

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Борисюк Максим Анатолійович

УДК 631.171

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Обґрунтування вибору раціонального напрямку руху
сільськогосподарського агрегату по полю складної
конфігурації**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Борисюк М.А.

Керівник роботи

Дерев'янку Д.А.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Борисюк Максим Анатолійович. Обґрунтування вибору раціонального напрямку руху сільськогосподарського агрегату по полю складної конфігурації. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Розроблена в роботі концепція підсистеми керування напрямком руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації передбачає в підсистемі елемент штучного інтелекту, який дає змогу працювати з базами подій, знань і формування рішень, здатний вибрати з бази знань необхідні математичні моделі, що описують конфігурацію досліджуваного поля, виконати розрахунки, визначити раціональний кут напрямку руху агрегату і передати дані в навігаційну систему машини.

В роботі отримано залежності кута підходу агрегату до межі поля від кута напрямку руху агрегату та кута відхилення межі поля від прямокутної конфігурації дають змогу обчислити раціональне значення кута підходу агрегату до межі поля під час планування сільськогосподарських робіт. Відхилення результатів розрахунку за запропонованими формулами від умовної ширини поля для заданих кутів ліній гону агрегату, отриманих вимірюванням параметрів геометричної моделі поля, не перевищують 2 %, а за польових випробувань – 10,2 %.

Застосування запропонованих рішень дає змогу підвищити продуктивність сільськогосподарських агрегатів під час обробітку сільськогосподарських культур за рахунок вибору раціонального напрямку руху агрегату та більш точного узгодження роботи технологічних і транспортних засобів до 7 %.

Ключові слова: конфігурація, полк, сільськогосподарських агрегат, куд підходу.

ANNOTATION

Bodysuit Maksym Anatoliiovych. Rationale for choosing a rational direction of movement of an agricultural unit on a field of complex configuration.

– *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.

– Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The concept of a subsystem for controlling the direction of movement of agricultural units in a field of complex configuration developed in this work provides for an element of artificial intelligence in the subsystem that allows working with event databases, knowledge and decision-making, is capable of selecting the necessary mathematical models describing the configuration of the field under study from the knowledge base, performing calculations, determining the rational angle of the unit's direction of movement and transferring data to the machine's navigation system.

The dependencies of the angle of approach of the machine to the field boundary on the angle of the machine's direction of movement and the angle of deviation of the field boundary from the rectangular configuration were obtained, which make it possible to calculate the rational value of the angle of approach of the machine to the field boundary when planning agricultural operations. The deviation of the calculation results according to the proposed formulas from the conditional width of the field for the given angles of the machine's headlands obtained by measuring the parameters of the geometric model of the field does not exceed 2 %, and in field tests – 10.2 %.

The application of the proposed solutions makes it possible to increase the productivity of agricultural units during crop cultivation by choosing a rational direction of movement of the unit and more precise coordination of the operation of technological and transport vehicles up to 7 %.

Keywords: configuration, regiment, agricultural unit, approach angle.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМКУ РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО АГРЕГАТУ НА ПОЛЯХ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ.....	17
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	27
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАПРЯМКУ РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО АГРЕГАТУ ПО ПОЛЮ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ.....	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. В Україні відбувається інтенсивне впровадження інноваційних рішень з обробітку сільськогосподарських культур, зокрема з використанням цифрових технологій.

За такого розвитку галузі рослинництва збільшуються врожаї сільськогосподарської продукції, скорочуються терміни польових робіт.

Високоєфективне управління процесами обробітку поля та збирально-транспортними операціями на основі застосування цифрових технологій є перспективним напрямом досліджень і вдосконалення технологій сільськогосподарського виробництва.

Аналіз літературних джерел показує, що близько 30 % полів Житомирської області мають геометричну форму, що відрізняється від правильного чотирикутника [2]. Межі таких полів утворені житловими масивами, господарськими будівлями або природними факторами: ярами, балками, водоймами. Сучасні трактори та комбайни обладнуються системами автоматичної навігації, що дають змогу організувати рух агрегатів із мінімальною кількістю розворотів, тим самим знизити величину холостого шляху і тривалість польових робіт, підвищити продуктивність агрегатів.

Сьогодні для розв'язання задач раціональної роботи сільськогосподарської техніки розробляють різні програмні продукти, призначені для раціонального управління продуктивністю техніки під час виконання сільськогосподарських робіт на польових ділянках довільної конфігурації, що дають змогу формувати і зберігати бази даних координат польових ділянок. індивідуально для кожного користувача на підставі електронних карт і цифрових паспортів полів.

Під час планування обробітку поля складної конфігурації постає завдання визначення раціонального кута напрямку руху (кута гону), що забезпечує мінімальну кількість проходів агрегату, мінімальну кількість розворотів і, як

наслідок, мінімальний холостий шлях агрегату, економію витрат на виробництво сільськогосподарської продукції [1].

З 2017 року йде активне впровадження безпілотних тракторів і сільськогосподарських дронів, які дають змогу виконувати основні сільськогосподарські роботи без участі оператора. Оператор може дистанційно контролювати роботу трактора через комп'ютер або планшет у режимі реального часу, а також налаштовувати нові програми роботи.

Розробники звертають увагу, що такі трактори можуть працювати на одному полі одночасно з іншими сільськогосподарськими машинами, керованими людьми.

Дослідження з використанням елементів інтелектуальних технологій, що дають змогу розробити методику аналітичного обґрунтування раціонального кута напрямку руху агрегатів по полю складної конфігурації, що забезпечує економію витрат на виробництво сільськогосподарської продукції, є актуальними.

Об'єктом дослідження є процеси сільськогосподарських робіт на полях складної конфігурації.

Предметом дослідження є закономірності формування управлінських рішень щодо забезпечення ефективного використання машинно-тракторного парку в умовах полів складної конфігурації.

Мета роботи: підвищення ефективності використання сільськогосподарських агрегатів під час виконання сільськогосподарських робіт на полях складної конфігурації шляхом вибору раціонального напрямку руху.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких **завдань** досліджень:

- сформувати концепцію підсистеми керування напрямком руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації;
- установити залежності для обґрунтування раціонального кута напрямку руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації;

- вивчити закономірності впливу кута підходу агрегату до межі поля складної конфігурації на зміну величини холостого шляху;
- розробити алгоритм і комп'ютерну програму для обґрунтування раціонального кута напрямку руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації, виконати їхню апробацію та підтвердити ефективність запропонованих рішень.

Методи наукового дослідження. Для досягнення поставленої мети та розв'язання завдань використано методи математичного та геометричного моделювання, ситуаційного аналізу, натурні експерименти. Під час проведення розрахунків і опрацювання результатів використовували сучасні комп'ютери та застосовували програмне забезпечення Microsoft Excel, Mathcad.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Дерев'яно Д. А., **Борисюк М. А.**, Заріцький Є. С. Аналіз наявних способів руху сільськогосподарських агрегатів під час виробництва сільськогосподарських культур. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 288-290.

2. **Борисюк М. А.** Концепція підсистеми інтелектуального керування напрямком руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 5-6.

3. Дерев'яно Д. А., **Борисюк М. А.** Аналіз цифрових систем для керування рухом сільськогосподарських агрегатів у полі. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «ЕКАР – пріоритетні напрями розвитку агропромислового виробництва України в умовах

Євроінтеграції»,(22-23 жовтня 2024 року), ІМА АПВ НААН України, Глеваха. 2024. С.

Практична значимість роботи полягає в тому, що розроблені алгоритм і комп'ютерна програма для обґрунтування раціонального кута напрямку руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації дають змогу обґрунтувати раціональну схему руху агрегату під час планування сільськогосподарських робіт і тим самим забезпечити ефективне використання машинно-тракторного парку.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 24 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 53 сторінки комп'ютерного тексту, містить 21 рисунок та 8 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз наявних способів руху сільськогосподарських агрегатів під час виробництва сільськогосподарських культур

Обґрунтований вибір способу руху сільськогосподарського агрегату забезпечує меншу довжину холостого шляху, зменшує втрату часу під час руху, заощаджує витрату палива під час виконання технологічної операції [1-8].

Провівши аналіз літературних джерел, було з'ясовано, що на виконання основної роботи припадає 40...74 % усієї тривалості робочої зміни (на оранку 66...74 %, висівання 55...64 %, садіння 46...51 %, міжрядний обробіток 50...72 %, збирання зернових 40...70 %, збирання картоплі 39...69 %, внесення мінеральних добрив 39...59 %) [1, 22].

Значна частина часу витрачається на повороти, холості переїзди, переїзди із загінки на загінку та інші переїзди залежно від виконання технологічного процесу.

Спосіб руху обирають виходячи з особливостей технологічного процесу та конструкції машин. Із можливих способів руху обирають той, який забезпечує високу якість роботи, максимальну продуктивність, зручність обслуговування, безпеку роботи [2, 22].

У спеціальній літературі проаналізовано й описано наявні способи руху технологічних агрегатів (рис. 1.1) [1-8, 22].

Під час вибору напрямку руху агрегату рекомендується враховувати вимоги до якості обробітку ґрунтового шару, підготовки поверхні поля, загортання насіння. Щоб забезпечити високопродуктивну роботу машин, необхідно передбачити можливість руху агрегату вздовж довгих боків ділянки на підвищеній швидкості, вільного під'їзду до агрегату для розвантаження (завантаження) технологічних ємностей, роботи на схилах без перекидання

машин, добирання полеглих хлібів. Крім того, обов'язково беруть до уваги характер попередніх обробітків, рельєф місцевості та напрям панівних вітрів, особливо в районах, де ґрунти схильні до ерозії [1-4, 22].

Для коригування способу руху технологічної машини рекомендують враховувати схему освоєння робочої ділянки [22].

Для виконання технологічної операції відповідно до прийнятого способу руху ділянку поля розбивають на заїмки. Іноді для більш раціональної організації роботи сільськогосподарського агрегату всередині заїмки виділяють ділянки. На кінцях робочих ділянок для поворотів агрегатів тимчасово виділяють поворотні смуги. Вони відокремлюються контрольними лініями від решти заїмки і слугують орієнтиром для вмикання та вимикання робочих органів машин [1-3].

Поворотні смуги виділяють тоді, коли не можна виконати повороти агрегату поза оброблюваним полем [22].

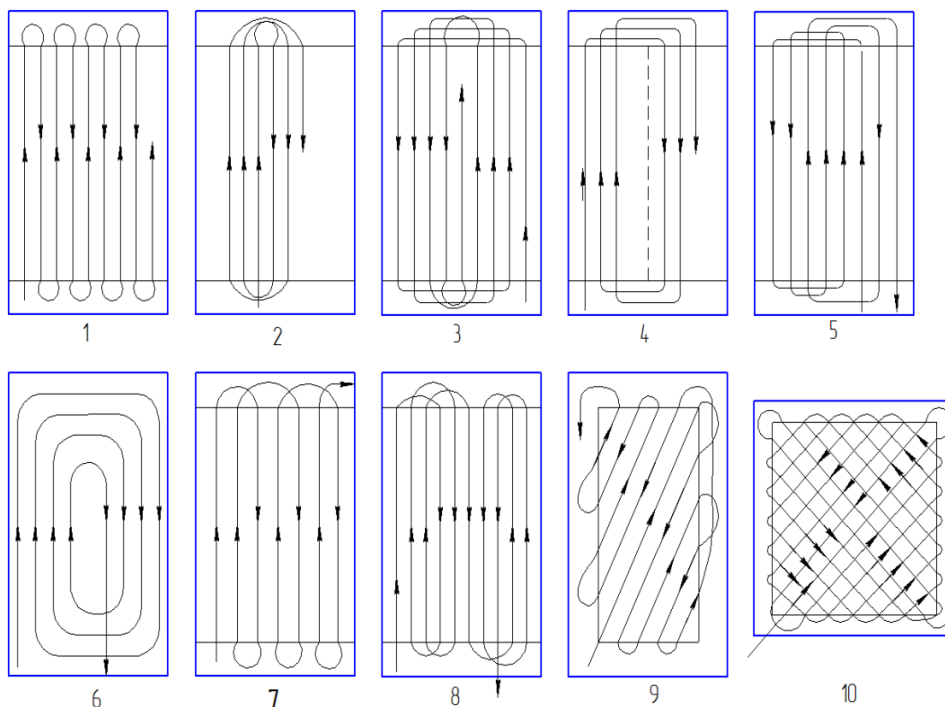


Рис. 1.1. Основні способи руху агрегатів: 1 – човниковий; 2 – всклад; 3 – врозвал; 4 – перекриття; 5 – комбінований; 6 – круговий; 7 – човниковий однобічний; 8 – просапування; 9 – діагонально-човниковий; 10 – діагонально-перехресний [1-6, 22].

