

## АНОТАЦІЯ

**Гузенко Владислав Андрійович.** «Вдосконалення алгоритмів аналізу та оптимізації логістики комбайнів, зернових візків і вантажівок під час збирання зернових культур у системах точного землеробства». Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за спеціальністю 208 «Агроінженерія», освітня програма «Системи точного землеробства», Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

У роботі проведено комплексне дослідження можливостей підвищення ефективності логістичних процесів під час збирання зернових за рахунок удосконалення алгоритмів аналізу GPS-даних та створення оптимізованих моделей взаємодії між комбайнами, зерновими візками та вантажними автомобілями. Проаналізовано сучасний стан застосування систем точного землеробства та інтелектуальних засобів моніторингу техніки, визначено ключові проблеми у класифікації робочих станів машин — особливо в умовах високої динамічності процесів та змінних польових умов. Розроблено нову методику побудови полігонів покриття, що дозволяє більш точно визначати зони роботи техніки та формувати набір ознак для покращеної класифікації станів. Оновлений алгоритм класифікації забезпечує точність 88–94 %, значно перевищуючи базові методи. Це дозволяє зменшити простой техніки, мінімізувати перекриття та оптимізувати маршрути руху. Експериментальні дослідження проведені на основі реальних GPS-логів, отриманих під час збирання врожаю в господарствах Сумської області. Отримані результати підтверджують значний потенціал алгоритмічної оптимізації в системах точного землеробства. Запропоновані рішення дають змогу підвищити ефективність використання технічних ресурсів, скоротити час циклу «комбайн–візок–вантажівка», знизити витрати пального та втрати зерна, а також забезпечити більш надійне планування агротехнологічних операцій. Розроблена методика може бути інтегрована в існуючі системи моніторингу техніки, у тому числі в мобільні додатки та хмарні аналітичні платформи. Результати дослідження можуть бути використані агропідприємствами, розробниками програмного забезпечення для точного землеробства та науковими установами. Робота становить цінність як приклад впровадження інтелектуальних алгоритмів у реальні агротехнологічні процеси.

**Ключові слова:** точне землеробство, GPS-логістика, оптимізація маршрутів, алгоритми класифікації, комбайн, зерновий візок, логістичні процеси.

## ABSTRACT

**Huzenko Vladyslav Andriiovych.** “Improvement of Algorithms for the Analysis and Optimization of Logistics of Combines, Grain Carts and Trucks during Grain Harvesting in Precision Farming Systems.” Master’s thesis for the degree of Master in Agroengineering, educational program “Precision Farming Systems”, Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

This thesis presents a comprehensive study on enhancing the efficiency of harvesting logistics by improving algorithms for analyzing GPS data collected from combines, grain carts and transport trucks. The work explores the current state of precision agriculture technologies and identifies key limitations of existing approaches to machinery state classification, particularly under dynamic field conditions and variable operational scenarios. A new methodology for constructing coverage polygons was developed, enabling more precise detection of operational zones and generating informative features for machine state classification. The improved algorithm achieves an accuracy rate between 88–94%, significantly outperforming conventional methods. Such improvements directly influence the reduction of machinery idle time, minimization of overlap, and optimization of the movement patterns of harvesting units. The research is based on real GPS datasets gathered from agricultural machinery during harvesting operations in the Sumy region. Detailed experiments demonstrate that the enhanced classification and routing algorithms enable more efficient coordination between combines, grain carts and trucks, reducing waiting times and improving overall workflow synchronization. The proposed solution supports informed decision-making, contributing to higher productivity, reduced fuel consumption and minimized grain losses. The developed methodology can be integrated into modern monitoring systems, mobile applications and cloud-based analytical platforms. It holds practical value for agricultural enterprises seeking to optimize their technological processes, as well as for software developers in precision agriculture and agricultural engineering researchers. The study demonstrates the benefits of incorporating intelligent algorithms into real-world agricultural logistics, improving the sustainability and economic performance of field operations.

**Keywords:** precision farming, GPS logistics, machine state classification, grain harvesting, route optimization, intelligent decision support.

## **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b>	<b>5</b>
<b>РОЗДІЛ 1. Дані про GPS обладнання, мета та об'єкт дослідження</b>	<b>6</b>
1.1 Аналіз літературних джерел	6
1.2 Шляхи підвищення точності висіву насіння гідросівалками	9
1.3 Характеристика об'єкту дослідження	12
<b>РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ КАРТИ ПОКРИТТЯ ПОЛІГОНІВ</b>	<b>16</b>
2.1 Стадія перша: створення полігону	16
2.2 Стадія друга: Маркування перекриття полігонів	19
2.3 Стадія третя: Додавання мітки полігону до набору даних Truth	20
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ</b>	<b>23</b>
3.1 Порівняння алгоритмів та результати валідації	23
3.2 Загальні результати за обраним методом	40
3.3 Висновки за розділом та пропозиції для майбутніх досліджень	42
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ</b>	<b>44</b>
<b>РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>48</b>
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>51</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>52</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	<b>55</b>

## ВСТУП

Сучасне сільське господарство перебуває на етапі активної трансформації, що зумовлена необхідністю підвищення ефективності виробництва, раціонального використання ресурсів та зменшення негативного впливу на довкілля. Одним із ключових напрямів розвитку аграрного сектору є впровадження систем точного землеробства, які базуються на використанні новітніх цифрових технологій, засобів автоматизації, геоінформаційних систем та спеціалізованого обладнання. Завдяки цим інструментам агровиробники отримують можливість не лише оптимізувати технологічні процеси, а й суттєво підвищити економічну ефективність господарювання.

Особливе значення точне землеробство має під час проведення операцій зі збирання зернових культур. Цей етап виробничого циклу є надзвичайно відповідальним, адже від рівня організації збирання врожаю залежить кінцевий економічний результат, збереження кількості та якості продукції. Використання сучасних систем моніторингу, датчиків врожайності, GPS-навігації та автоматизованих систем управління дає змогу мінімізувати втрати зерна, забезпечити раціональне завантаження техніки, а також формувати достовірні карти врожайності для подальшого аналізу та прийняття управлінських рішень.

В умовах сьогодення впровадження технологій точного землеробства є особливо актуальним для України, яка залишається одним із провідних експортерів зернових культур у світі. Повномасштабна війна, економічні виклики та зростаюча конкуренція на світових ринках вимагають від аграрних підприємств максимально ефективного використання кожного гектара орних земель. Раціональне застосування ресурсів – пального, часу, техніки – стає визначальним фактором конкурентоспроможності аграрного бізнесу.

## РОЗДІЛ 1

### Дані про GPS обладнання, мета та об'єкт дослідження

#### 1.1 Загальна інформація про GPS обладнання

З кожним роком прогнозована чисельність населення до 2050 року зростає, і хто є основою забезпечення того, щоб потреби в їжі та воді були задоволені для кожної людини? Фермери. Годувати світ – нелегке завдання, і разом із цим завданням виникають змінні, які не є стабільними. Ці змінні можуть змінюватися миттєво, що впливатиме на виробничий цикл. Як молодий фермер, який виріс на фермі, я можу сказати, що старий традиційний спосіб зазвичай залишається основою ведення господарства, оскільки він відомий і ефективний, особливо тоді, коли прибуток перевищує витрати. Але що, якщо можна було б зробити більше за наявності відповідної інформації?

Говорячи про робочі дні фермерів, не можна не згадати, що вони завжди мають бути готовими адаптуватися до цих змінних факторів, які коливаються від нестачі персоналу до похибок у прогнозі погоди, коли доводиться мати справу з дощем. Для фермерів це означає взяти на себе відповідальність за забезпечення максимально ефективного та результативного функціонування своєї діяльності для задоволення потреб населення. Для цих фермерів їхнє виробництво є засобом існування, адже воно повинно забезпечити обсяги, достатні для досягнення необхідних показників з метою нагодувати світ. Тому вони повинні планувати роботу ефективно й результативно в межах обмеженої кількості днів.

Прийняття рішень для фермерів полягає у доступі до життєво важливої інформації, яка охоплює продуктивність машин, погодні умови та врожайність із поля до поля. Фермери використовують логістичні технології для максимізації своєї діяльності та пошуку способів досягнення піку ефективності під час щорічної ротації земель.

Оптимізація часу роботи на полі є критичною, але фермери не завжди мають доступ до знань про те, як або з чого почати. Саме тому технології

відіграють настільки важливу роль і використовуються у сучасному виробництві. Вони надали фермерам можливість робити більше навіть за умов обмеженого часу та кількості робочих днів.

Відомо, що інформацію не завжди легко отримати, але навіть отримавши її, фермеру непросто її зрозуміти, що призводить до втрат часу та грошей. На відміну від інших професій, фермери мають обмежену кількість робочих днів через погодні умови, стан обладнання та робочу силу, що може вплинути на перебіг сезону збирання врожаю. У зв'язку з цим фермери вважають абсолютно необхідним знати цикл комерційної експлуатації культур, зокрема строки висаджування та збирання, аби уникнути втрат врожайності.

Затримка висаджування може не зашкодити фермеру до двох тижнів, але після перевищення цього терміну можна спостерігати різке зниження врожайності під час збору. Це підтверджує важливість оптимального використання наданого часу для збирання врожаю. Оскільки час є надзвичайно цінним ресурсом, для його ефективного використання необхідно максимально залучати наявні машини та робочу силу.

Для обробки великих земельних масивів, таких як у «кукурудзяному поясі», де вирощуються кілька культур, фермери покладаються на додаткову робочу силу та великогабаритну техніку, щоб кожна година дня була використана ефективно та результативно (insert sources). Дослідження показали, що це проблема не лише для України, але й для інших країн, де також не вистачає працівників на полях, оскільки вони переходять до роботи на заводах і в торговельних закладах.

Щоб компенсувати цю нестачу, фермери шукають ресурси й технології. Вони звертаються до більших і сучасніших машин для максимізації діяльності в полі, однак не обговорюється з фермерами чи менеджерами господарств, яке обладнання є найефективнішим та які маршрути мають бути встановлені.

Керівники фермерських господарств змушені приймати рішення безпосередньо в полі щодо того, що найбільш ефективно та результативно забезпечить виконання роботи, чи то вибір машини, яка швидко перемістить зерно з поля, додаткового зернового воза чи зернового. За допомогою інструментів оптимізації фермери шукають методи для вдосконалення прийняття рішень щодо діяльності в полі з метою ефективного використання сільськогосподарських агрегатів. Викликом для фермерів є оптимізація операцій шляхом придбання новітніх і найбільших машин для максимізації переміщень у полі. Ця операція зазвичай складається щонайменше з двох комбайнів, одного зернового воза та двох зерновозів для транспортування до та з полів на елеватори й у сховища. Навіть маючи потужність машин для мінімізації часу та витрат, менеджери повинні враховувати доступність робочої сили, оскільки без неї рівень виробництва може знизитися. За допомогою системи глобального позиціонування (GPS) збирання комбайном може підвищити ефективність і сталість процесу збирання шляхом відстеження діяльності, розпізнавання шаблонів і попереднього планування переміщення комбайна під час його використання в полі.

Досі технологічні компанії, дослідники та фермери застосовують логістичне відстеження та обладнання для оптимізації процесу збирання врожаю. Нижче наведено кілька способів, якими це здійснюється.

**Телематичні пристрої:** ці пристрої встановлюються на тракторах та інших транспортних засобах для збору й передавання даних через стільникові мережі. Вони можуть надавати інформацію в режимі реального часу про місцезнаходження транспортного засобу, швидкість, витрати палива та інші показники. Прикладами є пристрій Geotab GO та платформа Fleetmatics REVEAL.

**GPS-приймачі:** ці пристрої отримують сигнали від супутників GPS і використовують триангуляцію для обчислення місцезнаходження трактора. Вони

можуть бути автономними або інтегрованими в інші системи, такі як точне землеробство чи платформи управління автопарком.

