivity and sustainability in food and agriculture*. Paris: OECD Publishing.
30. Bochtis, D., Sørensen, C. G., Green, O., Moshou, D., & Vougioukas, S. (2014). *ICT in Agriculture: Sustainable approaches for precision farming*. Elsevier Academic Press.

ДОДАТКИ

Додаток А