У разі обробітку ділянки у двох перпендикулярних напрямках поворотні смуги виділяють із чотирьох боків, з подальшим їхнім обробітком круговим способом [1-5, 22].

Ширина поворотної смуги для сільськогосподарських агрегатів має бути кратна робочій ширині захвату агрегату [22].

Гоновий човниковий спосіб руху техніки не потребує розбивки поля на загони. Залежно від виду холостого повороту гоновий спосіб поділяється на петльовий і безпетльовий [1-4, 22].

Спосіб руху вважається гоновим петльовим, якщо в процесі обробки загороди відбувається хоча б один петльовий поворот. Назви гонових петльових способів руху «всклад» і «врозвал» пов'язані з більш частим їх застосуванням на оранці. Однак ці способи руху можливі й на деяких інших операціях, включно з луценням стерні та дискуванням, боронуванням, посівом зернових (непросапних) культур. Чергуючи способи руху всклад і врозвал під час оранки, майже вдвічі зменшується кількість звальних гребенів і розвальних борозен. При цьому непарні загони обробляють у напрямку зліва направо всклад, а парні – у зворотному напрямку способом врозвал. Довжина шляху холостих переїздів агрегату з однієї загороди на іншу зменшиться [1-8, 22].

Однак вищевказані рекомендації актуальні для обробітку полів правильної (прямокутної) конфігурації, питання обробітку відомими способами руху полів складної геометричної форми залишається відкритим. Для вирішення питання так само необхідно розглянути наявні способи поворотів сільськогосподарських агрегатів [1-3, 22].

1.2. Аналіз цифрових систем для керування рухом сільськогосподарських агрегатів у полі

Використання агронавігаторів допомагає без зусиль вирішувати такі проблеми, як підвищення точності обробітку полів завдяки зменшенню огріхів,

недобір врожайності та низька якість продукції рослинництва. За рахунок рівномірного внесення мінеральних добрив, поливу і посіву вдається найбільш ефективно використовувати площі сільськогосподарських угідь [24].

Навігатори для сільського господарства успішно застосовують для обробітку ґрунтів, посіву зернових і просапних культур, міжрядної культивуації, обприскування і розкидання добрив, при цьому машина точно орієнтується під час робочого ходу [24].

Основним завданням застосування курсовказівників є можливість проходу техніки з навісним або причіпним агрегатом по полю так, щоб кожна наступна смуга була рівно по краю попередньої, за виключенням перекриттів і пропусків.

Для будь-якого тракториста, навіть найдосвідченішого, огріхи в роботі звичні. Найпоширеніші: пропуски під час обробки поля або перекриття. Перший випадок закінчується зростанням бур'янів, що давлять сусідні рядки і знижують якість врожаю. Другий випадок віщує необґрунтовану витрату добрив і насіннєвого матеріалу [1-5].

Фактично обробіток поля виглядає так (рис. 1.2) [24].

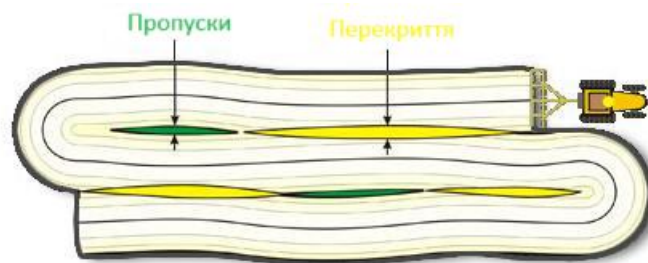


Рис. 1.2. Обробка полів без курсовказівника.

Обробка поля з курсовказівником відображена на рис. 2.

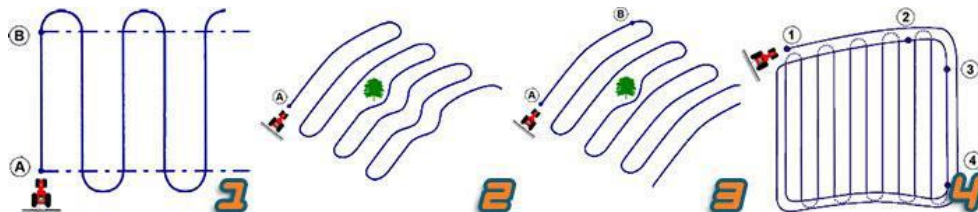


Рис. 1.3. Обробка полів із курсовказівником.

Існують такі переваги застосування агронавігатора в сільському господарстві: забезпечується точний хід і обробка посівів. Курс руху

розраховується і відображається в реальному часі; задається необхідна ширина захвату сільськогосподарським знаряддям (навісу, сівалки, жниварки тощо); наочно видно оброблену площу, зафарбовану на кольоровому дисплеї навігатора, видно пропуски та напуски, завдяки чому забезпечується суттєва економія гербіцидів і палива; техніка переміщується по ідеально прямих або похилих лініях [24].

Точність руху є одним із вирішальних параметрів, вона гарантує виключення огріхів і пропусків під час обробки поля: ефективність проведених робіт завдяки отриманню візуальних і голосових підказок. У разі відхилення від заданого курсу вмикається звукове сповіщення; контроль швидкості руху по полю, підраховується пройдений шлях, навігатор попереджає про перешкоди, що виникають на шляху [24].

У програмі передбачено можливість повернення до точки, звідки необхідно продовжити рух після попередньої обробки. Це дає змогу різній техніці обробляти одне поле в різний час [24].

Підвищення точності обробітку польових ділянок для обробітку продукції рослинництва немислиме без застосування якісних систем позиціонування сільськогосподарської техніки. На відміну від навігаційного обладнання, у технологічній логістиці сільськогосподарського виробництва є деякі особливості, пов'язані з відсутністю заздалегідь визначених траєкторій руху [24].

У зв'язку з цим системи позиціонування техніки в рослинництві поділяються на системи паралельного водіння, гідравлічні автопілоти, підрулювачі [24].

Існують також системи, що забезпечують рух сільськогосподарської техніки суворо по міжряддю, а також забезпечують точне проходження причіпної машини по траєкторії енергозасобу [24].

Розгляд доцільно почати з гідравлічних автопілотів і підрулювачів, які набули нині найбільшого поширення [24].

John Deere: AutoTrac Universal 300, Auto Trac Controller. Систему AutoTrac Universal 300 (рис. 3) менш ніж за півгодини встановлюють як на сучасну, так і на раніше випущену компанією John Deere техніку, а також на машини інших виробників. Істотною перевагою системи є можливість її використання на тихохідних агрегатах зі швидкостями лише 0,5 км/год, тоді як більшість сучасних універсальних систем потребує для функціонування більш високих швидкостей руху [24].



Рис. 1.4. Система підрулювання AutoTrac Universal 300.

Система підрулювання AutoTrac Universal 300 сумісна з дисплеями GreenStar 2, дисплеями GreenStar 3 і Gen 4, а також із приймачами StarFire 6000 і StarFire 3000 (рис. 4) та сертифікована на різній сільськогосподарській техніці [24].

Контролер John Deere AutoTrac характеризується високою універсальністю і може встановлюватися більш ніж на 380 одиниць техніки провідних світових виробників: John Deere, Fendt, Case, New Holland, Deutz-Fahr, Massey Ferguson.



Рис. 1.5. Приймачі StarFire 6000 та StarFire 3000.

Ця система дає змогу ефективно працювати з важкими навісними і причіпними машинами, зводячи до мінімуму їхнє відведення з траєкторії руху.

Надійність системи сприяє підвищенню комфортності роботи оператора і дає можливість здійснювати виконання сільськогосподарських операцій навіть в

умовах недостатньої видимості. Однак недолік цієї системи в тому, що відсутня можливість задати шляховий кут напрямку руху агрегату [24].

Система AFS AccuGuide (рис. 1.6) характеризується високим ступенем точності, не перевищуючи 2,5 см відхилення від наміченої траєкторії руху. За рахунок підвищення точності водіння зводяться до мінімуму непродуктивні втрати насіння, добрив і засобів захисту рослин. За рахунок вибору різних варіантів точного руху по робочій ділянці можна знизити кількість проходів техніки по полю і, як наслідок, зменшити переущільнення ґрунту [24].

Додаткове застосування компенсаційної системи ТЗ™ дасть змогу ефективно виконувати операції під час руху нерівними полями зі складним рельєфом та ухилами



Рис. 1.6. Система контролю управління Case IH AFS AccuGuide.

Для якісного виконання всіляких технологічних операцій у системі закладено обчислення різних шаблонів руху, таких як човниковий і круговий способи руху, режим обробки поворотних смуг [24].

Система складається з навігаційного контролера Case IH AFS AccuGuide™, дисплея AFS Pro 700 і ресивера AFS 372 і може без складнощів перевстановлюватися на трактори Steiger®, Quadtrac®, Magnum™, Puma® і комбайни Axial-Flow® [24].

Система Autopilot™ забезпечує автоматичне керування машиною за рахунок її інтеграції в електрогідравлічний контур. Використання системи дає змогу істотно знизити стомлюваність оператора і вивільнити його для більш якісного управління навісним і причіпним обладнанням. Поворот рульового колеса здійснюється за рахунок вбудованого в рульову колонку електроприводу.

Таке технічне рішення не зменшує місце в кабіні і не обмежує доступ до елементів управління трактора [24].

Система автоматичного водіння Fendt VarioGuide (рис. 1.7) успішно зарекомендувала себе під час використання на понад 1500 одиницях техніки.



Рис. 1.7. Система Fendt VarioGuide з ресивером Trimble® RTK.

Відхилення від заданої точності не перевищує 2 см, що дає змогу ефективно використовувати трактори та самохідну сільськогосподарську техніку в нічний час або за неясної погоди в піковий період. Також зазначена точність знижує ймовірність утворення перекриттів і сприяє економії матеріальних ресурсів [24].

Система може працювати з двома варіантами приймачів NovAtel® або Trimble® з різними варіантами коригувальних сигналів [24].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАПРЯМКУ РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО АГРЕГАТУ НА ПОЛЯХ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

2.1 Концепція підсистеми інтелектуального керування напрямком руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації

Інтелектуальні системи широко застосовуються для автоматичного керування різними функціями сільськогосподарських машин. Переважно вони служать для підвищення ефективності виконання машинами польових робіт.

Здійснювана на сьогоднішній день автоматизація систем управління сільськогосподарськими агрегатами зачіпає одну з її найважливішої функції – це вибір раціонального напрямку руху.