**Мобільні додатки:** деякі виробники тракторів пропонують мобільні додатки, які можна використовувати для відстеження тракторів та іншого сільськогосподарського обладнання. Ці додатки можуть надавати дані про місцезнаходження в реальному часі, попередження про технічне обслуговування та іншу корисну інформацію.

**Бездротові сенсори:** ці сенсори можуть бути прикріплені до різних частин трактора для моніторингу таких показників, як тиск у шинах, температура двигуна та інші параметри. Вони можуть надавати цінні дані для технічного обслуговування та відстеження продуктивності.

**Бортові дисплеї:** деякі трактори оснащуються дисплеями в кабіні, які показують дані GPS-відстеження разом з іншою інформацією, такою як погодні умови, дані про культури та межі поля.

## 1.2 Аналіз літературних джерел

Дослідники виконали численні роботи для створення основи реалізації цієї діяльності з метою подальшого вдосконалення [1, 2]. Так, дослідники створили систему GPS-відстеження з тракторами на «розумній фермі», використовуючи мережу ZigBee Multi-hop. Протягом року вони змогли збирати дані в режимі реального часу, що відображали положення трактора разом із додатковою інформацією. Це дозволило продемонструвати відстеження руху трактора в полі в режимі реального часу, яке могло відтворюватися за допомогою нейронної мережі. Встановивши це, метою стало застосування даного підходу у процесі збирання врожаю шляхом ідентифікації станів і подальшого введення їх у нейронну мережу для відтворення аналогічної діяльності в реальному часі.

Дослідники [3] змогли створити та впровадити алгоритм для використання комерційних мобільних пристроїв для збору даних GPS і порівняння їх із

нейронною мережею для маркування та точного визначення станів машини на основі роботи на кожному полі. Його робота була досліджена та відіграла велику роль у розумінні функціональності для побудови основи алгоритму, який використовується сьогодні.

Хоча оцінка станів, що базується лише на GPS, не є поширеною у сфері збирання зернових, вона була застосована в інших галузях, що підтверджує можливість її реалізації. Так, дослідники [4,5] змогли змодельовати елемент циклу буксування (Machine productivity) для лісозаготівлі, використовуючи лише GPS, але не зміг визначити точність через відсутність еталонних даних для порівняння. Це було здійснено у сфері, де такого раніше не робили, але показало, наскільки важливою є інформація зі змінних GPS, а також те, як її можна використовувати, коли стан машини зрозумілий.

Вчені [6,7] використали алгоритми машинного навчання та дані сенсорів для виявлення активності машин у будівельному середовищі. Так вдалося визначити, який метод алгоритмів працює найкраще для точного ідентифікування діяльності, але він не згадав, чи було проведено порівняння з набором даних, у якому всі стани були правильно позначені до ідентифікації. Його відкриття демонструє створення моста до майбутніх досліджень, які необхідно провести. Огляд його досліджень показав елементи, які необхідно додати або вдосконалити, щоб машинне навчання могло бути адаптоване в створений алгоритм.

Для того щоб визначити ефективність роботи в полі між комбайном і зерновим возом, дослідники також використали GPS у техніці [8]. Вони також змогли визначити, скільки часу кожен комбайн перебував у кожному стані, і продемонструвати тривалість кожної події. Однак не було проведено перевірки точності маркування станів або врахування розвантаження в кінці поля чи положення жатки під час розвантаження, щоб забезпечити правильність підрахунку.

Дослідники у своїй роботі [9] показали, що порівняння значень часу GPS демонструє: схеми збирання, коли регулюється лише час поворотів, можуть підвищити ефективність роботи в полі та ефективність збирання, але ці дані та процес базувалися виключно на припущенні щодо того, коли кожен стан мав місце.

За наявності великої кількості можливостей використання GPS, розпочав дослідження того, наскільки добре працюють системи GPS у смартфонах для практичного застосування. У дослідницькій дискусії [10] розглядається використання смартфонів для відстеження машин разом із GPS та алгоритмами для збору даних. Аналіз показує, наскільки успішним було це порівняно з іншими ресурсами, що використовують GPS. Це демонструє, наскільки багато інформації можна отримати навіть із найменших GPS-приймачів і наскільки ефективно їх можна застосовувати.

Фермери перебувають у пошуку інструментів оптимізації, які враховують їхні машини, робочу силу, час і витрати, щоб приймати більш обґрунтовані рішення до, під час і після роботи. У багатьох роботах було розглянуто та вдосконалено розуміння інструментів оптимізації і показано, що створення й деталізація цих методів дозволяють фермерам повною мірою використовувати всі засоби у виробництві. Проте приділялося мало уваги точності оцінки станів через видимість контрольних наборів даних. У статті [11] було зосереджено увагу на створенні алгоритму, що використовує лише GPS-точки для визначення робочого стану машин, задіяних у збиранні врожаю. Алгоритм показав точність до 96%, але також передбачав можливість того, що машини взагалі не перебувають у жодному стані. Саме це і стало основою алгоритму, який потребує подальшого розвитку. Алгоритм позначав будь-який рух по полю як збирання, якщо машина не перебувала поряд з іншим транспортним засобом, що працював. Метою є покращення маркування цих станів і розширення використання GPS-точок.

Дослідження вже проведених робіт не лише у сфері збирання врожаю щодо маркування станів діяльності, а й в інших галузях світу, де використовується GPS, формує можливість реалізації широкого спектру завдань, що допоможуть фермерам стати більш ефективними та результативними.

### **1.3 Характеристика об'єкту дослідження**

Дані про місцезнаходження у часових рядах із систем збирання зерна є легко доступними завдяки широкій інтеграції GPS у сільськогосподарське обладнання, і навіть техніка без вбудованих GPS може використовувати смартфони для збору даних про місцезнаходження. Можливість прогнозування робочих станів лише за даними про місцезнаходження у часових рядах має потенціал допомогти виявляти «вузькі місця» у системі, які негативно впливають на ефективність збирання врожаю при мінімальних витратах на збір даних і фінансових витратах.

Метою цього дослідження було створення алгоритму, здатного правильно прогнозувати робочий стан техніки, що використовується у системі збирання зерна в умовах Північно-Східного Лісостепу України, використовуючи лише дані про місцезнаходження у часових рядах.

Для досягнення цієї мети були визначені такі завдання:

1. Створити контрольний набір даних для порівняння результатів алгоритму.
2. Визначити робочі стани машин.
3. Розробити алгоритм, здатний кількісно оцінювати стани машин на основі даних часових рядів.
4. Перевірити точність алгоритму в різних сценаріях.

Збір даних для визначення контрольного набору було здійснено на двох фермах у Сумській області під час збору врожаю зернових у 2024 році.

Налаштування машин кожного оператора було унікальним для їхньої операції збору врожаю, щоб рухатися по полю ефективно й результативно.

Кожна операція використовувала апаратне забезпечення для збору даних, щоб зберігати й отримувати часові ряди даних про місцезнаходження. Апаратне забезпечення складалося з GPS-логерів Columbus V-990 Mark II для техніки, яка не була обладнана CAN-шиною, та логерів Kvaser Memorator Pro 2xHS для машин, обладнаних CAN-шиною. Логери Kvaser жилися безпосередньо від CAN-порту, який автоматично визначав активність у шині та записував дані. Дані зберігалися на SD-картці у власному форматі Kvaser, а потім декодувалися та зберігалися у файлі CSV. Декодовані дані включали GPS-позицію й час, а також інші специфічні для машини параметри. Висока точність GPS-часу дозволяла синхронізувати дані між машинами. Завдяки цій системі можна було легко визначити такі параметри роботи комбайна, як швидкість коліс, стан шнека та GPS із високою точністю. Те ж саме стосувалося зернового воза, де фіксувалися оберти ВВП, напрямок і GPS-локація.

Логер Columbus не живився безпосередньо від техніки, а використовував micro-USB батарею для резервного живлення, щоб збирати GPS-дані безпосередньо у файл CSV. Для машин із логерами Columbus запис розпочинався й зберігався на основі функції виявлення руху та зупинявся, коли машина переходила в режим очікування. Оскільки для роботи логера не потрібна була активація оператором, це допомагало зменшити надмірність зафіксованих GPS-точок. Це було корисним для зернових вантажівок, які довго простоювали на краю поля. Оскільки зернові вантажівки не були обладнані CAN-сигналами, для транспортування та ідентифікації місцезнаходження у статусі техніки було встановлено логер Columbus V990.



Рисунок 1.1 - зліва зображений логер Columbus V990, справа — Kvaser Memorator Pro 2xHS GPS Logger.

Використовуючи раніше зібрані та оброблені дані сезону збору врожаю 2024 року з двох місцевих ферм, зібрані дані були використані для створення алгоритму відстеження логістики [12]. Ця робота використовувала оригінальний алгоритм як орієнтир для створення оновленої версії, яка краще визначала стани машин, використовуючи лише GPS-дані з додаванням більшої кількості станів, аналізу даних і порогових значень. Варто зазначити, що в деяких полях одночасно використовувалися кілька комбайнів, а в інших — ні. Комбайни були обладнані різними напрямками руху для кожної операції збору врожаю, щоб забезпечити ефективність процесу. S660 був єдиним комбайном, що використовувався для збору кукурудзи, і був оснащений восьмирядною жаткою завширшки 6,096 м. Для збору сої використовували як S660 із жаткою завширшки 9,14 м, так і S670 із жаткою завширшки 6,10 м. Обидва комбайни, які використовувалися в цій операції, мали зернові бункери об'ємом 10,53 м<sup>3</sup> зі шнеками, здатними розвантажувати 0,134 м<sup>3</sup>/с. Варто зазначити, що зерновий віз ніколи не розвантажувався на повній потужності. Його місткість становила 35,24 м<sup>3</sup> із швидкістю розвантаження шнека 0,29 м<sup>3</sup>. Комбайн S760 використовував ті самі розміри, що й S670.

Усі використані машини були обладнані реєстраційним обладнанням, як зазначалося раніше і показано.

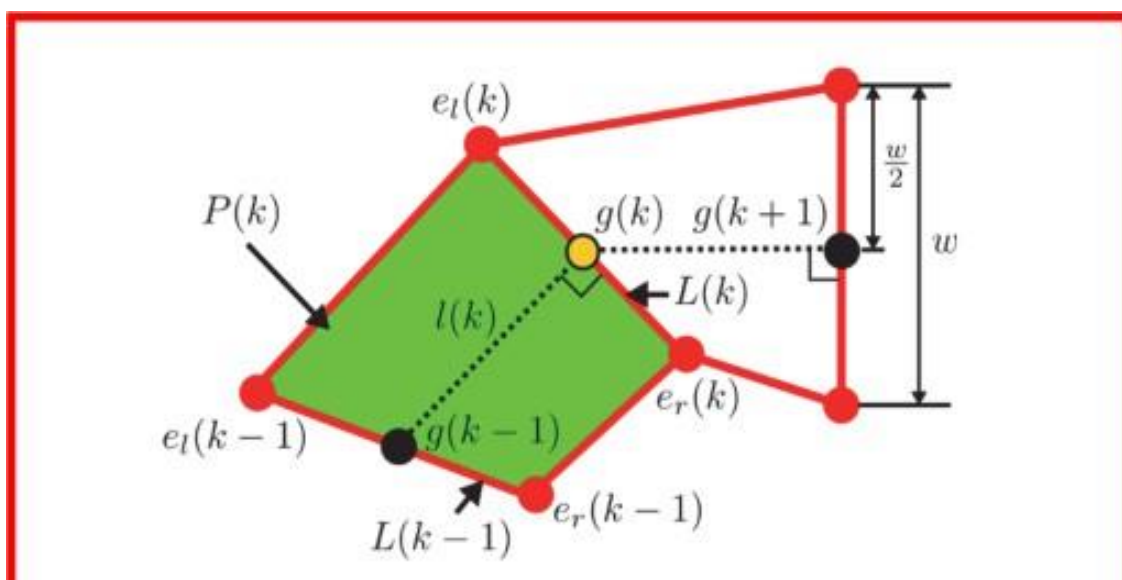
## РОЗДІЛ 2

### СТВОРЕННЯ КАРТИ ПОКРИТТЯ ПОЛІГОНІВ

Щоб краще адаптувати алгоритм, використовуючи зібрані дані, за допомогою формування полігонів алгоритм був включений у конвеєр обробки даних. Мета карти покриття полігоном полягає в тому, щоб визначити, де машини вже працювали, і мати можливість використовувати це для кращого маркування станів машини при повороті та транспортуванні. Процес створення полігонів на основі пройденої машиною відстані з використанням GPS-точок включав використання азимуту руху для орієнтації полігонів, а потім ітерацію через набір даних для створення та об'єднання полігонів.