Вибір напрямку руху агрегату на полі, наприклад, під час скошування зернових культур, суттєво впливає на продуктивність агрегату та собівартість робіт. Напрямок руху агрегату може бути заданий біологічними умовами, а саме, полеглистю рослин. Якщо ж фактори, які б наказували обов'язковий напрямок руху агрегату (наприклад, рух агрегату впоперек полежлості рослин) відсутні, то напрямок руху агрегату доцільно вибрати, зважаючи на міркування мінімуму витрат часу та матеріальних засобів на технологічну операцію. У цьому разі одним із завдань інтелектуальної системи керування технологічним процесом збирання є визначення зазначеного вище напрямку руху та доведення його до системи навігації комбайна.

Вирішення цього завдання особливо актуальне під час обробки поля складної конфігурації. На такому полі важко вибрати межу, яка могла б послужити лінією відліку для визначення інших параметрів, кути між лініями меж часто не прямі. Лінії деяких кордонів хвилясті. Умовна ширина поля характерна для кожного кута напрямку руху агрегату. При цьому існують один

або кілька кутів напрямку руху агрегату, за яких умовна ширина поля мінімальна. Рух агрегату в напрямку, що забезпечує мінімальну умовну ширину поля, створює мінімальну кількість проходів і розворотів біля меж поля, економію витрат робочого часу та коштів на обробіток поля.

Функції підсистеми вибору кута напрямку руху сільськогосподарського агрегату на полі складної конфігурації поля полягають у такому.

1. Отримання детальних картограм полів з використанням супутникових технологій і даних з безпілотних літальних апаратів.

2) Аналіз параметрів руху сільськогосподарського агрегату з використанням математичних моделей для розрахунку параметрів ефективності напрямків руху агрегату.

3. Вибір раціонального напрямку руху агрегату на полі складної конфігурації за критерієм мінімальної кількості проходів і розворотів агрегату біля меж поля та передача даних у систему навігації комбайна.

При цьому інтелектуальна система управління має бути здатна реалізувати функції третього шару інтелектуальності: роботи з базами подій, знань і формування рішень. У системі управління має бути присутній елемент штучного інтелекту, який дає змогу вибрати необхідні математичні моделі, що описують досліджувану конфігурацію поля, з блоку бази математичних моделей, наявних у цифровій системі, виконати розрахунки й визначити раціональний кут напрямку руху агрегату та передати дані в навігаційну систему комбайна.

Для обґрунтування напрямку руху сільськогосподарського агрегату по полю складної конфігурації інтелектуальна підсистема керування рухом агрегату повинна мати в базі знань математичні моделі, які описують конфігурацію поля і дають змогу обрати раціональний кут напрямку руху.

2.2 Обмеження при виборі напрямку руху агрегату під час обробітку полів складної конфігурації

Для подальших досліджень необхідно класифікувати технологічні операції за ступенем застосовності пропонованого автором раціонального напрямку руху агрегату. Як приклад взято технологічні карти на виробництво озимої пшениці, ярої пшениці, люцерни.

Аналіз технологічних операцій дасть змогу вибрати операції, які можуть бути проведені без обмеження вибору кута напрямку руху агрегату; операції, на які накладаються обмеження, та операції, на яких недоцільно використовувати пропонований метод.

Операції без обмежень вибору кута напрямку руху.

До таких операцій належать: внесення органічних і мінеральних добрив, внесення гербіцидів і фунгіцидів, скошування трави. Зазначені операції не пов'язані з попередніми операціями і не мають суттєвих агротехнічних обмежень. Вибір раціонального кута напрямку руху дасть змогу домогтися мінімальної кількості проходів і скоротити холостий шлях руху агрегатів. Під час внесення гербіцидів нині активно застосовують дрони сільськогосподарського призначення. Рух дрона не залежить від напрямку рядків і може бути організовано під потрібним раціональним кутом напрямку руху.

Операції, на які накладаються обмеження. До таких операцій належать: оранка, дискування, культивування, посів, збирання.

Обмеження через біологічні умови: бажано деякі сільськогосподарські культури (наприклад, цукрові буряки, кукурудзу) сіяти в напрямку північ-південь. При цьому створюються найкращі умови забезпечення рослин сонячним світлом. Однак, виконати цю умову часто не вдається через підвищені витрати на посів і обробку сходів.

Полеглі хліби рекомендується скошувати під кутом 30...45° до напрямку вилягання. У разі одностороннього суцільного вилягання найдоцільнішим є спосіб руху впоперек вилягання за спрямування колосків праворуч за ходом руху.

Обмеження виникає, коли напрямок руху задається попередньою технологічною операцією. Так, першу весняну культивуацію бажано проводити впоперек оранки або під кутом з метою вирівнювання поверхні поля. За такого напрямку руху трактор переміщається по гребнях і западинах, утворених робочими органами плуга, кабіна розгойдується, що негативно позначається на самопочутті тракториста. Проте, такий спосіб використовується.

Економічний напрямок руху агрегату по полю, так само іноді виступає у вигляді обмеження. Це рух агрегату паралельно довгій стороні поля у формі прямокутника. Ширина поля (коротка сторона прямокутника), визначає кількість проходів агрегату для обробітку всього поля. За такої схеми руху агрегату ширина обробітку мінімальна і, як наслідок, кількість проходів для обробітку всього поля мінімальна і кількість поворотів агрегату на кінцях поля так само мінімальна. Сумарний холостий шлях агрегату для виконання поворотів теж мінімальний.

Отже, втрати робочого часу і витрати палива на непродуктивний холостий шлях агрегату мінімальні.

Ухил поля. Рельєф справляє в сільськогосподарському виробництві всебічний вплив. З рельєфом тісно пов'язаний ґрунтовий покрив, його водно-повітряний і тепловий режими, механічний склад ґрунтів, а отже, агротехнічні властивості та родючість ґрунтів. Рельєф визначає величину стоку поверхневих вод і пов'язані з ними зволоження схилів, розвиток процесів ерозії ґрунтів. Значний вплив рельєф – справляє на продуктивність праці та ефективність використання МТА.

Величина ухилу визначається кутом: за 0,5-1° – слабо похилі рівнини, 1-2° – виражені улоговини; 2-7° – пологі схили: 2-3° – дуже пологі схили, 3-5° –

середньо пологі схили, проте до завдання справжніх досліджень розгляд впливу величини ухилу поля не входив.

Поля з ярами. На таких полях фрагменти ярів впроваджуються в масив поля, обробіток ділянок поля між цими фрагментами порушує геометрію поля. Схема обробітку таких полів має бути побудована з урахуванням обробітку ділянки між цими фрагментами. Це є одним з обмежень під час визначення раціонального кута напрямку руху агрегату.

Операції, на яких недоцільно використовувати пропонований метод.

До таких операцій належать: луцення стерні, боронування, коткування, оформлення поля, причиною є те, що зазначені операції виконуються широкозахватними агрегатами найчастіше у два сліди.

2.3 Вплив напрямку руху агрегату на умовну ширину поля

Під час планування обробітку поля істотне значення має напрям робочих ходів, який визначається вибором напрямку руху сільськогосподарського агрегату. «На практиці найбільшого поширення набула класифікація способів руху за напрямком робочих ходів: гоновий, круговий та діагональний. Рух по діагоналі характеризується переміщенням агрегату під кутом до сторін ділянки».

Діагональний напрямок руху агрегату - це рух, що не паралельний до будь-якої зі сторін поля, а призначений, виходячи з інших міркувань, наприклад, під час весняного боронування з метою закриття вологи.

Діагональний напрямок руху агрегату змінює уявлення про такі традиційні поняття, як довжина і ширина поля (рис. 2.1). Так, якщо рух агрегату буде організовано під кутом до більшої межі прямокутного поля, то максимальна довжина робочого проходу (умовна довжина поля $L_{ум}$) збільшиться.

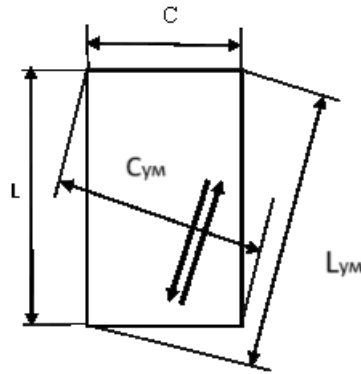


Рис. 2.1. Зміна довжини поля від L до $L_{ум}$ і ширини поля від C до $C_{ум}$ у разі зміни кута напрямку руху агрегату (кута гону) [11].

Умовна ширина поля ($C_{ум}$ для цього напрямку руху агрегату) теж збільшиться. Для того, щоб давати точний опис процесів руху агрегату по полю за призначеного напрямку руху агрегату автором пропонуються такі визначення.

Умовна довжина поля $L_{ум}$ – відстань між паралельними лініями, проведеними з крайніх уздовж руху агрегату точок поля перпендикулярно до лінії діагонального напрямку руху агрегату.

Умовна ширина поля $C_{ум}$ – відстань між лініями, проведеними з крайніх правої та лівої точок поля паралельно до лінії напрямку руху агрегату.

Кут гону φ – кут між напрямком руху агрегату і нульовим напрямком, який автором приймається вздовж довгої прямолінійної межі поля.

Поле складної конфігурації – на такому полі важко вибрати межу, яка могла б послужити лінією відліку для визначення інших параметрів, кути між лініями меж часто не прямі. Лінії деяких меж хвилясті.

Перед фахівцями господарства залишається актуальним завдання вибору напрямку руху сільськогосподарського агрегату під час обробітку такого поля, особливо за використання сільськогосподарських дронів на внесенні пестицидів, гербіцидів, інсектицидів. Напрямок руху дрона не зумовлений напрямком рядків оброблюваної культури, тож залишається можливість вибору напрямку руху агрегату, що забезпечує мінімум витрат.

Для більшості полів складної конфігурації обґрунтування раціонального способу руху агрегату полягає у виборі напрямку руху агрегату, який забезпечує

мінімальні витрати на виконання сільськогосподарської операції. Будемо використовувати припущення, що агрегат рухається по полю строго паралельними лініями гону в заданому напрямку з однаковим кроком між лініями, що дорівнює ширині захвату B_p робочих органів агрегату. Напрямок руху задаємо як кут φ_i гону. Оскільки поле має складну конфігурацію, то зі зміною напрямку руху агрегату (кута гону φ_i між зазначеними лініями) змінюється умовна довжина й умовна ширина поля. Умовна довжина й умовна ширина поля розглядаються для конкретного кута гону φ_i агрегату і є функцією цього кута.

Формули для визначення загальної кількості проходів агрегату для обробітку всього поля та кількості проходів агрегату для обробітку ділянки поля прямокутної форми відомі.

Для поля складної конфігурації за наявності заданого кута напрямку руху агрегату φ_i (кута гону) ці залежності набудуть вигляду:

$$n(\varphi_i) = \frac{C_{ум} \times (\varphi_i)}{B_p} \quad (2.1)$$

$$n_{дiл}(\varphi_i) = \frac{C_{ум}^{дiл} \times (\varphi_i)}{B_p} \quad (2.2)$$

де $n(\varphi_i)$, $n_{дiл}(\varphi_i)$ – загальна кількість проходів агрегату для обробітку всього поля, ділянки поля складної конфігурації за заданого напрямку руху агрегату φ_i ; φ_i – кут заданого напрямку руху агрегату (кута гону).

$C_{дiл}(\varphi_i)$, $C_{ум}^{дiл}(\varphi_i)$ – умовна ширина поля, ділянки поля за заданого кута напрямку руху агрегату (кута гону) φ_i ; B_p – ширина захвату робочих органів агрегату.

Під час вибору раціонального напрямку руху агрегату діагонально-човниковим способом у процесі планування обробітку поля складної конфігурації слід прагнути до такого кута гону агрегату, за якого умовна ширина поля була б мінімальною. Це зведе до мінімуму кількість поворотів агрегату, зменшить непродуктивні холості рухи агрегату, знизить витрати робочого часу та матеріальних засобів на обробіток поля.

2.4 Вплив конфігурації поля на вибір кута напрямку руху агрегату

Для обґрунтування раціонального напрямку руху агрегату автором пропонується аналіз геометричних форм поля з позиції технологічних переміщень агрегату на полі. При цьому як основний ми приймаємо діагонально-човниковий спосіб руху агрегату з подальшим обробітком поворотних смуг. Агрегат переміщується по полю паралельними лініями, всі проходи агрегату паралельні першому проходу.

Під час дослідження технологічних переміщень агрегатів по полю з криволінійною межею автором пропонується спрямовувати криву лінію межі та скласти план обробітку поля технікою, виходячи з прямих ліній.

Криволінійні ділянки, що залишилися, пропонується обробити на заключній стадії під час обробітку поворотних смуг. Систему автоматичної навігації під час обробітку ділянок, що залишилися, не можна використовувати, оскільки крива лінія кордону постійно змінює свій напрямок. Деякі фахівці пропонують для обробітку криволінійних і кутових ділянок поля, що залишилися, використовувати інші агрегати: маневрені, з невеликою шириною захвату робочих органів і без автоматичної системи навігації.

З урахуванням вище сказаного геометричну фігуру поля складної конфігурації можна уявити, як суму простих геометричних фігур: трикутників і чотирикутників, що являють собою ділянки поля.

Обраний напрямок руху агрегату (кута гону) під час обробітку поля має бути єдиним для всіх ділянок поля, а умови повороту агрегату змінюватимуться залежно від кута підходу агрегату до межі поля.

Розглянемо спочатку прості геометричні фігури. Поле трикутної форми. Поздовжні та поперечні межі полів найчастіше нарізаються перпендикулярно один одному. Тому трикутне поле здебільшого утворюється двома прямолінійними перпендикулярними межами (рис. 2.2 а) і третьою межею, що формує гіпотенузу трикутника. Третя межа формується рельєфом місцевості:

ярами, балками, житловими або лісовими масивами та іншими факторами. Можлива конфігурація трикутного поля, коли всі три кути не прямі (рис. 2.2 б).

Напрямок руху агрегату обирається паралельно одній зі сторін. Недоліками трикутної конфігурації поля є необхідність підходу агрегату до межі поля для повороту не під прямим кутом, що змінює порівняно з прямокутним полем параметри повороту агрегату, а також створює складність і трудомісткість обробки кутів поля.

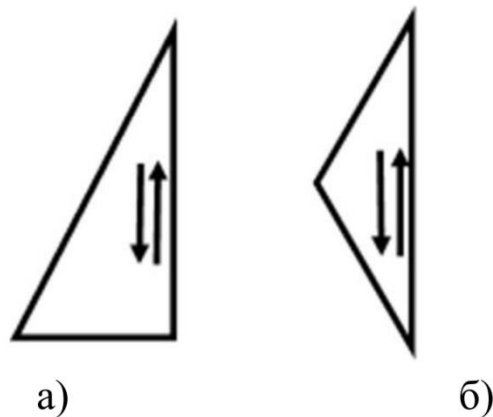


Рис. 2.2. Конфігурація трикутного поля: а – з прямокутними межами; б – з косокутними межами.

Чотирикутне поле може мати різні форми крім прямокутної. Оскільки рух сільськогосподарського агрегату на полі здійснюється по лініях, паралельних лінії першого проходу, розглянемо конфігурації чотирикутних полів, у яких хоча б дві межі утворені паралельними прямими. До таких геометричних фігур належать паралелограм і трапеція (рис. 2.3).

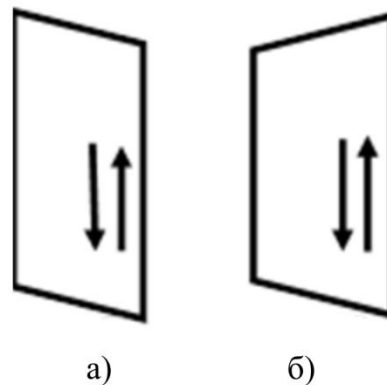


Рис. 2.3. Конфігурації чотирикутного поля з паралельними границями: а – у вигляді паралелограма, б – у вигляді трапеції.

Межі ромба теж утворені паралельними прямими, проте ми розглядаємо цю геометричну фігуру, як окремий випадок паралелограма.

Сільськогосподарський агрегат переміщується таким полем уздовж лінії, паралельної до меж поля. Поворот агрегату має особливості, пов'язані з підходом агрегату до межі поля не під прямим кутом.

Рух агрегату по чотирикутному полю з непрямыми кутами між сторонами теоретично може бути організовано паралельно кожній із чотирьох сторін косокутного чотирикутника.

У всіх випадках косокутний чотирикутник поля розпадається на дві елементарні геометричні фігури: під час руху паралельно межі АБ – на трапецію АБВД і трикутник ВГД; під час руху агрегату паралельно межі АГ – на трапецію АДВГ і трикутник БВД; під час руху паралельно межі БВ – на трапецію БВГД і трикутник АГД; під час руху агрегату паралельно межі ВГ – на трапецію БВГД і трикутник АБД (рис. 2.4).

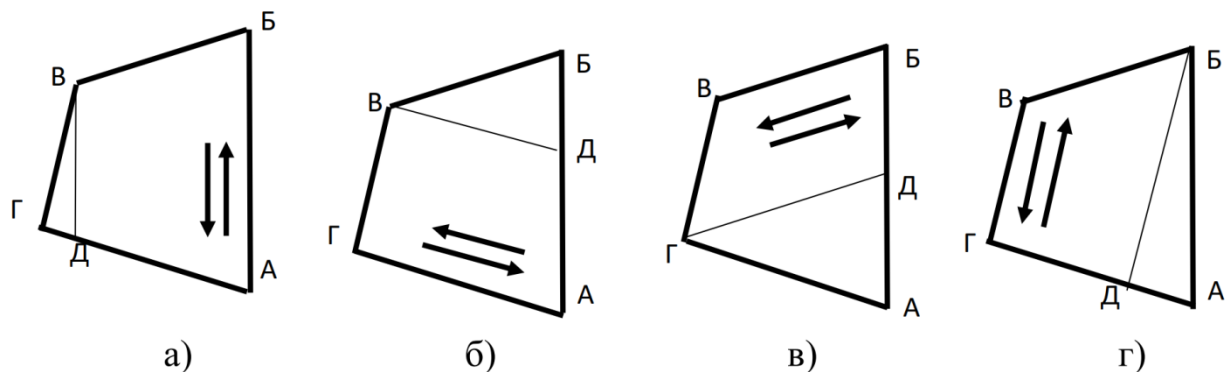


Рис. 2.4. Схема руху агрегату по чотирикутному полю з непрямыми кутами між границями а – паралельно границі АБ; б – паралельно границі АГ; в – паралельно границі БВ; г – паралельно границі ВГ.

Таким чином, якщо поле складної конфігурації сформовано у вигляді косокутного чотирикутника, то на ньому можна виокремити ділянки у вигляді трапеції та трикутників, при цьому підстави трапеції будуть паралельні до лінії напрямку руху агрегату, а трикутні ділянки примикатимуть до підстав.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися за двома напрямками: з графічними моделями полів складної конфігурації та польові випробування на реальному полі під час роботи реальних сільськогосподарських агрегатів. Польові випробування проводилися також з метою адаптації програмно-апаратного комплексу для визначення оптимального способу руху агрегату по полю заданої конфігурації.

Експериментальні дослідження впливу напрямку руху агрегату (кута гону) на експлуатаційні показники агрегату проводилися способом вимірювання умовної ширини графічної моделі поля (електронної карти поля) для кожного експериментально встановленого кута гону. Було обрано три поля, що мають найпоширеніші конфігурації.

Як модель поля № 1 використовували електронну карту реального поля в масштабі 1:11078. Площа поля становить 71 га, площа зображення на електронній карті становить 5921 мм². Межі поля являють собою прямі лінії. Призначалася низка експериментальних кутів гону від 0° до 180° через 5° і для кожного кута визначалася умовна ширина поля та інші параметри.

Експериментальні дослідження умовної ширини геометричної моделі поля № 2 залежно від кута гону проводилися з метою порівняння експериментальних даних з розрахунковими. У процесі експерименту призначали низку експериментальних кутів гону від 0° до 180° через 5° і для кожного кута визначали умовну ширину поля та інші параметри.

Як модель поля № 3 використовували електронну карту реального поля, масштаб 1:9872,37. Площа поля становить 153 га. Поле витягнуте вздовж правого кордону. Права межа являє собою пряму лінію і обмежена лісосмугою. У

верхній частині поля є зовнішній виступ трикутної форми. Умовно верхня межа поля являє собою криву лінію, сформовану дикорослими рослинами. Ліва межа також криволінійна, сформована межами яру. Умовно нижня межа поля прямолінійна і перпендикулярна правій межі. Кут перетину правої та нижньої меж заокруглений. У зоні перетину нижньої і лівої меж поля є яр, який впроваджується в масив поля двома променями.

Експериментальні дослідження геометричної моделі поля №3 виконано для поля, межа якого являє собою складну криволінійну лінію, що містить вузькі криволінійні промені. Призначалася низка експериментальних кутів гону від 0° до 180° через 10° і для кожного кута визначалася умовна ширина поля та інші параметри.

Режими управління сільськогосподарських агрегатів задаються залежно від їхнього типу, якщо агрегат керується водієм, то режими задає водій. У разі використання безпілотних тракторів і дронів режими задаються в програмі управління рухом агрегату і коригуються оператором, який дистанційно контролює роботу трактора через комп'ютер або планшет у режимі реального часу, а також налаштовує нові програми роботи.

Дослідження з обґрунтування раціонального кута напрямку руху агрегату (кута гону) проводилися відповідно до розробленої автором методики.

Як модель поля використовувалася електронна карта поля, або карта поля, отримана зйомкою з квадрокоптера, оснащеного спеціальним знімальним обладнанням. Зручнішим виявилось не підганяти розміри карти до обраного масштабу, а роздрукувати карту на паперовому носії, виміряти отримані розміри меж геометричної моделі поля (карти поля) і обчислити отриманий масштаб. У процесі досліджень з'ясувалося: раціональний для роботи масштаб лежить у межах 1:8000...1:12000.

На карті поля призначали нульову лінію для відліку напрямку руху агрегату переважно вздовж довгої прямолінійної межі. Якщо межі поля криволінійні або утворені короткими відрізками й установити чітку нульову

лінію на геометричній фігурі поля важко, то нульову лінію приймали в напрямку на північний магнітний полюс.

Як задавальний фактор прийнято кут гону – кут між лінією напрямку руху агрегату і нульовою лінією. Напрямок руху агрегату (кут гону) задавали як експериментальний поточний ряд кутів φ_i між нульовим напрямком і експериментальним заданим модельованим напрямком руху агрегату. Крок ряду експериментальних кутів напрямку руху агрегату приймали 5° , діапазон моделювання – від 0 до 180° . Під час комп'ютерного моделювання крок ряду експериментальних кутів напрямку руху агрегату приймали 1° .

На карті поля проводили лінії під заданим кутом напрямку руху агрегату до нульової лінії з крайніх лівої та правої (щодо напрямку руху агрегату) точок ліній контуру поля. Відстань між цими лініями являє собою умовну ширину поля (або ділянки поля) для розглянутого кута напрямку руху агрегату.

Оскільки межа поля найчастіше формується у вигляді хвилястої лінії, то додаткових ділянок може сформуватися кілька. Тоді загальна умовна ширина поля для заданого кута напрямку руху агрегату визначатиметься як сума умовної ширини основної ділянки та ширини всіх додаткових ділянок.

Для кожного значення експериментального поточного кута гону φ_i на карті вимірювали відповідні до цього кута умовну ширину поля $C(\varphi_i)$ і поточні кути $\alpha^{ni\theta}(\varphi_i)$ та $\beta^{ni\theta}(\varphi_i)$ підходу агрегату до межі поля (кути між лінією напрямку руху агрегату та спрямленими відрізками меж поля).