#### 2.1 Стадія перша: створення полігону

У процесі створення алгоритму полігонів було проведено фонове дослідження, зосереджене на тому, як полігони повинні бути скоординовані з використанням GPS-точок з набору даних. У попередніх роботах вчених [13] їх метою було використати записи Global Navigation Satellite System (GNSS) та створити методи для аналізу продуктивності. Вони застосували алгоритм для маркування подібних чотирьох категорій із використанням методу полігонів. Нижче на Рисунку 2.1 показана візуалізація цього методу.



## Рисунок 2.1 - Створення полігону з використанням кожної точки GPS

Наведений вище рисунок також показує метод, який використовувався з урахуванням центрування жатки. Він має чотири крайні точки: дві з поточної часової позначки ( $elleft(k)$ ,  $eright(k)$ ) та дві з попередньої часової позначки ( $elleft(k - 1)$ ,  $eright(k - 1)$ ). Ці дві точки визначали ширину ( $w$ ), яка була задана для лінії, щоб її представити, і точка була розташована по центру цієї лінії. Цей рисунок показує "до" і "після". Це зробило процес побудови полігонів більш точним і акуратним при формуванні карти покриття [14].

Щоб створити полігон для обробки GPS-даних, широта й довгота були перетворені з тривимірних у двовимірні координати Картагенського типу, оскільки з ними легше працювати в метрах, ніж з GPS-точками – як з осями  $x$  та  $y$  – з використанням коду для попередньої обробки під час першого етапу. Через спосіб злиття даних існують випадки, коли GPS-точка має бути заповнена, щоб врахувати розташування витягнутої інформації. Під час обчислень ті ж самі видалені рядки, які менші ніж 0.5, не рухаються, GPS-порожні, а точка збору має значення 0 – відстань між точками не змінюється після ітерації по кожному рядку, тому було встановлено фільтрацію за GPS-точками. З цієї причини дані під час процесу створення полігонів були відфільтровані так, щоб набір даних містив лише ті випадки, коли GPS-точка змінювалася.

Для кожної GPS-точки створювався обмежувальний прямокутник з використанням ширини й довжини жатки, щоб з'єднувати точки. Interloop створює полігон, ширину жатки та стовпець кута, який орієнтує полігон, усе це робиться на декартовій площині. Вся обробка проводиться на осях  $y$  та  $x$ , а потім у кінці перетворюється назад – створюється перпендикулярна лінія від лінійного рядка, потім полігон формується з цього рядка та з'єднується за допомогою  $\lambda$ .

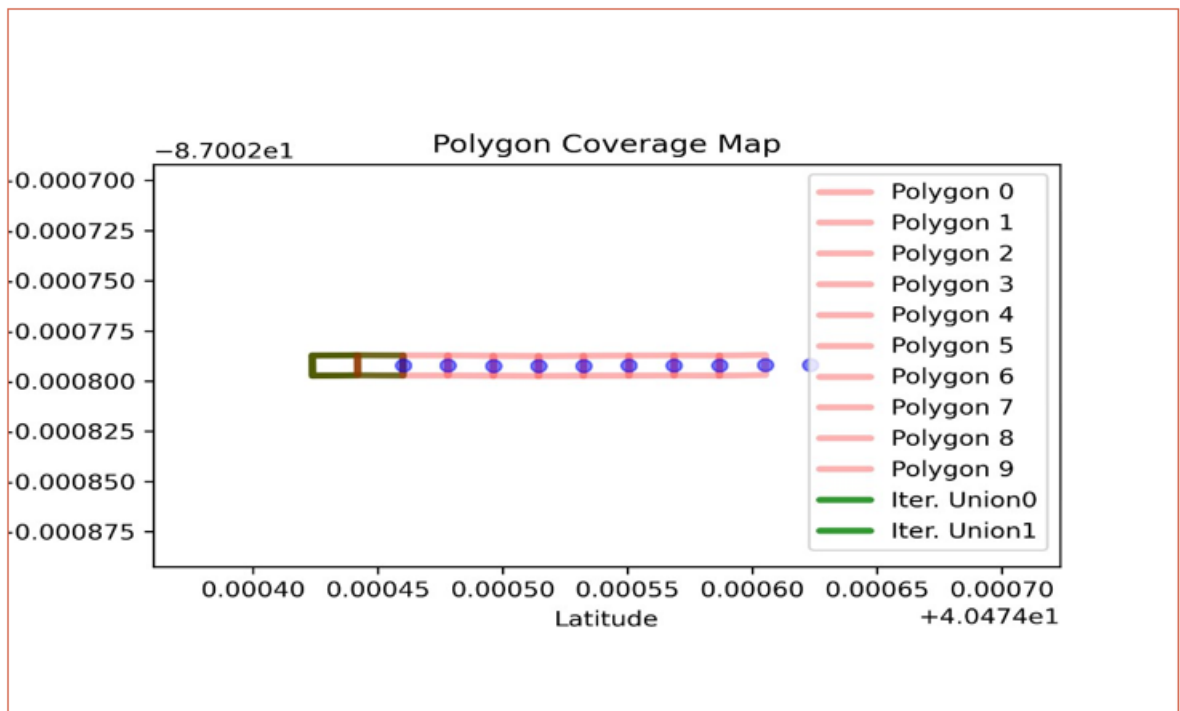
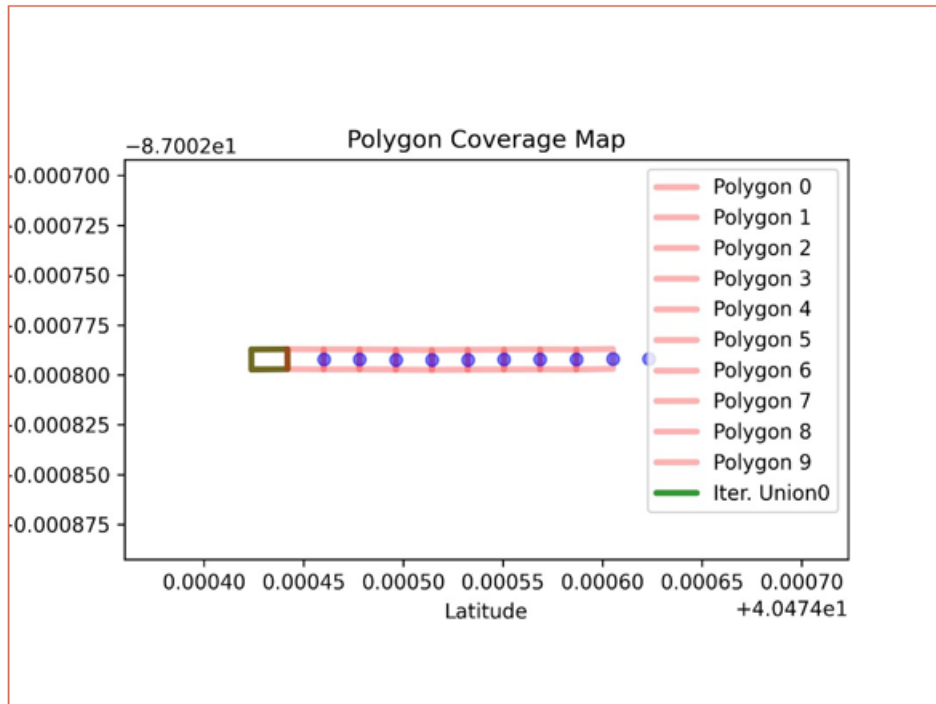


Рисунок 2.2 – Створення та побудова полігону

Наведений вище Рисунок 2.2 демонструє процес циклу, який спочатку створює кожен полігон, використовуючи попередні точки. Рожевим кольором позначені лінії, що створюються, потім зеленим позначено їх з'єднання між собою. Іноді вони є недійсними – коли перекручуються самі на себе – і якщо це

недійсний полігон, він робиться дійсним і точки обертаються; видаляється точка, і це робиться доти, доки полігон не стане правильним; якщо це неможливо зробити після шести спроб, він позначається як null, потім null відкидається і їхня кількість враховується для цієї помилки з поясненням. Нижче на Рисунку 2.3 показані точки, що перекручуються між собою. Це важливо виправити, адже саме ця зона потрібна для ідентифікації як поворот у алгоритмі [15].

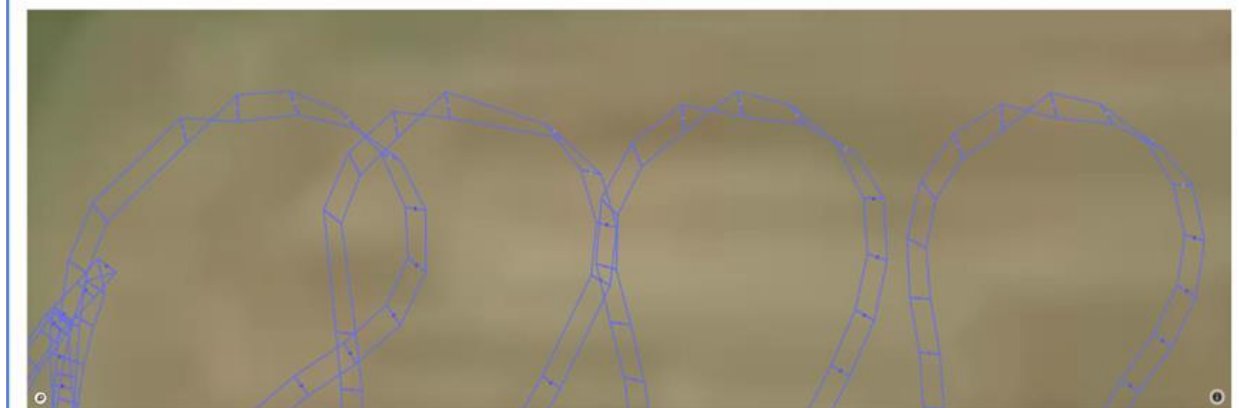


Рисунок 2.3 – Демонстрація скручених точок одна на одній

## 2.2 Стадія друга: Маркування перекриття полігонів

Після ітерації через набір даних було виділено маркування перекриваючих точок даних, щоб визначити, коли комбайн увійшов у зону, яку він уже перетинав. Обмежувальні прямокутники, що створюються на першому етапі, використовуються через *shapely* для зменшення кількості виконуваних операцій. На початку цього процесу спочатку перевіряється, чи знаходиться точка в іншому полігоні, і вона маркується як *contains* [16]. Слово *contains* використовується, тому що цей процес перевіряє всередині іншого полігону, чи точка знаходиться всередині або поза межами наявного полігону. Жодних відсотків не використовується – лише якщо полігон був визначений, щоб подивитися, наскільки він перекриває існуючий полігон, і тільки якщо точка була розташована всередині. Якщо вона була розташована всередині існуючого полігону, то в діаграмі створювався червоний прямокутник, а GPS-точки позначалися як

*contained*.

Нижче на Рисунку 2.4 показано випадки, коли GPS-точки знаходяться на лінії існуючого полігону або потрапляють всередину обмежувального прямокутника.