Вимірювання умовної ширини поля $C(\varphi_i)$ виконували лінійкою з ціною поділки 1мм , поточні кути φ_i напрямку руху агрегату та кути $\alpha^{ni\theta}(\varphi_i)$ і $\beta^{ni\theta}(\varphi_i)$ підходу агрегату до меж поля вимірювали транспортиром з ціною поділки 10 . Результати заносили у відповідні комірки матриці результатів вимірювань і представляли в табличній формі або у вигляді графіків.

Польові дослідження сільськогосподарських агрегатів проводилися з метою порівняння результатів теоретичних розрахунків і моделювання з

показниками роботи реальних агрегатів на реальному полі та визначення рівня збіжності результатів.

Для експерименту було обрано поле складної конфігурації. Електронна карта та графічна модель поля (рис. 3.1). Вимірювання проводилися 8го та 9го квітня 2024 року. Площа поля 115,5 гектарів. Довгий прямолінійний бік поля (1584 м) розташований під кутом 23° до напрямку «на північ».

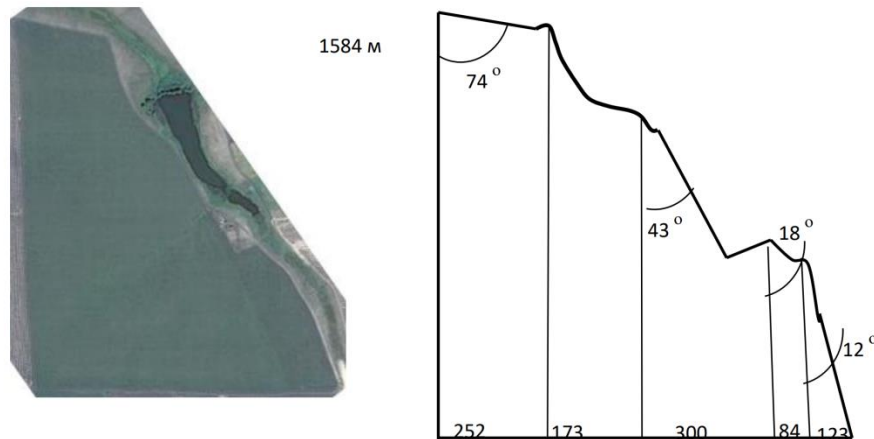


Рис. 3.1. Електронна карта та графічна модель поля.

Короткий прямолінійний бік поля (872 м) перпендикулярний довгій стороні. Права сторона поля обмежена рельєфом місцевості і являє собою хвилясту лінію, на якій є можливість виділити випрямляючі прямолінійні відрізки, розташовані під кутами до напрямку руху агрегату, близькими до кутів, заданих програмою дослідження.

На полі проводилася передпосівна культивування.

Склад агрегату: Трактор John Deere культиватор КПС-12К. Рух агрегату здійснювався човниковим способом уздовж довгої прямолінійної сторони поля. Робоча швидкість агрегату 12 км/год.

Розворот агрегату виконувався в першому випадку біля прямолінійної умовно нижньої межі поля. При цьому кут підходу агрегату до межі поля (кут між лінією напрямку руху агрегату (лінією гону) та умовною лінією межі поля) залишався незмінним і становив $\beta=90^\circ$. Розворот агрегату в другому випадку виконувався біля криволінійної умовно верхньої межі поля і кут підходу агрегату до цієї межі поля мав змінний характер.

На цій кривій лінії знаходили відрізки, які випадково виявилися розташованими приблизно під кутами до напрямку руху агрегату, близькими до кутів, передбачених програмою досліджень. Випрямляючі відрізки фрагментів лінії межі поля сформувалися під такими кутами до напрямку руху агрегату: $\alpha^{\text{під}}=12^\circ$, $\alpha^{\text{під}}=18^\circ$, $\alpha^{\text{під}}=43^\circ$, $\alpha^{\text{під}}=74^\circ$.

Відзначали ці спрямлені відрізки вішками. Відзначали вішками точки переходу від робочого руху агрегату до холостого руху агрегату під час розвороту за місцем підйому робочих органів у транспортне положення та вимірювали відстань від вішки до лінії межі поля. На прямолінійній межі поля за лінію межі поля приймали лінію краю польової дороги. На криволінійній межі поля за лінію межі поля приймали умовний спрямлений відрізок лінії межі поля, позначений вішками.

3.2 Комп'ютерна програма визначення раціонального способу руху агрегату по полю складної конфігурації

Розрахунок функції сумарного шляху руху агрегату L_c від кута орієнтації ліній гону φ_i $L_c(\varphi_{\text{нд}})$ здійснюється за таким алгоритмом (рисунок 3.2).

Перед початком роботи програми необхідно ввести координати точок, що задають межі поля (блок 2). Завдання меж поля здійснюється користувачем шляхом відмічання точок курсором миші на супутниковій карті поля.

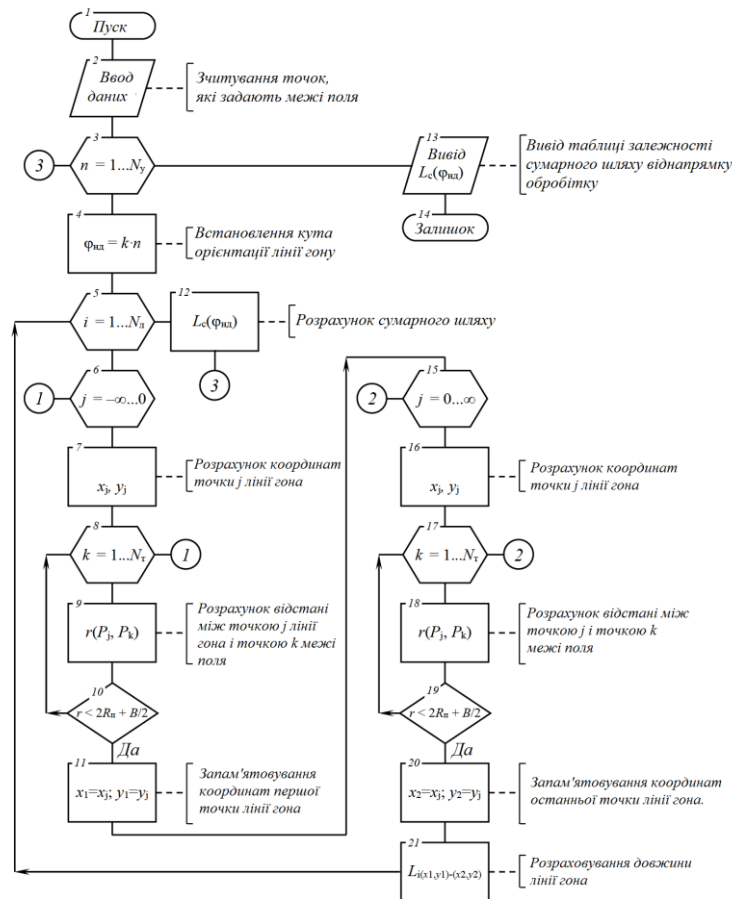


Рис. 3.2. Схема алгоритму

Програма перебирає в циклі (блок 3) дискретні значення кутів орієнтації лінії гону φ_i . Крок дискретизації $k = 1^\circ$ (блок 4) забезпечує досить високу кутову роздільну здатність за прийняттого загального часу опрацювання приблизно 5 хвилин розрахунку на типовому персональному комп'ютері.

Для кожного кута φ_i алгоритм заповнює (блок 5) площу поля паралельними прямими лініями гону в кількості N_l з рівним кроком між лініями. Для кожної лінії гону і розраховується довжина лінії (блоки 6...11 і 15...21), водночас враховується торкання окружності розвороту агрегату і точок меж поля (блоки 8...10 і 17...19). Сума довжин ліній гону L_c являє собою сумарний шлях агрегату під час обробки поля і руху в заданому напрямку ліній гону. Сума L_c запам'ятовується в масив значень, що відповідають заданим кутам орієнтації ліній гону (блок 12).

Після закінчення роботи програми на екран і у файл на жорсткому диску комп'ютера виводиться таблиця $L_c(\varphi_i)$ залежності сумарного шляху руху агрегату L_c від кута орієнтації ліній гону φ_i (блок 13).

За допомогою аналогічних алгоритмів визначаються інші цільові функції $L_x(\varphi)$ і $S_{ог}(\varphi)$. «Програма для визначення оптимального способу руху агрегату по полю заданої конфігурації» призначена для завдання конфігурації поля за супутниковою картою і перевірки різних схем руху агрегату по полю з метою визначення оптимальної схеми руху. Програма дає змогу вказати на супутниковій карті ключові точки поля і під'їзних доріг, задати напрямок переважного руху агрегату.

Програма будує траєкторії руху агрегату з урахуванням розворотів із заданим радіусом на краях поля і підраховує сумарну довжину шляху агрегату. Програма виводить на екран траєкторію руху агрегату та сумарну довжину шляху (рис. 3.3).

Програма розрахована на використання персональних комп'ютерів класу не нижче Pentium 2,6 ГГц, з об'ємом оперативної пам'яті не менше ніж 4 Гбайт. Обсяг вихідного тексту програми становить 12 кбайт. Програму реалізовано в середовищі програмування Delphi 7 мовою Object Pascal для операційної системи Windows 10.

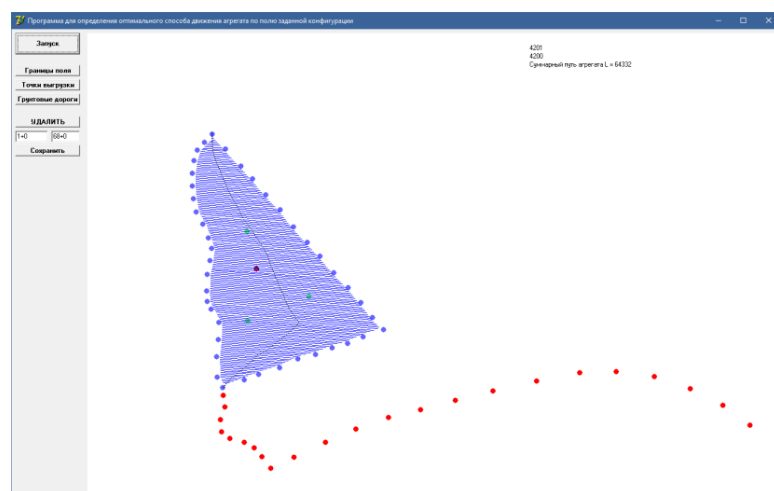


Рис. 3.3. Інтерфейсна форма програми.

За допомогою розробленої програми на супутниковій карті було попередньо відмічено маніпулятором «миша» 42 базові точки, які з достатньою точністю задають конфігурацію поля. Для роботи описаного вище алгоритму проміжки між послідовними точками кордону заповнювалися по 100 додаткових точок. Задана в такий спосіб межа мала високу просторову роздільну здатність для розв'язання локальних задач торкання окружності розвороту агрегату і лінії межі поля.

У табл.3.1 зазначено схеми роботи програми для визначення огріхів під час обробітку поля.

Таблиця 3.1 – Схема роботи програми для визначення огріхів під час обробітку поля

№ п/п	Кут $\varphi_{нд}$	Схема руху відносно кута $\varphi_{нд}$	№ п/п	Кут $\varphi_{нд}$	Схема руху відносно кута $\varphi_{нд}$
1	70°		3	145°	
2	140°		4	178°	

В останньому випадку межа поля суттєво непрямолінійна, і через відсутність обробітку ділянок значної площі відбувається зменшення сумарної довжини руху агрегату, що призводить до формування локального мінімуму на

рівні $L_c = 60,7$ км за $\varphi_{нд} = 178^\circ$. Тому під час вибору раціонального кута напрямку руху враховується як вимога мінімального сумарного шляху, так і максимального обробітку площі поля.

РОЗДІЛ 4
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАПРЯМКУ
РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО АГРЕГАТУ ПО ПОЛЮ
СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

4.1. Результати обґрунтування раціонального кута напрямку руху агрегату методами аналітичного та графічного моделювання

4.1.1. Результати дослідження графічної моделі поля № 1

Результати розрахунку умовної ширини поля № 1 залежно від кута напрямку руху агрегату порівняно з даними вимірювання графічної моделі поля наведено в табл. 4.1. Розрахунки умовної ширини поля №1 виконано за запропонованими автором формулами 2.49...2.82.

Таблиця 4.1 – Умовна ширина моделі поля № 1 залежно від кута гону

Кут гону, град.	Умовна ширина поля, мм		Відхилення	
	Розрахункова	Експериментальна	<i>D</i> , мм	Коефіцієнт варіації σ %
0	139,4936	142	-1,51620	1,2
10	141,0876	144	-1,92432	1,5
20	165,8210	167	-0,18125	0,2
30	185,5367	188	-1,47785	0,9
40	200,7269	202	-0,28345	0,2
50	208,7369	208	-0,2987	0,2
60	210,3867	211	0,398632	0,3
70	205,745	206	0,67524	0,4
80	204,8289	205	0,812276	0,5
90	207,8369	206	0,836498	0,5
100	204,5589	217	-11,4675	5,7
110	221,6276	224	-1,38756	0,7
120	230,1666	232	-0,84511	0,5
130	231,7159	234	-1,29457	0,7
140	226,2269	228	-0,78357	0,4
150	213,8469	217	-2,14628	1,1
160	194,9678	196	-0,00789	0
170	170,2123	172	-0,79258	0,6
180	140,2623	142	-0,74916	0,6

Як графічну модель поля використовували електронну карту реального поля, масштаб 1:11078. Площа поля становить 71 га, площа зображення на електронній карті становить 5920 мм². Межі поля являють собою прямі лінії.

Наочно залежність умовної ширини моделі поля від кута напрямку руху агрегату представлено на рис. 4.1.

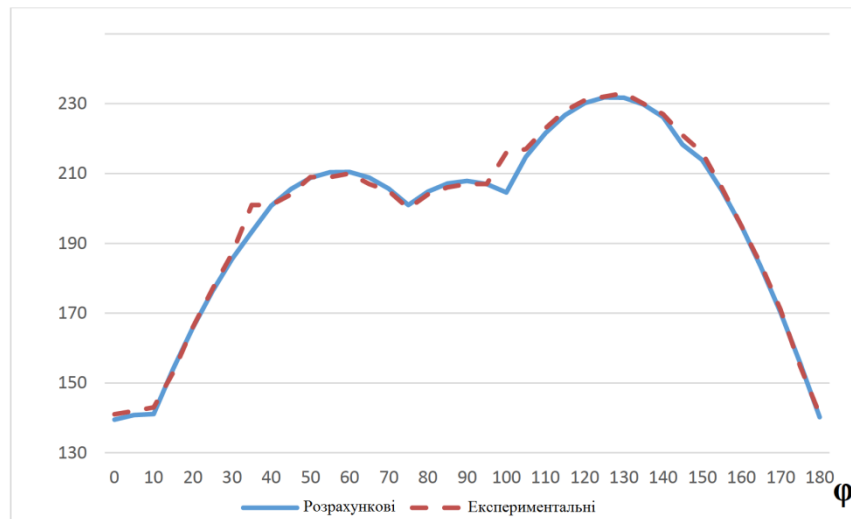


Рис. 4.1. Порівняльні криві залежності умовної ширини моделі поля № 1 від кута напрямку руху агрегату (кута гону).

Мінімальна умовна ширина моделі поля формується за кута гону $\varphi=0^\circ$ та $\varphi=180^\circ$ під час руху агрегату вздовж довгої межі поля і становить $C_{\min}=141$ мм. Умовна ширина моделі поля за кута напрямку руху агрегату $\varphi=75^\circ$ становить $C=201$ мм. Максимальна умовна ширина моделі поля спостерігається за кута напрямку руху агрегату $\varphi=130^\circ$ і становить $C_{\max}=233$ мм.

Відхилення результатів розрахунку за запропонованими формулами залежності умовної ширини поля № 1 від кута напрямку руху агрегату порівняно з даними, отриманими вимірюванням параметрів графічної моделі поля, не перевищують 2 %.

На полі планується збирання трави на сіно двома агрегатами у складі: трактор МТЗ-82.1 з косаркою КРН-2,1Б, ширина захвату робочих органів 2,1 м, робоча швидкість 9 км/год, швидкість холостого руху на поворотах 4 км/год, робоча витрата пального 11 кг/год, витрата палива при холостому ході 5,5 кг/год.

Довжина поворотної лінії визначена за відомими формулами і становить 25 м. Масштаб плану поля №1:11077 Експлуатаційні показники агрегату під час обробітку поля №1 подано в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Експлуатаційні показники обробітку поля № 1 двома агрегатами

Кут гону	0°	75°	130°
Умовна ширина моделі поля, мм	142	202	234
Умовна ширина поля, м	1563	2228	2590
Кількість проходів агрегату	745	1115	1292
Сумарний робочий шлях агрегатів, м	338088		
Сумарний холостий шлях агрегатів, м	18601	27849	32274
Коефіцієнт робочих ходів	0,95	0,93	0,92
Робочий час, год	18,81		
Холостий час, год	2,33	3,49	4,04
Сумарний час роботи одного агрегату, год	21,12	22,27	22,83
Підвищення витрат часу, год/%		1,16/5,5	1,72/8,2
Робоча витрата палива, кг	414,24		
Витрата палива на холостий хід, кг	26,58	39,30	45,39
Сумарна витрата палива, кг	439,82	451,53	457,62
Підвищення витрат палива, кг/%		12,8/2,8	18,9/4,4
Продуктивність агрегату, га/год	1,69	1,58	1,56
Зниження продуктивності, га/год/%		0,08/5,5	0,14/7,8

Аналіз даних показує: мінімальна умовна ширина поля формується за кута гону 0°. З огляду на те, що на полі використовується два агрегати, кількість проходів агрегатів під час обробітку поля мінімальна за кута гону 0о і, як наслідок, сумарний холостий шлях двох агрегатів, час холостого шляху, витрата палива на холостий шлях так само мінімальні. Сумарний робочий шлях двох агрегатів, необхідний для обробітку всього поля, час робочого руху, робоча витрата пального не залежать від напрямку руху агрегату і становлять відповідно 338 км, 18,78 год і 413,23 кг. Коефіцієнт робочих ходів і сумарна продуктивність агрегатів за цього кута гону максимальні: $K=0,95$, $W=3,34$ га/год. Продуктивність одного агрегату становить $W=1,68$ га/год.

Напрямки руху агрегатів із використанням інших характерних кутів підвищують витрати часу на обробіток поля на 5,4 % і на 8,1 %, витрату палива на 2,9 % і 4,3 %, знижують продуктивність на 5,4 % і 7,7 %.

4.1.2 Результати дослідження графічної моделі поля № 2

Поле №2, крім прямолінійних меж, містить у собі дві межі у вигляді кривих ліній. Площа поля №2 становить 147 гектарів, площа чотирикутної фігури графічної моделі поля – 20386 мм². Масштаб сформованої геометричної фігури поля становить 1:8491.

На полі планується передпосівна культивування агрегатом у складі: трактор John Deere з культиватором КПС-12К, ширина захвату робочих органів 14 м, робоча швидкість 12 км/год, швидкість холостого руху на поворотах 5 км/год, робоча витрата пального 32 кг/год, витрата палива при холостому ході 19 кг/год. Довжина поворотних ліній становить 95 м.

Порівняльні результати розрахунку за запропонованими формулами 2,15...2,49 умовної ширини моделі поля № 2 від кута напрямку руху агрегату з даними виміру графічної моделі поля подано в табл. 4.3.

Наочно залежність умовної ширини моделі поля № 2 від кута напрямку руху агрегату подано на рис. 4.2.

З аналізу видно: мінімальна умовна ширина моделі поля $C_{\min}=135$ мм утворюється за кута гону $\varphi_i = 63^\circ$. Максимальна ширина моделі поля $C_{\max}=232$ мм утворюється за кута гону $\varphi_i = 153^\circ$. За руху агрегату вздовж довгої межі поля, коли $\varphi_i = 0^\circ$ та $\varphi_i = 180^\circ$, умовна ширина моделі поля становитиме 204 мм. Найбільше відхилення експериментальних даних від розрахункових формується за кута гону $\varphi_i = 63^\circ$ і становить 12 мм або 6%.

Таблиця 4.3 – Умовна ширина моделі поля № 2 залежно від кута напрямку руху агрегатів

Кут гона, град	Умовна ширина моделі поля, мм	
	Розрахункова	Експериментальна
0	204,2623	203
10	209,2145	208
20	207,7912	207
30	200,0701	201
40	186,5510	186
50	166,9811	168
60	142,3410	144
70	135,0444	141
80	159,9214	157
90	179,9298	177
100	194,547	191
110	203,1457	198
120	205,6168	202
130	215,1145	211
140	226,9298	223
150	231,8659	228
160	229,7390	227
170	220,6276	218
180	204,8269	203

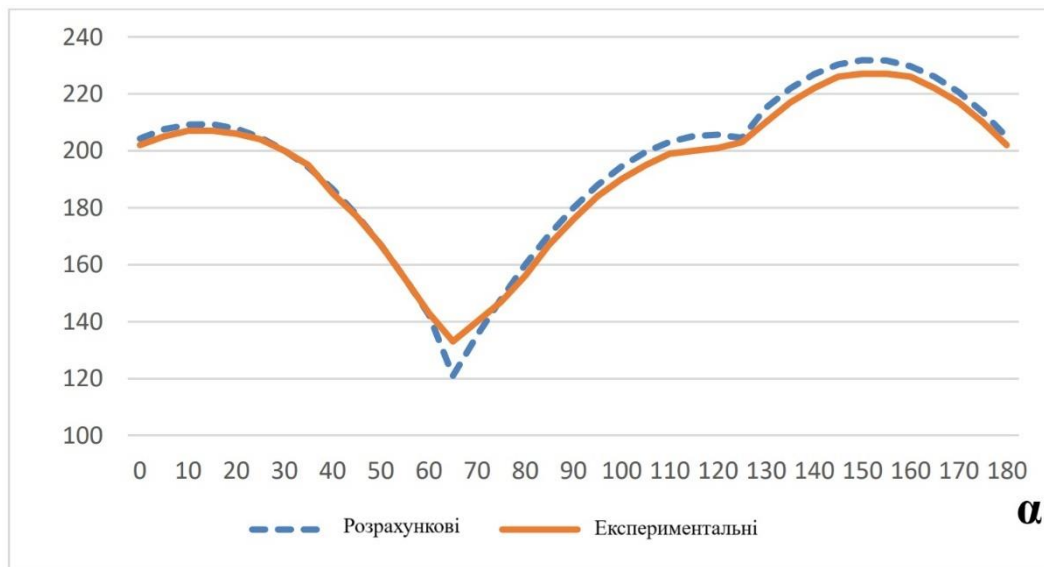


Рис. 4.2. Розрахункова та експериментальна криві залежності умовної ширини моделі поля № 2 від кута гону

Відхилення результатів розрахунку за запропонованими залежностями умовної ширини моделі поля № 2 від кута напрямку руху агрегату (кута гону) від даних, отриманих вимірюванням параметрів графічної моделі поля, не перевищують 6 %.