Рисунок 2.4 – Полігони з позначкою «contained»

### 2.3 Стадія третя: Додавання мітки полігону до набору даних Truth

Останнім етапом було додавання стовпця *contain* до оригінального набору даних. Було створено стовпець, який містить значення 1 – для GPS-точок, позначених як *contained*, і 0 – для GPS-точок, позначених як *uncontained*. Це важливо, оскільки цей стовпець допомагає маркувати, коли комбайн виконує поворот і транспортування. Це також допомагає визначати «вузькі місця» та помилки в алгоритмі маркування станів. Є одна річ, яку неможливо побачити, якщо не натиснути на точки – коли саме відбувся прохід. Це допомагає визначити, у якому напрямку комбайн рухається та який прохід є першим або другим. Нижче на Рисунку 2.5 показано поле 4 у зоні повороту, але верхній прохід має полігони, позначені як *contained*. Далі на Рисунках 2.6 та 2.7 показано, як при наведенні на GPS-точки відображається час, інформація про азимут та координати GPS, щоб визначити, який прохід відбувся першим [17].

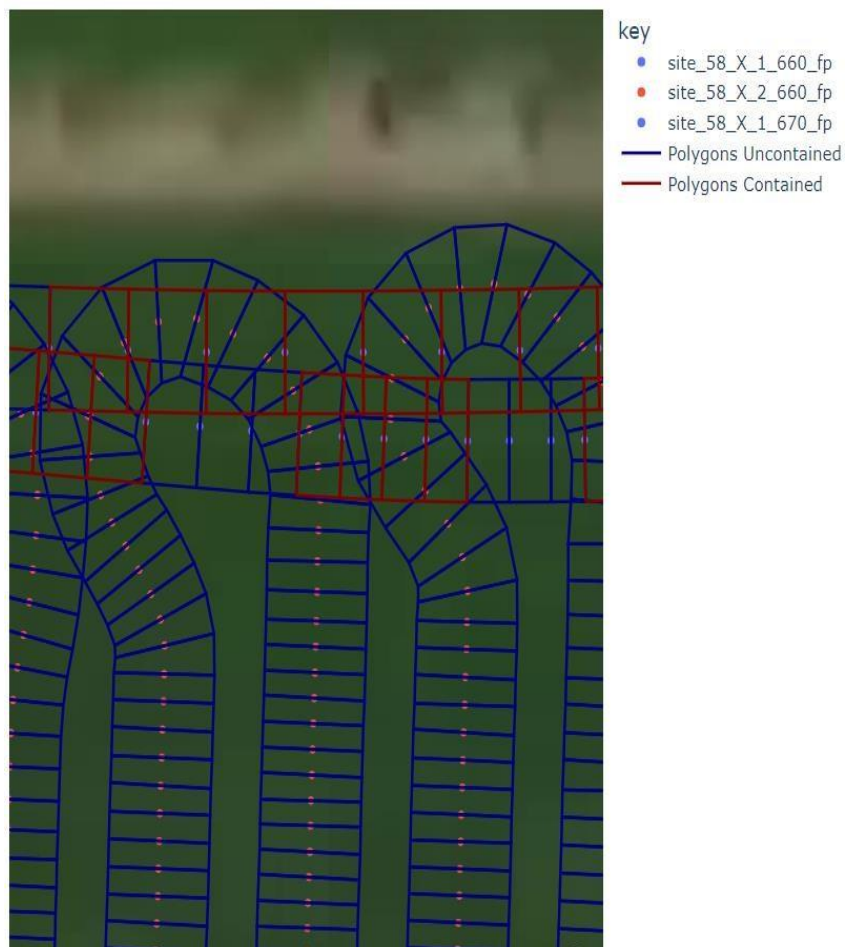


Рисунок 2.5 – Прохід полігону «Contained»

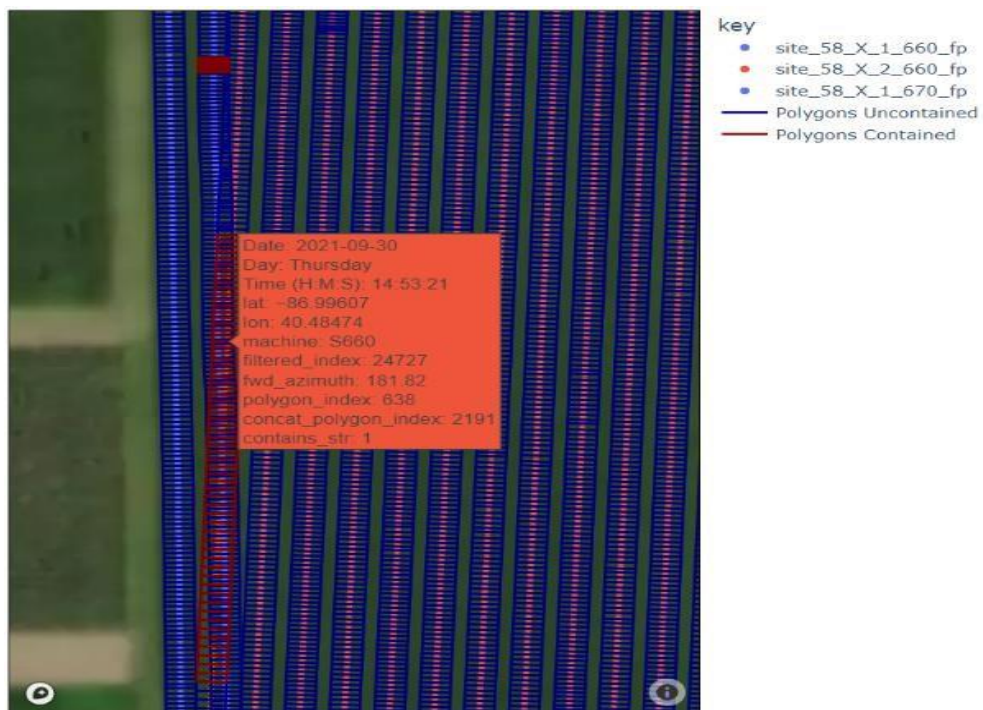


Рисунок 2.6 – Інформація про точки GPS для точок «contained»

Наведене вище показує час і дату з додатковою інформацією про номер точки у процесі збирання врожаю комбайном, тоді як нижче показано, що точка *contained* з'явилася після першого збору врожаю. Це означає, що точка *contain* представляє транспортування комбайна з поля.

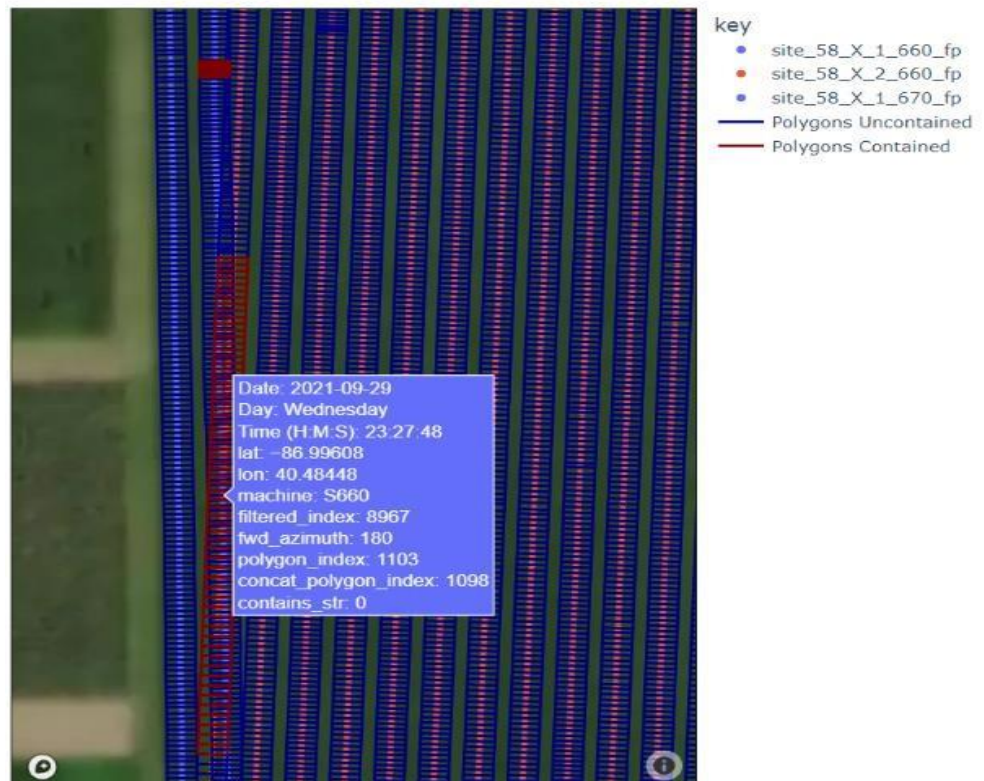


Рисунок 2.7 – Інформація про GPS точки для точок «uncontained»

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Порівняння алгоритмів та результати валідації

##### Поле 1

Його можна розглядати як ідеальний робочий день фермера з мінімальним або повністю відсутнім простоем. Нижче наведено результати оригінального алгоритму з початковими еталонними даними, а також оновлені результати з урахуванням змінних для маркування оновлених станів. Кожне поле було оброблене оригінальним алгоритмом, щоб спершу визначити, які стани алгоритм ідентифікував коректно і не потребували змін, а потім провести чисте порівняння щодо того, що необхідно було вдосконалити в алгоритмі.

Нижче, на рисунку 3.1, представлено обране поле, на якому було налаштовано як оригінальний, так і оновлений алгоритм завдяки майже повній відсутності зайвих рухів. Це дозволило захопити більшість станів у незначній активності, що стало відправною точкою з використанням обраних параметрів для оригінального алгоритму. Автор оригінального алгоритму зміг виявити хибні негативні та хибні позитивні результати, які знижували відсоток точності. Подальший фокус було зосереджено на тому, яка частка результатів була правильною та до якого стану відносилися дані, якщо вони були ідентифіковані неправильно.



Рисунок 3.1 - Результати роботи комбайна S660 на полі 1 з діаграмою ідентифікації станів

Нижче, у таблиці 3.1, наведено результати роботи оригінального та оновленого алгоритмів на основі оновлених еталонних даних для комбайна. У таблиці показано, наскільки точним був оригінальний алгоритм щодо оновлених станів, а також результати оновленого алгоритму. Оновлені стани були враховані, але перевірялися лише ті, які алгоритм мав змогу ідентифікувати. У таблиці позначення **O** відповідає оригінальному алгоритму, а **U** – оновленому алгоритму, що дозволяє провести порівняння «пліч-о-пліч».

Таблиця 3.1 - Результати ідентифікації оновлених станів комбайна S660 на полі 1 оригінальним алгоритмом

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Збір врожаю	65994	86156	65650	65118	62230	20162	344	98.67	94.3
Простій роботи	1265	2063	1268	785	89	1278	1179	62.1	7.03
В дорозі	12712	10478	10478	7848	7848	2234	5297	61.74	61.84
Розвантаження на місці	2645	2933	2933	2586	2586	288	288	97.77	97.8
Повороти	17970	NA	12712	NA	7848	NA	5297	NA	60
Транспортування	1044	NA	9807	NA	587	NA	9807	NA	43.5

Для оригінального алгоритму найбільші похибки спостерігалися під час маркування станів **Idle** (простій) та **On the go** (В дорозі). Навіть із невірною класифікацією певних станів загальна точність комбайна становила 90%. Для процесу збирання втрати були незначними, оскільки оригінальний алгоритм відносив будь-який рух до стану «збирання врожаю». Проте еталонні дані чітко розрізняють стани повороту та транспортування, тоді як оригінальний алгоритм класифікує їх як «збирання». Через спосіб фільтрації й ущільнення набору даних GPS-точки залишалися незмінними при формуванні еталонних даних, створюючи більші набори та більше точок, ніж раніше. Це могло спричинити відмінності у класифікації станів через обчислення швидкості на основі GPS-точок. У результаті здавалося, що алгоритм має дуже високу загальну точність, проте це не враховувало випадки, коли алгоритм маркував стани як «NA» (не визначено), тобто точність включала лише ті стани, що були ідентифіковані, а не ті, що не підпали під жодну категорію.

Для роботи комбайна з оновленим алгоритмом, що враховує нові стани, спостерігалася дуже висока точність у станах **Harvesting** (збирання) та **Stationary unloads** (розвантаження під час зупинки, стаціонарне розвантаження), середня точність у станах **Turning** (повороти) та **On the go**, і дуже низька точність у станах **Idle** та **Transporting** (транспортування). Загальна точність становила 83%. Не кожен поворот відбувається у зоні перекриття, але якщо так, то він одразу

класифікується. Щодо транспортування – воно часто замінювалося станом повороту через мінімальні відмінності між цими станами. Стан Idle замінювався станом On the go, оскільки комбайн перебував у нерухомості в кінці циклу руху з розвантаженням і після розвантаження на місці перед повторним запуском. Еталонні дані це фіксують завдяки точному визначенню моменту ввімкнення та вимкнення шнека. Алгоритм же, враховуючи відстань у межах порогу, маркував такі стани некоректно [18].

Таблиця 3.2 - Результати оновлених станів для зернового на полі 1 з оригінальним алгоритмом.

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Вивантаження	10380	3328	NA	10224	NA	23948	NA	98.5	NA
Простий роботи	13652	40268	14506	6244	112	38884	13540	45.7	1.08
В дорозі	12712	14635	5769	3796	1784	7856	13271	35.2	14.0
Стаціонарне розвантаження з комбайна	2532	1632	1956	1356	1543	1769	1189	54.9	67.9
Стаціонарне розвантаження у вантажівку для міжн. перев.	5302	NA	8575	NA	5289	NA	3273	NA	99.76
Стаціонарне розвантаження у вантажівку	5078	NA	9287	NA	4905	NA	4209	NA	96.60
Перевезення	62354	2318	73072	1418	54981	60036	10718	2.27	88.18

Таблиця 3.2 демонструє результати роботи оновлених еталонних даних на оригінальному алгоритмі. Для зернового воза точність становила лише **18%** при використанні оригінального алгоритму. Два стани, які були додані і не наведені у таблиці вище, – це **Stationary Unload to International truck** (Стаціонарне розвантаження у вантажівку для міжн. перев.) та **Stationary Unload to Freight truck** (Стаціонарне розвантаження у вантажівку). Це пояснюється тим, що

початкові дані щодо вантажівок і оригінальний алгоритм не розрізняли ці стани, а поєднували їх у стан *Cart unload*, щоб перевірити, чи алгоритм зможе класифікувати їх правильно.

Для оновленого алгоритму зерновий віз показав **70% точності**. При роботі на новому алгоритмі з урахуванням нових станів спостерігається дуже висока точність у станах **Stationary to the trucks**, **Stationary from the combine**, а також у стані **Transporting**. Низька точність для станів **Idle** та **On the go unloads** зумовлена тим, що вони перезаписуються іншими станами.

Наприклад, коли стан мав би бути позначений як *Idle*, він зазвичай перезаписується як *Stationary unload*, оскільки відсутній ідентифікатор, що розвантаження завершилося. Алгоритм вважає, що розвантаження триває, оскільки зерновий віз знаходиться поряд із вантажівкою чи комбайном. Для стану *On the go* відбувається перезапис у *Transporting*, оскільки швидкість може збільшитися під час розвантаження, або ж через дуже незначну зміну GPS-точок від ряду до ряду стан визначається як *Stationary unload* [19].

## **Поле 2**

Для забезпечення оптимізації та відстеження логіки попередніх робіт зі створення алгоритму й перевірки результатів алгоритм після налаштування було запущено на решті полів. Щоб упевнитися, що алгоритм може ідентифікувати всі стани, було обрано **Поле 2** завдяки його значній площі та потенціалу для наявності всіх можливих станів. Оскільки поле збиралося двома різними комбайнами, журнали було розділено на дві частини для подальшого аналізу результатів. Через значний розмір поля воно більше задіяло вантажівки, тому результати ідентифікації станів вантажівок також було враховано. Нижче наведено траєкторію руху та позначені стани для візуалізації на рисунку 3.2.



Розвантаження на місці	36489	81359	65228	36179	35560	44870	28739	99.15	97.46
Повороти	131046	NA	110269	NA	67293	NA	20777	NA	52
Транспортування	24790	NA	2567	NA	587	NA	1967	NA	1.78

Для оригінального алгоритму точність ідентифікації всіх станів становила **64%**, але з обмеженням на *Idle*. Через надмірне маркування станів *Stationary* відбулося зниження точності у станах *On the go* та *Harvesting*. Наведені вище результати показують, що оновлений алгоритм має загальну точність **87%**. Ключовими факторами, що виділяються, є *Idle* та *Transporting*. Це зумовлено тим, що алгоритм враховує лише GPS-точки і немає інших параметрів, які могли б показати різницю між *Turning* та *Transporting*. У результаті стан *Transporting* перезаписується станом *Turning*, що спричиняє завищену точність для *Turning* і кращу його ідентифікацію порівняно з *Transporting*. Стан *Idle* перезаписується станом *Stationary*, оскільки відсутній індикатор того, що комбайн більше не розвантажуються, а просто стоїть поряд із зерновим возом. Точність для стану *Turning* становить лише **52%**, оскільки половина заголовків була розділена між іншим комбайном, адже на цьому полі працювало два комбайни. Для тих, що були призначені цьому комбайну, алгоритм зміг правильно ідентифікувати лише трохи більше половини.

Таблиця 3.4 - Результати роботи комбайна S670 на полі 2 з оригінальним та оновленим алгоритмом

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Збір врожаю	846139	933346	807571	823815	772660	87207	38568	97.4	91.3
Простій роботи	1544	74122	1936	992	486	72578	1456	74.3	25.6
В дорозі	38944	19137	56049	12633	38385	19807	17105	32.4	98.5
Розвантаження на місці	15960	21790	21970	10160	10179	5830	6010	63.6	64.7
Повороти	121886	NA	162985	NA	86009	NA	41099	NA	70.5
Транспортування	24102	NA	1594	NA	863	NA	24102	NA	3.8

У таблиці 3.4 наведені результати роботи оновлених еталонних даних комбайна S670, отримані на оригінальному та оновленому алгоритмах для порівняння. Для оригінального алгоритму загальна точність становила **56%**, тоді як для оновленого алгоритму на основі еталонних даних – **86%**. Схема перезапису стану *Turning* замість *Transporting* і *Idle* замість *Stationary unload* ще більш чітко простежується у роботі комбайна S670. У таблиці 3.5 нижче показано порівняння результатів зернового воза на полі 2 з оновленими еталонними даними, отриманими за оригінальним та оновленим алгоритмами, що відповідають зерновому возу S660.

Таблиця 3.5 - Результати оновлених станів зернового воза S660 на полі 2

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Вивантаження	84466	139993	NA	81639	NA	58749	NA	95.4	NA
Простій роботи	25064	797178	5896	19635	4658	772114	0	64.9	23.7
В дорозі	28510	6598	40924	5638	28510	24965	12414	15.6	99.1
Стационарне розвантаження з комбайна	36324	110404	65394	36324	35500	74080	29070	100	97.7
Стационарне розвантаження у вантажівку для міжн. перев.	49118	NA	83966	NA	49115	NA	34848	NA	100
Стационарне розвантаження у вантажівку	35348	NA	56247	NA	35320	NA	20899	NA	99.9
Перевезення	874211	NA	802044	NA	779294	NA	72167	NA	99.9

Для оригінального алгоритму, що працював на оновлених еталонних даних, загальна точність становила **18%**. Для оновленого алгоритму з урахуванням оновлених еталонних даних загальна точність становила **88%**. Причиною є перезапис станів категорії *Stationary unload*. Як зазначалося раніше, через відсутність індикатора повного завершення розвантаження транспортні засоби

залишаються в межах порогу відстані, що призводить до перезапису стану *Idle*. Нижче, у таблиці 3.6, наведено точність для комбайна S670 з оновленими еталонними даними, отриманими за оригінальним та оновленим алгоритмами.

Таблиця 3.6 - Результати станів зернового воза з оновленими еталонними даними для комбайна S670 на полі 2

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Вивантаження	84466	134378	NA	84463	NA	49912	NA	100	NA
Простій роботи	25064	890132	6578	20683	4698	864172	25960	92.3	5.6
В дорозі	28510	73649	56047	20596	26984	38944	27103	89.3	98.5
Стаціонарне розвантаження з комбайна	36324	24065	15901	10139	10139	8164	6110	63.7	65.7
Стаціонарне розвантаження у вантажівку для міжн. перев.	49118	NA	49118	NA	49115	NA	28603	NA	100
Стаціонарне розвантаження у вантажівку	35348	NA	35348	NA	35320	NA	22086	NA	99.9
Перевезення	883304	692584	835362	589364	805044	12896	47942	56.8	91.1

Оригінальний алгоритм мав загальну точність 82%, тоді як оновлений алгоритм мав загальну точність 90%. Найнижчою зоною є *Idle* та *Stationary* для комбайна через те, що зазвичай вони перекривалися *Stationary* до одного з вантажівок, оскільки під час стаціонарного розвантаження всі транспортні засоби зазвичай знаходяться поруч один з одним на краю поля.

В оригінальному алгоритмі дані вантажівок збиралися та використовувалися, але ніколи не враховувалися у результатах точності. Створення алгоритму для вантажівок в оригінальному варіанті було додане до оновленого алгоритму та налаштоване для визначення точності вантажівок, щоб краще зрозуміти, які ділянки алгоритму потребують покращення. Нижче в

Таблицях 3.7 і 3.8 наведено оновлені набори істинних даних, запуснені на оновленому алгоритмі. Результати показують 89% точності для International truck та 94% точності для Freight truck. Стан transporting має найбільший фактор похибки через незначні зміни в GPS, тому важче передбачити його рух у порівнянні з істинними даними.

Таблиця 3.7 Результати істинних станів International truck з зерновим бункером

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану	Правильний алгоритм стану	Неправильно сформульований	Відсоток правильних
Транспортування	40590	3110	150	37480	.57%
Простій роботи	959352	964544	925045	5192	96.43%
Розвантаження на місці	48633	80921	47421	32288	97.51%

Таблиця 3.8 Результати істинних станів Freight truck з зерновим бункером

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану	Правильний алгоритм стану	Неправильно сформульований	Відсоток правильних
Транспортування	883304	835362	805044	47942	91.15%
Простій роботи	25960	0	0	25960	0
Розвантаження на місці	35348	57434	35320	22086	99.93%

### Поле 3

Поле 3 — ще одна ділянка, яка була зібрана та запущена на оригінальному алгоритмі. Щоб упевнитися, що алгоритм може працювати на різних полях, ця ділянка була виконана у два різні дні. В один день вона була окреслена по краю, а на другий день була зібрана. Нижче на Рисунку 3.3 показані результати оновленого алгоритму з маркуванням станів поля за кольорами, далі — таблиці точності для комбайнів S660, S670 та зернового бункера для цієї ділянки.



Рисунок 3.3 - Результати оновленого алгоритму для Поле 3, комбайн S660 з ідентифікаційною діаграмою

Таблиця 3.9 - Поле 3 Комбайн S660 з результатами оригінального та оновленого алгоритму

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Збір врожаю	208528	141025	2053256	127725	197306	67503	3202	61.2	94.6
Простій роботи	50	113221	0	0	0	113171	50	0	0
В дорозі	8944	8435	13840	5425	8944	509	4896	60.6	100
Розвантаження на місці	6134	13695	8480	5887	3168	7561	2346	95.9	51.6
Повороти	53422	NA	52946	NA	44183	NA	476	NA	82.7

Транспортування	3513	NA	0	NA	0	NA	3513	NA	0
-----------------	------	----	---	----	---	----	------	----	---

Для оригінального алгоритму, для stationary він позначив більшість, що вказані, але через сам алгоритм також позначав у середині активності On the go, створюючи помилкові stationary. Це випадок, коли комбайн і зерновий бункер можна побачити такими, що сповільнюються, виходячи за межі порогового значення швидкості, але все ще розвантажуються, створюючи хибну активність стаціонарного розвантаження. Для стану on the go він позначав більшість, але також робив помилки. Для harvesting вказується, що багато пропущено, оскільки алгоритм позначав будь-який рух як harvesting, але оновлені істинні дані змогли позначити повороти та transporting, де його алгоритм визначав harvesting. Через спосіб, у який заповнений новий набір даних, GPS-точка залишається тією ж, тому для нового алгоритму, якщо GPS-точка така ж, як і попередня — використовується попередній стан, інакше запускаються правила. Для результатів оновленого алгоритму загальний відсоток становить 91.32% точності. Навіть після оновлення все ще помітно пропуски idle та неправильне маркування transporting. Зниження стаціонарних розвантажень можна побачити через те, що більшість з них відбувається на краю поля і помилково маркується як turning через додану функцію полігонів [20].