Експлуатаційні показники агрегату під час обробітку поля № 2 наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Експлуатаційні показники обробітку поля № 2

Кут гону	0°	64°	154°
Кутова ширина моделі поля, мм	205	136	233
Умовна ширина поля, м	1741	1152	1969
Кількість проходів агрегату	125	83	142
Робочий шлях агрегату, м	105000		
Холостий шлях агрегату, м	11783	7794	13389
Коефіцієнт робочих ходів	0,901	0,94	0,89
Робочий час, год	8,76		
Холостий час, год	2,35	1,55	2,67
Сумарний час, год	11,1	10,3	11,42
Відхилення робочого часу, год	0,9		1,13
Відхилення робочого часу, %	7,8		10,9
Робоча витрата палива, кг/год	52		
Витрата палива на робочий час, кг	447,25		
Витрата палива на холостий хід, кг/год	3,6		
Витрата палива на холостий хід, кг	8,23	5,43	9,35
Сумарна витрата палива, кг	455,48	452,68	456,60
Відхилення витрати палива, кг	2,7		3,93
Відхилення витрати палива, %	0,62		0,87
Продуктивність агрегату, га/год	13,3	14,1	12,9
Відхилення продуктивності, га/год	1,1		1,5
Відхилення продуктивності, %	7,05		9,9

Аналіз даних показує: мінімальна умовна ширина поля формується за кута гону 64°. Кількість проходів агрегату під час обробітку поля мінімальна за кута гону 64° і, як наслідок, холостий шлях агрегату, час холостого шляху, витрата палива на холостий шлях так само мінімальні. Робочий шлях агрегату, необхідний для обробітку всього поля, час робочого руху, робоча витрата палива не залежать від напрямку руху агрегату і становлять відповідно 105 км, 8,76 год і

447,25 кг. Коефіцієнт робочих ходів і продуктивність агрегату за цього кута гону максимальні: $K=0,94$, $W=14,1$ га/год.

Робота агрегату за традиційного напрямку руху агрегату - вздовж лінії довгої межі поля ($\varphi=0^\circ$) – призводить до перевищення порівняно з рекомендованим напрямком $\varphi=64^\circ$ затрат часу роботи агрегату на 7,8 %, витрат палива на 0,62 %, зниження продуктивності агрегату на 7,05 %.

Робота агрегату за напрямку руху агрегату, що формує максимальну умовну ширину поля $\varphi=154^\circ$, призводить до перевищення витрат часу роботи агрегату на 10,8 %, витрати палива на 0,86 %, зниження продуктивності агрегату на 9,8 %.

У разі роботи двох агрегатів на досліджуваному полі робота відбуватиметься таким чином.

За точку відліку приймається точка перетину прямолінійних меж поля L_2 і L_4 . Виконується розрахунок раціонального кута напрямку руху агрегату і поділ поля на загінки під раціональним кутом, дані передаються водіям сільськогосподарських агрегатів.

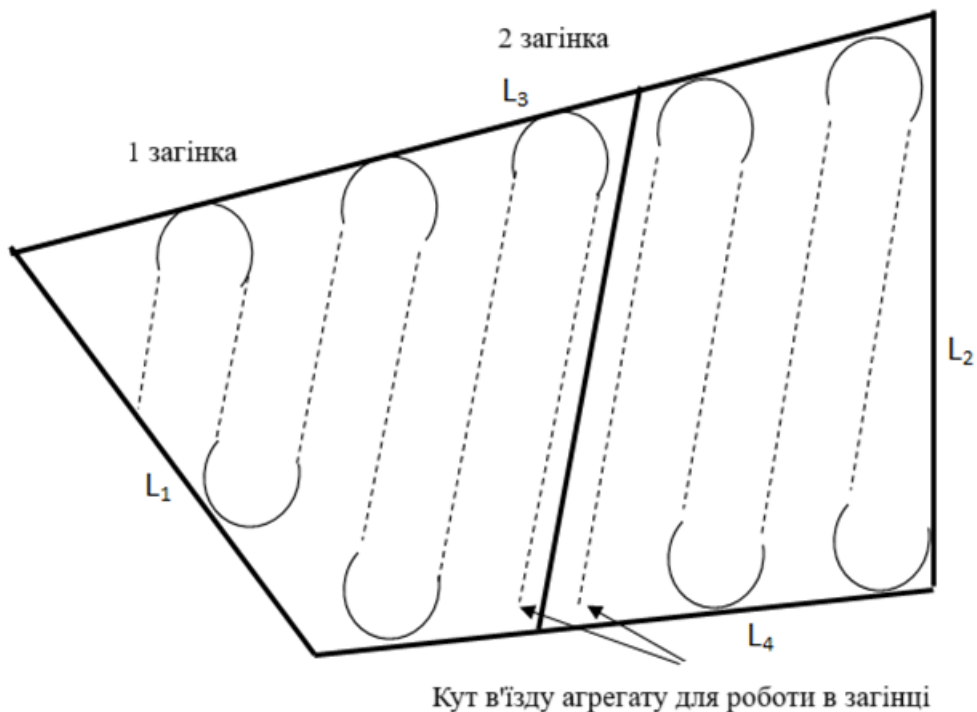


Рис. 4.3. Схема руху двох агрегатів під час роботи в загінках.

По прибуттю на поле кожен агрегат підходить до точки початку першого проходу, передбаченої програмою, і починає рух у загінці під заданим

раціональним кутом човниковим способом. Наприкінці обробітку поля проводиться обробка поворотних смуг і огріхів, що утворилися. На рис. 4.3 показано схему руху агрегатів під час роботи в заготовках

Під час планування сільськогосподарських робіт доцільно виконати аналіз напрямку руху агрегату та визначити перевитрату пального і робочого часу, зниження продуктивності за напрямку руху, що відрізняється від раціонального.

Для порівняння обираємо отриманий у результаті експериментальних досліджень раціональний напрямок, напрямок уздовж довгої прямолінійної межі поля, напрямок за найбільшої умовної ширини поля, які можуть бути задані агротехнічними вимогами.

Як приклад використовуємо графічну модель реального поля, розташованого в Житомирському районі, площа поля становить 153 га. Поле з метою розрізнення позначимо як поле № 3. Супутникову фотографію поля представлено на рисунку 4.4а, електронну карту в масштабі 1:9873 (графічна модель поля) – на рисунку 4.4б. Площа зображення на електронній карті становить 15698 мм².



А

Б

Рис. 4.4. Супутникова фотографія поля – А, графічна модель поля – Б.

Результати визначення умовної ширини графічної моделі поля залежно від кута напрямку руху агрегату (кута гону) подано в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Умовна ширина графічної моделі поля №3 залежно від кута гону.

Кут гону, градус	Ширина моделі, мм	Кут гону, градус	Ширина моделі, мм
0	154	100	175
10	149	110	174
20	139	120	185
30	145	130	193
40	156	140	197
50	161	150	195
60	170	160	188
70	175	170	175
80	175	180	154
90	174		

На полі планується збирання ячменю комбайном ACROS-530, ширина захвату жатки 9 метрів, робоча швидкість 8 км/год, швидкість холостого ходу 5 км/год.

Наочно залежність умовної ширини моделі поля від кута напрямку руху агрегату (кута гону) представлено на рис. 4.5.

Аналіз даних показує: мінімальна умовна ширина поля формується за кута гону 20°.

Експлуатаційні показники обробітку поля № 3 зведено в табл. 4.6.

Кількість проходів агрегату під час обробітку поля мінімальна за кута гону 20о і, як наслідок, холостий шлях агрегату, час холостого шляху, витрата палива на холостий шлях так само мінімальні. Робочий шлях агрегату 170 км, необхідний для обробітку всього поля, час робочого руху 21,25 год, робоча витрата палива 1530 л не залежать від напрямку руху агрегату.

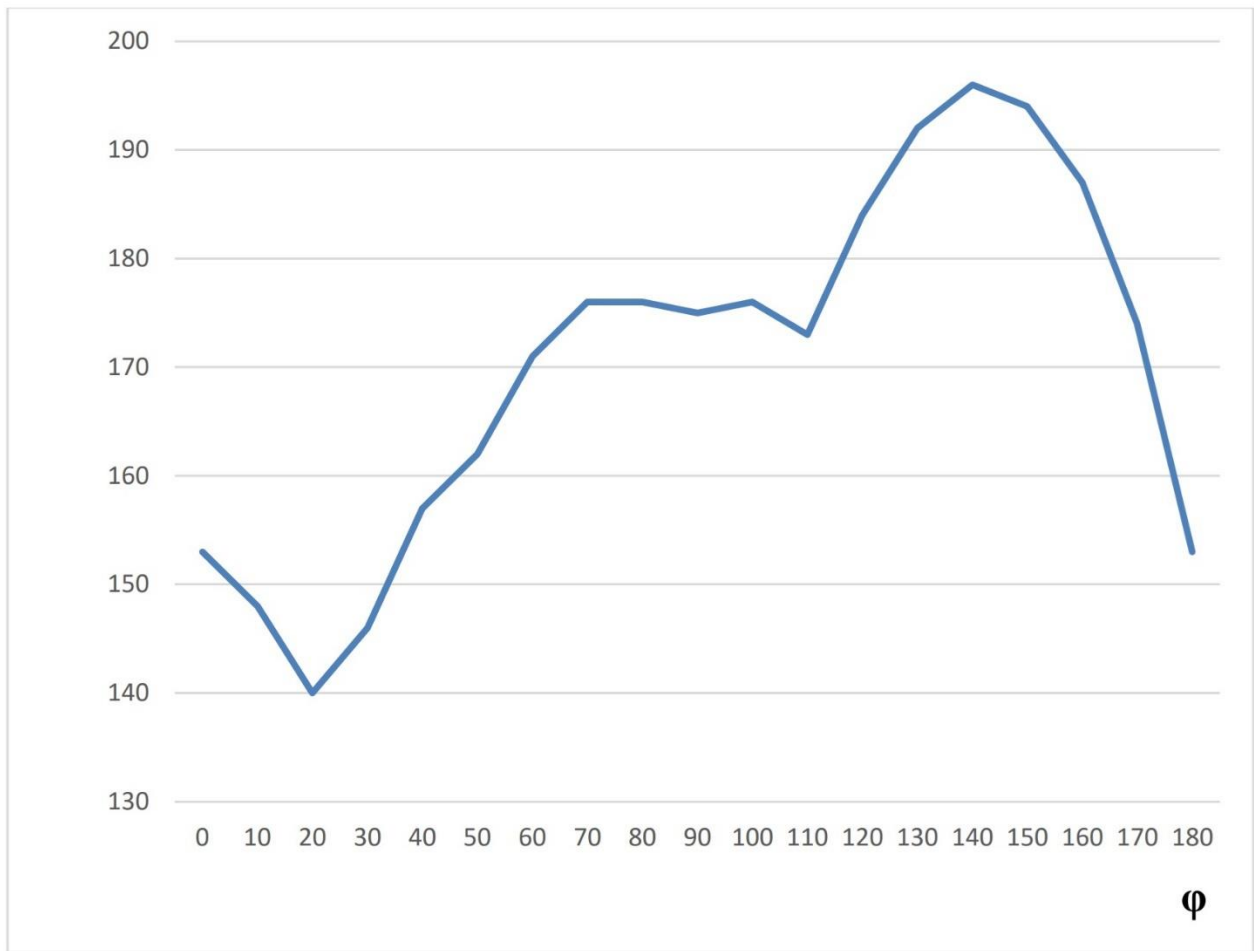


Рис. 4.5. Залежність умовної ширини моделі поля № 3 від кута напрямку руху агрегату (кута гону)

Коефіцієнт робочих ходів і продуктивність агрегату за цього кута гону максимальні: $K=0,946$, $W=6,6$ га/год.