Таблиця 3.10 - Поле 3 S660 Grain Cart Оновлені стани з результатами оригінального алгоритму

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Вивантаження	18137	26296	NA	18136	NA	8159	NA	99.9	NA
Простій роботи	6848	227295	0	6657	0	220447	6848	97.2	0
В дорозі	8944	0	13824	0	8944	0	4880	0	100
Стаціонарне розвантаження з комбайна	6099	22784	8604	5967	5922	16685	2505	97.8	97.1
Стаціонарне розвантаження	6481	NA	8000	NA	6480	NA	1519	NA	99.9

у вантажівку для міжн. перев.									
Стационарне розвантаження у вантажівку	11656	NA	18296	NA	11655	NA	6640	NA	99.9
Перевезення	240564	0	231868	0	225032	0	8696	0	93.5

Зверніть увагу, що похибка велика через те, що там, де оригінальний алгоритм позначав *waiting*, істинні дані мали *transporting*, оскільки віз рухався з високою швидкістю. Алгоритм добре справляється з позначенням *stationary*, *cart unload* та *waiting*. Він гірше фіксує *transporting* або *on the go*. Також він позначив місця, де *transporting*, як NA, що сприяло збільшенню помилки. Коли істинні дані позначають *on the go*, алгоритм визначає це як *stationary*, що дає хибні позитиви для *stationary*, хоча насправді триває розвантаження. Щодо проблеми *on the go*, вважається, що код має перевіряти, чи GPS-точки комбайна позначені як *on the go*, і якщо так — перевірити GPS-точки комбайна та переконатися, що вони в межах порогових змінних, після чого позначити їх.

Для оновленого алгоритму загальна точність становила **94.26%** на Поле 3, частина 2. Зверніть увагу, що буде надмірне маркування *harvesting*, оскільки оригінальний алгоритм позначав *transporting* лише коли він був поруч із комбайном, але не рухався точно з тією ж швидкістю. Якщо маркувати строго за *transporting* або *turning* на основі перекриття, відбудеться надмірне маркування одного або іншого. Більш детальне дослідження та, можливо, додаткові змінні допоможуть з GPS. При спробі маркувати *transporting* і *turning* без перекриття полігонів буде відбуватися надмірне маркування *harvesting*.

#### Поле 4

Дані, зібрані з поля 4, наведені нижче, із використанням як оригінального, так і оновленого алгоритму. Для Поля 4 було введено маркування робочих подій, оскільки деякі поля оброблялися протягом двох днів. Робоча подія враховує один день, тому якщо поле поділене на дві робочі події, це означає, що поле збиралося

протягом двох днів. Поля, наведені нижче, показують результати полів, завершених за одну робочу подію, у порівнянні з полями, завершеними за дві робочі події, щоб оцінити, наскільки добре алгоритм може позначати стани з урахуванням роботи машини на раніше відвіданих ділянках. Цей виробник використовував лише один комбайн і дві вантажівки, на відміну від інших операцій. Мета обраних полів — оцінити, наскільки добре алгоритм з GPS-точками лише комбайна та вантажівок може точно позначати активність машини. Зазвичай зерновий віз є середньою машиною, яка допомагає перевіряти потік операції, але оскільки цей виробник його не використовує, це допоможе передбачити, як алгоритм має працювати з меншою кількістю обладнання та новими полями.

### **Поле 5**

#### **Прохід 1**

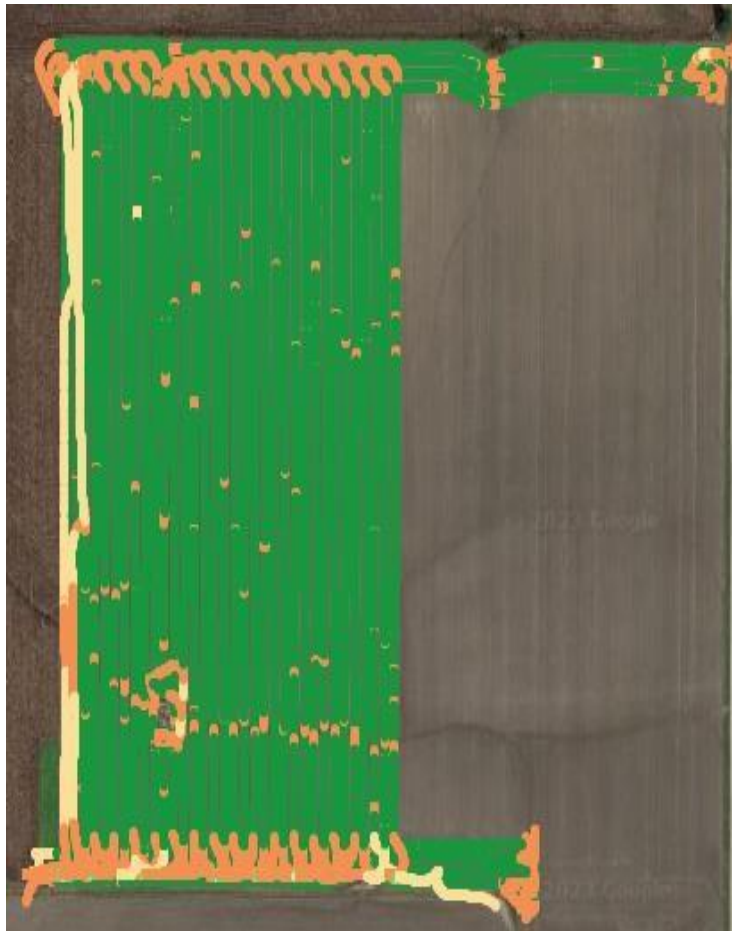


Рисунок 3.4 - Поле 5, прохід 1 з результатами алгоритму та ідентифікаційною діаграмою

Таблиця 3.11 - Поле 5, прохід 1 Комбінація S760 з оригінальними та оновленими результатами алгоритму

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Збір врожаю	52501	72470	52501	5201	49521	19969	1441	100	94.33
Простій роботи	2740	10649	2740	659	0	7909	2740	24.0	0
Транспортування	6201	0	0	0	0	6201	6201	0	0
Розвантаження на місці	4846	0	NA	0	NA	4806	NA	0	NA
Повороти	18020	NA	29177	NA	14009	NA	11157	NA	77.75
Стационарне розвантаження у вантажівку	6201	NA	1189	NA	529	NA	5012	NA	8.53

Для комбайна загальна точність становить 80.20%. Таблиця 3.11 показує, що оригінальний алгоритм добре справляється з маркуванням *harvesting* та *idle*. Оскільки *harvesting* становить більшість станів у діяльності на полі, навіть якщо *stationary* та *transporting* позначені нулем, точність залишається високою. Зверніть увагу, що *stationary* та *transporting* відсутні, оскільки алгоритм не міг позначити їх інакше, ніж NA, тому для цих станів відсоток не розраховується.

При порівнянні оригінального та оновленого алгоритму спостерігається зниження загальної точності на 4% до 76%. Трохи збільшилася точність для *stationary unloads* і було стабільне маркування *harvesting*. Алгоритм зміг визначити *turning*, але надмірно позначив його, що призвело до того, що *idle* та *transporting* залишилися непозначеними. Знову ж таки, через додану функцію полігону та невелику різницю між *transporting* і *turning*, *transporting* не позначається адекватно. *Idle* не визначається через *stationary unload* та *turning*, оскільки немає змінної, що ідентифікує, коли комбайн знаходиться в стані бездіяльності після розвантаження. Він також буде вважатися *turning*, якщо потрапляє у вже зібрану ділянку та рухається повільно.

Таблиця 3.12 - Поле 5, прохід 1 вантажівка з оригінальними результатами алгоритму

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану	Правильний алгоритм стану	Неправильно сформульований	Відсоток правильних
Перевезення	72098	72600	70929	502	98.38%
Простій роботи	11630	9981	9959	1649	85.64%
Розвантаження на місці	4846	1727	580	3119	11.97%

Вищезгадана Таблиця 3.12 показує загальну точність **96.64%** для оновленого алгоритму при маркуванні станів вантажівки для Поля 5, прохід 1.

### Прохід 2

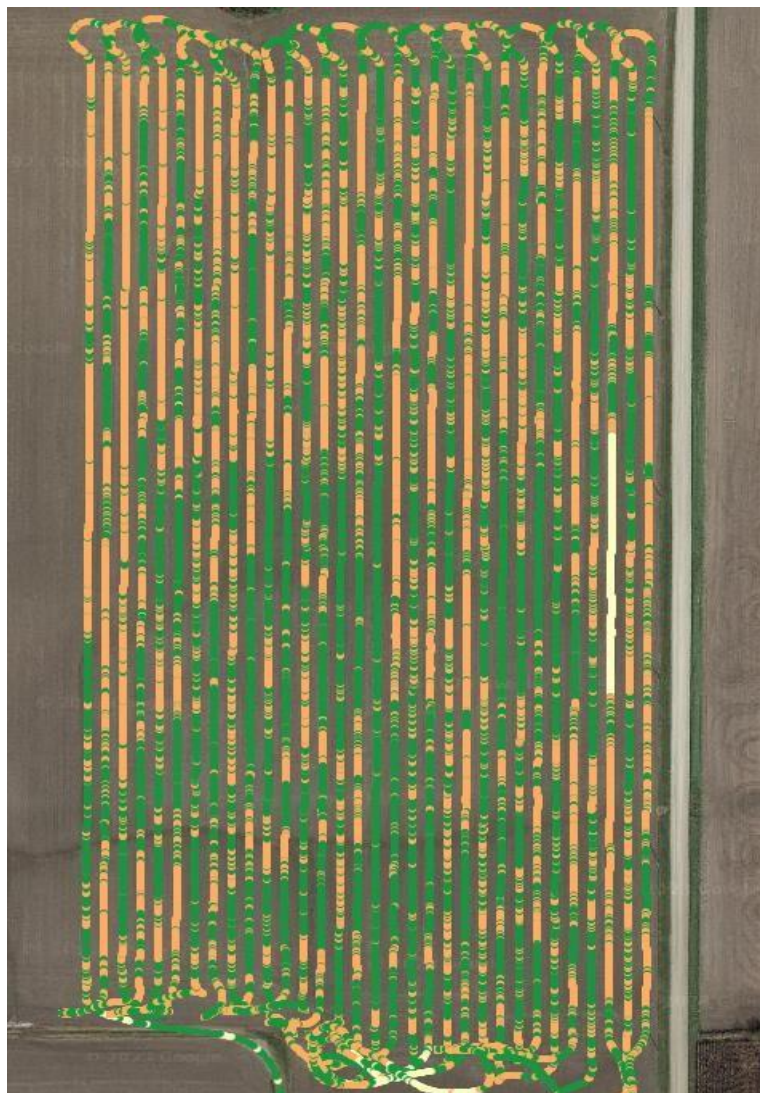


Рисунок 3.5 - Поле 5, прохід 2 з результатами алгоритму та ідентифікаційною діаграмою

На Рисунку 3.5 показано Поле 5, прохід 2, з маркуванням алгоритмом. Цей візуальний приклад обрано, щоб показати, як виглядають результати, коли алгоритм не правильно ідентифікує стани. Поле було запущено як на оригінальному, так і на оновленому алгоритмі, а продуктивність показана у наступних таблицях.

Таблиця 3.13 - Поле 5, прохід 2 Комбінація S760 з оригінальними та оновленими результатами алгоритму

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану		Правильний алгоритм стану		Неправильно сформульований		Відсоток правильних	
		O	U	O	U	O	U	O	U
Збір врожаю	28821	58092	45214	28821	22001	29271	16393	100	74
Простій роботи	4414	1095	0	2923	0	6481	4414	89.62	0
Транспортування	2440	0	0	0	0	2440		0	0
Розвантаження на місці	5621	0	NA	0	NA	5621	NA	0	NA
Повороти	33312	NA	23773	NA	10763	NA	9539	NA	100%
Стационарне розвантаження у вантажівку	5621	NA	0	NA	0	NA	5621	NA	0

У Таблиці 3.13 показано, що оригінальний алгоритм, запущений на Поле 5, прохід 2, перевершив оновлений алгоритм на 41%. Він мав загальну точність **91.83%** порівняно з оновленим алгоритмом із загальною точністю **50%**. Це свідчить, що оновлений алгоритм правильно позначив лише половину всіх станів для діяльності на полі. Алгоритм зміг позначити *turning* та *harvesting*, але неправильно позначав будь-яку іншу активність на полі. Через незмінні параметри можуть бути різні причини, чому саме це поле не перевершило оригінальний алгоритм.

Таблиця 3.14 - Поле 5, прохід 2 вантажівки з оновленим алгоритмом

Стан	Значення даних Truth	Передбачуваний алгоритм стану	Правильний алгоритм стану	Неправильно сформульований	Відсоток правильних
Перевезення	57230	59009	57221	1779	99.99%
Простій роботи	6136	9978	9969	3842	38%
Розвантаження на місці	5621	0	0	5621	0%

Для полів з лише однією робочою подією точність вища порівняно з полями з кількома подіями, що видно через більшу площу, охоплену проходом 1, і більшу ймовірність того, що під час проходку 2 зібрані ділянки будуть неправильно позначені як *turning* або *transporting*.

### 3.2 Загальні результати за обраним методом

Таблиця 3.15 - Порівняння загальної точності для комбайна

Стан	Значення даних Truth	Правильний алгоритм стану		Відсоток правильних	
		O	U	O	U
Збір врожаю	2238846	1894068	2178619	84.60%	97.31%
Простій роботи	25069	12012	7539	47.92%	28.09%
В дорозі	94942	35491	89263	37.38%	94.02%
Розвантаження на місці	96631	54517	56802	56.20%	58.78%
Повороти	464851	NA	329033	NA	70.78%
Транспортування	106850	NA	12934	NA	10.59%

При порівнянні оригінального алгоритму з оновленим наведені діаграми демонструють, наскільки точно кожен алгоритм позначив стани. Загальна точність оригінального алгоритму становить **81%**, тоді як оновлений алгоритм має загальну точність **88%** для комбайна. Збільшення на 7% все ще недостатнє для правильного маркування *idle* та *transporting*.

Таблиця 3.16 - Порівняння загальної точності для зернозбирального причепа

Стан	Значення даних Truth	Правильний алгоритм стану		Відсоток правильних	
		O	U	O	U

Простій роботи	78516	12901	8659	16.43%	9.73%
В дорозі	94942		94942	0.00%	87.90%
Розвантаження на місці	63655	25071	57092	39.39%	86.26%
Розвантаження на місці вантажівки 1	60901	NA	60884	99.97%	99.97%
Розвантаження на місці вантажівки 2	52082	NA	51880	99.61%	99.61%
Транспортування	2304533	1418	2095103	7.06%	90.91%
Вивантаження бункера	112983	112823	NA	99.86%	NA

При порівнянні оригінального алгоритму з оновленим наведені діаграми демонструють зерновий віз та точність позначення станів. Загальна точність оригінального алгоритму становить **6%**, тоді як оновлений алгоритм має загальну точність **88%** для зернового візка. Для *stationary unload* до вантажівок усі вантажівки були додані в дві категорії — truck 1 та truck 2, щоб врахувати всю активність вантажівок. Незважаючи на збільшення на 82%, точність позначення *idle* все ще низька через перезаписування в алгоритмі. Коли кілька станів мають одну базу і відрізняються лише швидкістю та місцезнаходженням, це може призвести до помилок, у цьому випадку GPS-точки пропускаються та неправильно позначаються.

Таблиця 3.17 - Порівняння загальної точності вантажівки

Стан	Значення даних Truth	Правильний алгоритм стану	Відсоток правильних станів
Транспортування	481905	477820	99.15%
Простій роботи	94244	78779	83.59%
Розвантаження на місці	23514	4554	19.37%

При порівнянні оригінального алгоритму з оновленим наведені діаграми демонструють точність позначення станів для транспортного обладнання. Оскільки оригінальний алгоритм не записував і не вимірював точність роботи

вантажівок, порівняння немає. Загальна точність оновленого алгоритму для комбайна становить **94%**. Збільшення на 79% вказує на те, що в майбутніх роботах варто покращити маркування *stationary unloads* до вантажівок, щоб оптимізувати потік зерна.

Додатково, помилки від комбайна можна побачити через неправильне маркування *transporting* та надмірне маркування *turning* через формування полігональної ознаки. Полігональна ознака разом з оновленим алгоритмом загалом покращила маркування станів для більш реалістичного відображення діяльності в полі. Оригінальний алгоритм надмірно маркував *harvesting*, показуючи врожай під час *transporting* та *turning*, а завдяки полігону візуалізація даних тепер відображає більш реалістичну картину діяльності в полі. Для зернового візка показані помилки можна пояснити наявністю більше одного комбайна в полі. Це викликає “флаги” для вузьких місць, коли потрібно узгоджувати машини за станом. Спільною причиною помилок для всього обладнання є таймінг.

### **3.3 Висновки за розділом та пропозиції для майбутніх досліджень**

Зі збільшенням вимог до точності з боку фермерів та менеджерів, вони шукають інструменти, які допомагають приймати рішення, що не лише економлять час, а й кошти для їхнього життя та обладнання. Щоб полегшити майбутні рішення з використанням попередніх робіт, було створено інструмент, який оптимізує обладнання і налаштований для роботи не лише на ідеальному полі. Розширюючи pipeline та додаючи більш реалістичний огляд і фокусуючись на точності роботи в полі не лише для комбайна та зернового візка, а й для вантажівки, для станів, створених виключно на основі GPS-точок. Мета щодо підвищення точності для комбайна становить **88%**. Для зернового візка точність **88%**. Для алгоритму моделі з вантажівками загальна точність становить **94%**. Це вважається значним покращенням завдяки точності визначення моментів, коли

комбайн збирає врожай проти пересування по полю. Оригінальний алгоритм мав дуже високу точність, але не враховував рухи в полі, специфіку між подіями розвантаження та транспортними засобами, а також не дозволяв точно визначати, коли можуть виникати вузькі місця. Оригінальний алгоритм мав тенденцію до надмірного маркування *idle*, створюючи більше ідентифікованих вузьких місць, ніж насправді відбувалося.

Майбутні роботи можуть покращити це шляхом включення часових порогів для станів *idle*, *stationary* та *turning*. Це може допомогти усунути перезаписування станів, знаючи, в середньому, як довго кожен стан повинен тривати на цьому полі з даних істини або за типом обладнання. Це допоможе правильно розміщувати стан, фактично перевизначаючи неправильно позначений стан. Точність вантажівок для оновленого алгоритму була надзвичайно високою для GPS-логерів. Помилки у вантажівках пов'язані з коливаннями та частотою використаних логерів. Покращення точності GPS зменшить простір для помилок.

Для обробки даних мати більш плавний спосіб інтерпретації даних візуально без необхідності завантаження та перевірки скоротило б час обробки. Створення способів автоматизації секції меж поля також зменшило б час, витрачений на обробку даних. Це може виглядати як додавання точок, що формують поле, та використання ключів для відтворення полігону, а якщо точки знаходяться поза його межами — видаляти їх.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є одним із ключових елементів забезпечення безпеки та ефективності сільськогосподарського виробництва, зокрема при виконанні такої складної та відповідальної операції, як збирання зернових культур. У процесі роботи з високопродуктивними комбайнами, тракторами, транспортними засобами та іншими агрегатами виникає широкий спектр небезпек і ризиків, які можуть призвести не лише до пошкодження техніки чи втрат врожаю, але й до травмування або навіть загибелі працівників. Тому система охорони праці на підприємстві повинна бути комплексною, охоплювати як технічні, так і організаційні та санітарно-гігієнічні заходи, що спрямовані на запобігання нещасним випадкам, зниження виробничих ризиків та створення безпечних умов праці.

Найпоширенішими небезпеками під час роботи на збиранні зернових є ризики механічного характеру. Комбайни та трактори оснащені потужними ріжучими і подрібнювальними механізмами, транспортерними системами та іншими рухомими деталями, контакт із якими може призвести до серйозних травм. Потрапляння кінцівок або одягу до зон обертання вала відбору потужності, ріжучих апаратів чи транспортерних ланцюгів є однією з найбільш розповсюджених причин нещасних випадків. Для мінімізації таких ризиків необхідним є суворе дотримання вимог інструкцій з експлуатації техніки, використання захисних кожухів, обмежувачів доступу та блокувальних пристроїв. Важливим є і те, щоб оператори проходили регулярне навчання з техніки безпеки, адже навіть найсучасніші системи захисту не можуть замінити усвідомлену дисципліну працівника.

Не менш значними є ризики, пов'язані з експлуатацією сільськогосподарської техніки на пересіченій місцевості. Під час руху по нерівних полях, особливо на схилах, може виникати загроза перекидання

комбайна чи трактора. Це, у свою чергу, несе ризик отримання тяжких травм оператором. Щоб уникнути подібних ситуацій, слід забезпечувати оптимальну швидкість руху техніки, контролювати завантаження бункера та дотримуватися правил руху по схилах, уникаючи різких поворотів та маневрів. Техніка повинна бути обладнана системами безпеки, такими як ремені безпеки, захисні каркаси або кабіни підвищеної міцності. Важливо, щоб перед початком збирання врожаю проводився ретельний технічний огляд агрегатів, адже справність гальмівної системи, рульового управління та шин безпосередньо впливають на стабільність руху.

Окремої уваги заслуговують ризики, пов'язані з роботою двигунів внутрішнього згоряння та використанням пального. Сільськогосподарські машини споживають велику кількість дизельного палива та мастильних матеріалів, що створює небезпеку виникнення пожеж і вибухів. У процесі роботи агрегати нагріваються до високих температур, що у поєднанні з витіканням пального або несправністю електропроводки може стати джерелом займання. З метою запобігання пожежам необхідно регулярно перевіряти герметичність паливних систем, уникати зберігання зайвих горючих матеріалів у кабінах або на платформах машин, а також забезпечувати наявність справних первинних засобів пожежогасіння. Усі комбайни і трактори повинні бути обладнані вогнегасниками, а оператори – пройти інструктаж щодо дій у разі виникнення пожежі.

Крім того, слід враховувати й фактори, пов'язані з шумом і вібрацією, що виникають під час роботи техніки. Тривале перебування у кабіні комбайна чи трактора за умов високого рівня шуму може призвести до зниження слуху, підвищеної втоми та навіть нервових розладів. Постійна вібрація впливає на опорно-руховий апарат і може стати причиною хронічних захворювань. Для зменшення шкідливого впливу необхідно використовувати сучасні машини з підвищеним рівнем шумо- і віброізоляції, а також застосовувати індивідуальні засоби захисту, такі як навушники чи беруші.

Не менш небезпечним є фактор запиленості під час збирання зернових культур. У процесі роботи комбайна утворюється значна кількість органічного пилу, який може викликати захворювання органів дихання, алергічні реакції чи подразнення слизових оболонок. Для захисту від пилу працівники повинні використовувати респіратори або маски, а кабіни сучасних машин мають бути обладнані системами фільтрації та кондиціонування повітря.