Робота комбайна за традиційного напрямку руху агрегату - уздовж лінії довгої межі поля ($\varphi=0^\circ$) – призводить до перевищення порівняно з раціональним напрямком $\varphi=20^\circ$ затрат часу роботи агрегату на 0,77 %, витрат палива на 0,51 %, зниження продуктивності агрегату на 0,77 %.

Робота комбайна за напрямку руху агрегату, що формує максимальну умовну ширину поля $\varphi=145^\circ$, призводить до перевищення витрат часу роботи агрегату на 3,39 %, витрати палива на 2,24 %, зниження продуктивності агрегату на 3,29 %.

Аналіз напрямку руху агрегатів на полі № 3 показує: вибір раціонального кута напрямку руху дасть змогу незначно знизити витрати часу роботи на 0,77 % і

витрату палива на 0,51 %. На полі з явно вираженою довгою прямолінійною стороною гону доцільно працювати за традиційною схемою - уздовж довгої сторони.

Таблиця 4.6 – Експлуатаційні показники обробки поля № 3

Кут гону	0	20	145
Кутова ширина моделі поля, мм	154	141	198
Умовна ширина поля, м	1509	1379	1945
Кількість проходів агрегату	169	155	217
Робочий шлях агрегату, м	180000		
Холостий шлях агрегату, м	10569	9676	13621
Коефіцієнт робочих ходів	0,95	0,948	0,927
Робочий час, год	21,31		
Холостий час, год	2,12	1,95	2,73
Сумарний час, год	23,37	23,20	23,98
Відхилення робочого часу, год	0,17		0,78
Відхилення робочого часу, %	0,77		3,40
Робоча витрата палива, кг/год	1530		
Витрата палива на робочий час, кг	98	88	126
Витрата палива на холостий хід, кг/год	1628	1618	1656
Витрата палива на холостий хід, кг	8,27		36,25
Сумарна витрата палива, кг	0,52		2,25
Відхилення витрати палива, кг	6,56	6,61	6,39
Відхилення витрати палива, %	0,052		0,218
Продуктивність агрегату, га/год	0,78		3,30



Рис. 4.6 Супутникова фотографія поля № 4.

Як графічну модель поля № 4 використовували електронну карту реального поля, розташованого в Коростенському районі, (рис. 4.6) масштаб 1:6526. Площа поля становить 95 га, площа зображення на електронній карті становить 22307 мм². На полі планується збирання озимої пшениці комбайном АГРОМАШ-3000, ширина захвату жатки 6 м, робоча швидкість 9 км/год, робоча витрата пального 35 л/год, витрата пального на холостий хід 21 л/год.

Результати визначення умовної ширини графічної моделі поля № 4 залежно від кута напрямку руху агрегату (кута гону) подано в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Умовна ширина графічної моделі поля № 4 залежно від кута гону

Кут гону, градус	Ширина моделі, мм	Кут гону, градус	Ширина моделі, мм
0	158	100	172
10	172	110	192
20	183	120	205
30	191	130	212
40	196	140	214
50	195	150	209
60	188	160	198
70	177	170	181
80	164	180	158
90	150		

Наочно залежність умовної ширини моделі поля № 4 від кута напрямку руху агрегату (кута гону) представлено на рис. 4.7.

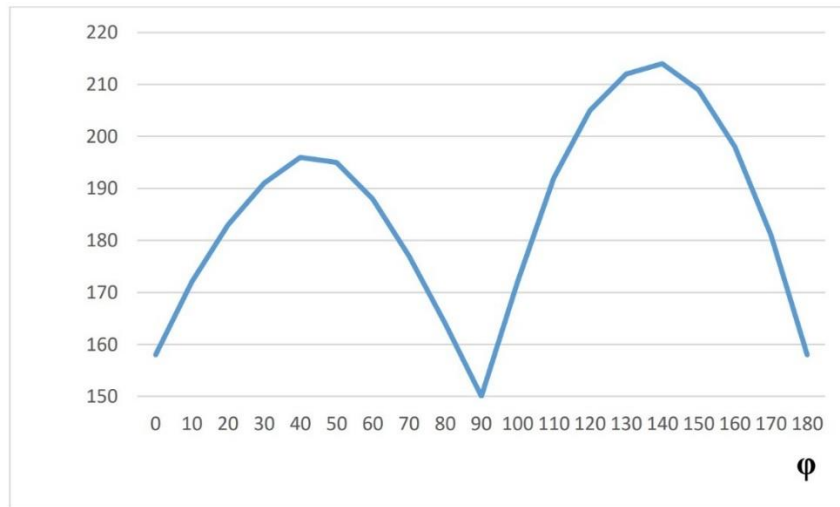


Рис. 4.7. Залежність умовної ширини моделі поля № 4 від кута гону.

Аналіз даних показує: мінімальна умовна ширина поля формується за кута гону 90° . Кількість проходів агрегату під час обробітку поля мінімальна за кута гону 90° і, як наслідок, холостий шлях агрегату, час холостого шляху, витрата палива на холостий шлях так само мінімальні. Робочий шлях агрегату, необхідний для обробітку всього поля, час робочого руху, робоча витрата пального не залежать від напрямку руху агрегату і становлять відповідно 158 км, 17,6 год і 616 л. Коефіцієнт робочих ходів і продуктивність агрегату за цього кута гону максимальні: $K=0,967$, $W=5,09$ га/год.

Робота агрегату за традиційного напрямку руху агрегату – вздовж лінії довгої межі поля ($\varphi=0^\circ$) - призводить до перевищення порівняно з раціональним напрямком $\varphi=90^\circ$ затрат часу роботи агрегату на 0,31 %, витрат палива на 0,19 %, зниження продуктивності агрегату на 0,31 %.

Робота агрегату за напрямку руху агрегату, що формує максимальну умовну ширину поля $\varphi=140^\circ$ (за діагонального напрямку), призводить до перевищення витрат часу роботи агрегату на 2,46 %, витрати палива на 1,51 %, зниження продуктивності агрегату на 2,4 %. На полі № 4 відхилення показників між раціональним і традиційним напрямками не перевищує 1 %, тому можна вважати доцільними обидва ці напрямки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Концепція підсистеми керування напрямком руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації передбачає в підсистемі елемент штучного інтелекту, який дає змогу працювати з базами подій, знань і формування рішень, здатний вибрати з бази знань необхідні математичні моделі, що описують конфігурацію досліджуваного поля, виконати розрахунки, визначити раціональний кут напрямку руху агрегату і передати дані в навігаційну систему машини.

За підходу агрегату до межі поля під гострим кутом холостий шлях збільшується порівняно з обробітком прямокутної ділянки поля на величину недобігу агрегату до межі поля. Отримані залежності кута підходу агрегату до межі поля від кута напрямку руху агрегату та кута відхилення межі поля від прямокутної конфігурації дають змогу обчислити раціональне значення кута підходу агрегату до межі поля під час планування сільськогосподарських робіт.

Відхилення результатів розрахунку за запропонованими формулами від умовної ширини поля для заданих кутів ліній гону агрегату, отриманих вимірюванням параметрів геометричної моделі поля, не перевищують 2 %, а за польових випробувань – 10,2 %.

Застосування запропонованих рішень дає змогу підвищити продуктивність сільськогосподарських агрегатів під час обробітку сільськогосподарських культур за рахунок вибору раціонального напрямку руху агрегату та більш точного узгодження роботи технологічних і транспортних засобів до 7 %.

Доцільно рекомендувати алгоритм і комп'ютерну програму для обґрунтування раціонального напрямку руху сільськогосподарського агрегату по полю складної конфігурації для використання в підсистемі керування напрямком руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації.

Перспективи подальшого розроблення теми полягають у вивченні процесів керування рухом сільськогосподарських агрегатів по полях складної конфігурації

із застосуванням систем навігації, штучного інтелекту для оптимізації реалізованих технологічних процесів за критеріями ефективності використання машинно-тракторного парку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лапін В.І. Експлуатація та ремонт сільськогосподарської техніки: підручник. Київ: Агроосвіта. 2018. 350 с.
2. Ковальчук О.В., Бойко І.М. Теорія і розрахунок машин для обробітку ґрунту. Харків: Колегіум. 2020. 312 с.
3. Копитко В.І., Петренко В.Г. Розрахунок параметрів руху сільськогосподарських агрегатів по полях складної форми. Київ: Аграрна наука. 2017. 284 с.
4. Погорілий В.М., Соловей С.О. Організація ефективного використання МТП у рослинництві. Вінниця: Нова Книга. 2018. 256 с.
5. Іванов І.В., Василенко О.Ю. Основи теорії і практики руху машинно-тракторних агрегатів. Львів: ЛНАУ. 2019. 245 с.
6. Карпенко С.О. Системи точного землеробства та оптимізація руху техніки на полі. Київ: Агропромвидав. 2021. 310 с.
7. Черненко В.І. Основи оптимізації маршрутів машинно-тракторних агрегатів. Харків: Міськдрук. 2017. 320 с.
8. Гринько О.П., Савчук В.М. Технологічні основи застосування тракторних агрегатів у сільському господарстві. Полтава: ПДАА. 2020. 300 с.
9. Шпак І.В., Довгопол В.І. Моделювання і оптимізація роботи сільськогосподарських агрегатів. Черкаси: ЧДТУ. 2019. 280 с.
10. Войтюк С.О., Підгурський В.І. Маршрутизація сільськогосподарських агрегатів. Харків: ХНАУ. 2021. 278 с.
11. Дорошенко Л.А. Ефективність використання сільськогосподарської техніки. Київ: Вища школа. 2017. 320 с.
12. Сидоренко О.П. Сучасні системи керування рухом техніки в сільському господарстві. Одеса: ОНАХТ. 2020. 265 с.
13. Жук В.І. Оптимізація параметрів руху тракторних агрегатів у полі. Вінниця: Нова Книга. 2018. 240 с.

14. Кравченко А.О., Горбачук С.П. Розробка маршрутів агрегатів на полях складної форми. Київ: Освіта України. 2019. 298 с.
15. Васильєв П.О., Даниленко В.М. Теорія і практика експлуатації машинно-тракторних агрегатів. Полтава: ПДАА. 2018. 265 с.
16. Савчук М.В., Іванченко О.П. Ефективність роботи тракторних агрегатів. Львів: ЛНТУ. 2020. 230 с.
17. Гудзенко В.І., Степаненко П.О. Системи навігації та контролю руху сільськогосподарських машин. Харків: ТОР. 2019. 312 с.
18. Пономаренко В.І. Оптимізація енерговитрат при русі агрегатів. Тернопіль: Економічна думка. 2017. 245 с.
19. Лисенко А.О. Рух технічних агрегатів по полях: проблеми і шляхи їх вирішення. Київ: Аграрна освіта. 2021. 290 с.
20. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.
21. Rogovskii I. L., Borak K. V., Maksimovich E. Yu., Smelik V. A., Voinash S. A., Maksimovich K. Yu., Sokolova V. A. Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes T-series. *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1679. 042084.
22. Дерев'янюк Д. А., Борисюк М. А., Заріцький Є. С. Аналіз наявних способів руху сільськогосподарських агрегатів під час виробництва сільськогосподарських культур. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 288-290.
23. Борисюк М. А. Концепція підсистеми інтелектуального керування напрямком руху сільськогосподарських агрегатів по полю складної конфігурації. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти

факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 5-6.

24. Дерев'янку Д. А., Борисюк М. А. Аналіз цифрових систем для керування рухом сільськогосподарських агрегатів у полі. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «ЕКАР – пріоритетні напрями розвитку агропромислового виробництва України в умовах Євроінтеграції», (22-23 жовтня 2024 року), ІМА АПВ НААН України, Глеваха. 2024. С.