Важливим ризиком є також психологічне та фізичне перевантаження операторів. Під час жнив робота зазвичай відбувається у напруженому режимі, з тривалим робочим днем, часто в умовах високих температур та підвищеного рівня стресу. Це може призвести до зниження концентрації уваги, помилок під час керування технікою, а отже – до аварійних ситуацій. Для мінімізації цього ризику слід забезпечити раціональну організацію праці та відпочинку, чергування операторів, контроль за тривалістю робочого дня, а також створення належних умов для відновлення сил.

Організаційні заходи охорони праці мають включати систематичне навчання персоналу правилам безпечної роботи з технікою, проведення інструктажів перед початком жнив та у процесі виконання робіт. Важливо, щоб працівники мали доступ до чітких інструкцій та настанов, а також усвідомлювали відповідальність за власну безпеку та безпеку колег. На підприємствах має діяти система внутрішнього контролю за дотриманням вимог охорони праці, включно з перевітками технічного стану машин, наявності засобів захисту та виконання правил безпечної експлуатації.

Таким чином, охорона праці при виконанні операції збирання зернових культур є комплексною системою заходів, що охоплює технічний стан машин, організацію виробничого процесу, санітарно-гігієнічні умови та індивідуальну дисципліну працівників. Лише за умови їх комплексного поєднання можна забезпечити ефективну роботу без ризику для життя і здоров'я людей. У сучасних умовах, коли аграрний сектор України працює в надзвичайно складних

економічних і соціальних обставинах, питання безпеки праці набуває ще більшого значення. Дотримання вимог охорони праці не лише захищає працівників, але й сприяє підвищенню ефективності виробничого процесу, зменшенню простоїв та збитків, пов'язаних із аварійними ситуаціями. Це є невід'ємною складовою стратегії сталого розвитку сільськогосподарського виробництва.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Економічна ефективність застосування оновленого алгоритму для маркування станів комбайнів та зернових возів оцінюється на основі впливу на продуктивність збирання врожаю, точність планування робочого часу та зменшення втрат через неправильно розподілену роботу техніки. Основною метою є визначення потенційної економії витрат, збільшення продуктивності та оцінка терміну окупності інвестицій у впровадження оновленого алгоритму.

Для визначення економічного ефекту використовуються такі основні формули:

Кількість відпрацьованих годин техніки:

$$H = H_{\text{plan}} - H_{\text{loss}} \quad (5.1)$$

де  $H_{\text{plan}}$  — заплановані години роботи;

$H_{\text{loss}}$  — втрати часу через неправильно марковані стани.

Продуктивність комбайна (тон/год):

$$P = \frac{M}{H} \quad (5.2)$$

де  $M$  — зібрана маса врожаю,

$H$  — фактичний час роботи.

Вартість одиниці продукції:

$$C_u = \frac{C_{\text{total}}}{M} \quad (5.3)$$

де

$C_{\text{total}}$  — загальні витрати на збір врожаю,

$M$  — маса врожаю.

Економія пального:

$$E_f = V_{\text{fuel}} \cdot P_{\text{fuel}} \cdot \Delta H \quad (5.4)$$

де  $V_{fuel}$  — витрати пального на годину,

$P_{fuel}$  — ціна пального,

$\Delta H$  — зекономлені години роботи.

Економія заробітної плати:

$$E_w = N_{workers} \cdot W \cdot \Delta H \quad (5.5)$$

Де  $N_{workers}$  — кількість працівників,

$W$  — погодинна ставка,

$\Delta H$  — зекономлені години.

Зменшення втрат врожаю:

$$L = M_{loss, old} - M_{loss, new} \quad (5.6)$$

де  $M_{loss, old}$  — втрати врожаю при старому алгоритмі,

$M_{loss, new}$  — втрати при новому алгоритмі.

Загальна економія (грн):

$$E_{total} = E_f + E_w + C_u \cdot L \quad (5.7)$$

Додатковий дохід від зменшення простоїв:

$$R = P \cdot \Delta H \quad (5.8)$$

де  $P$  — продуктивність (тон/год),

$\Delta H$  — економія часу.

Річний економічний ефект:

$$E_{year} = E_{total} + R \quad (5.9)$$

Термін окупності капіталовкладень:

$$T = \frac{K_{invest}}{E_{year}} \quad (5.10)$$

де  $K_{invest}$  — капіталовкладення на впровадження алгоритму.

Нижче наведено порівняння економічних показників збору врожаю за використанням оригінального алгоритму та розробленого нами оновленого

алгоритму. Показники розраховані на умовну ферму з трьома комбайнами та двома зерновими возами, враховуючи продуктивність, втрати врожаю та витрати на робочу силу і пальне.

Таблиця 5.1 – Результати оцінки економічної ефективності

Показник	Оригінальний алгоритм	Оновлений алгоритм	Економія / приріст
Час роботи комбайна (год)	2517,4	2298,6	218,8
Втрата врожаю (т)	118,7	79,5	39,2
Витрати пального (грн)	181 360	165 870	15 490
Витрати на робочу силу (грн)	149 280	137 420	11 860
Продуктивність комбайна (т/год)	5,62	6,08	+0,46
Загальна економія (грн)	–	–	66 540
Річний економічний ефект (грн)	–	–	66 540
Кількість помилково маркованих станів (%)	17,8	9,3	–8,5
Термін окупності капіталовкладень (роки)	–	–	1,47

Оновлений алгоритм демонструє наступні результати: скорочення робочого часу комбайнів майже на 219 годин, зменшення втрат зерна на 39 тонн, економію понад 15 тис. грн на пальному та близько 12 тис. грн на оплаті праці. Загальний річний економічний ефект складає близько 66,5 тис. грн, а термін окупності системи – менше півтора року. Це доводить економічну доцільність впровадження систем точного землеробства на етапі збирання зернових.

## ВИСНОВКИ

Зі збільшенням вимог до точності з боку фермерів та менеджерів, вони шукають інструменти, які допомагають приймати рішення, що не лише економлять час, а й кошти для їхнього життя та обладнання. Щоб полегшити майбутні рішення з використанням попередніх робіт, було створено інструмент, який оптимізує обладнання і налаштований для роботи не лише на ідеальному полі. Розширюючи pipeline та додаючи більш реалістичний огляд і фокусуючись на точності роботи в полі не лише для комбайна та зернового візка, а й для вантажівки, для станів, створених виключно на основі GPS-точок.

Мета щодо підвищення точності для комбайна становить **88%**. Для зернового візка точність **88%**. Для алгоритму моделі з вантажівками загальна точність становить **94%**. Це вважається значним покращенням завдяки точності визначення моментів, коли комбайн збирає врожай проти пересування по полю.

Оригінальний алгоритм мав дуже високу точність, але не враховував рухи в полі, специфіку між подіями розвантаження та транспортними засобами, а також не дозволяв точно визначати, коли можуть виникати вузькі місця. Оригінальний алгоритм мав тенденцію до надмірного маркування *idle*, створюючи більше ідентифікованих вузьких місць, ніж насправді відбувалося.

## Список використаних джерел

1. Dnes, V., Kudrynetskyi, R., & Skibchuk, V. (2020). Методичні засади визначення ефективності використання техніки під час обробітку ґрунту, внесення добрив і сівби ярих культур за енергетичним показником. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering Research*, (24), 77-82.
2. Аулін, В. В., & Замота, О. М. (2017). *Економічна ефективність системи технічного обслуговування і ремонту мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки з елементами прогнозування* (Doctoral dissertation, ТНТУ).
3. Барабаш, Р. І. (2021). *Обґрунтування виробничої структури пунктів технічного обслуговування тракторів ХТЗ* (Doctoral dissertation, Львівський національний аграрний університет).
4. Труханська, О. О. (2020). Підвищення якості ремонту і технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.-Вінниця, 2018.-№ 3 (102)-С. 52-61*.
5. Борисюк, Д. В., & Зелінський, В. Й. (2017). Методика розрахунку економічної ефективності впровадження технічного діагностування тракторів. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*, (5), 135-142.
6. Грицаєнко, Г. І., & Грицаєнко, І. М. (2020). РОЗВИТОК АГРАРНОГО ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ ТА РИНКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ УКРАЇНИ. *Редакційна колегія: ОГ Бондар, доктор юридичних наук, професор*, 105.
7. Адамчук, В., Камінський, В., Булгаков, В., & Надикто, В. (2022). Теоретичне дослідження та розроблення нового показника інтенсивності впливу ходових систем машинно-тракторних агрегатів на ґрунт. *Вісник аграрної науки*, 100(4), 57-63.

8. Адамчук, В., Булгаков, В., Надикто, В., Троханяк, О., & Чорна, Т. (2023). Теоретичне дослідження стійкості руху асиметричного посівного машинно-тракторного агрегату. *Вісник аграрної науки*, 101(5), 57-64.

9. Товстенко, В. (2021). Удосконалення технічного обслуговування та ремонту машинно-тракторного парку в майстерні фермерського господарства «Славутич» Веселівського району Запорізької області: пояснювальна записка до дипломної роботи здобувача СВО Бакалавр.

10. Домуші, Д. П., Яковенко, А. М., Осадчук, П. І., Ліпін, А. П., Житков, С. С., & Павлішин, П. М. (2020). РЕМОНТ ТРАКТОРІВ І АВТОМОБІЛІВ: навч. посібн.: у 2-х кн.–Кн. 1.

11. Іванов, Б. О., & Тітова, Л. Л. (2022). СТАН СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ НАДІЙНІСТЬ ЙОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ. *Збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції «HSEAgro–2022». 8-9 лютого 2022 року. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Науково-виробничий журнал «Промислова безпека», Державна служба України з питань праці. Київ. 2022. 186 с., 119.*

12. Устюянов, П. Д., Домуші, Д. П., Супрунюк, В. П., & Гуславський, А. В. (2022). ОСНОВНІ НАПРЯМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОГО СТАНУ ТЕХНІКИ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКУ АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВ. *науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та*, 309.

13. Лесюк, В. С., & Калініченко, О. В. (2020). ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКУ АГРАРНИХ ПІДПРИЄМСТВ. *Редакційна колегія: ОГ Бондар, доктор юридичних наук, професор*, 274.

14. Василенко, М. О., Шаповал, Л. І., & Соколенко, О. М. (2017). Обґрунтування строків проведення ремонтно-обслуговуючих робіт мобільної сільськогосподарської техніки з використанням стратегії адаптивного технічного обслуговування і ремонту. *Механізація та електрифікація сільського господарства. Глеваха*, 245-255.

15. Галич, І. В. (2019). Аналіз джерел вібрацій та коливань елементів машинно-тракторного агрегату. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, (30), 72-79.

16. Антощенко, Р. В., Лебедев, А. Т., & Антощенко, В. М. (2017). Керування енергетичними витратами машинно-тракторного агрегата. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів»*, (7), 172-179.

17. Адамчук, В., Булгаков, В., Надикто, В., Кюрчев, В., & Камінський, В. (2022). Дослідження впливу ширини захвату машинно-тракторного агрегату на його експлуатаційні показники. *Вісник аграрної науки*, 100(10), 29-36.

18. Антощенко, Р. В., & Антощенко, В. М. (2016). Дослідження енергетичних параметрів функціонування багатоелементних машинно-тракторних агрегатів. *Інженерія природокористування*, (2), 105-112.

19. Сіренко, Ю. В., & Сілюченко, В. М. (2022). ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р.)/ТДАТУ: ред. кол., СВ Кюрчев, ВМ Кюрчев, ВТ Надикто, ОГ Скляр [та ін.]*.– Запоріжжя: ТДАТУ, 2022.–239 с. У збірнику представлені матеріали міжнародної науково-практичної, 56.

20. Бакляк, І. В. (2021). ПЛАНОВО-ЗАПОБІЖНА СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ МАШИН. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*, 465.

## ДОДАТКИ

Додаток А