

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Брикуля Владислав Андрійович

УДК 631.372:629.11.012.55

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ПІДВИЩЕННЯ КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ
ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА
ШЛЯХОМ ОБЛІКУ СИЛОВОГО ВПЛИВУ ЗІ СТОРОНИ
РОБОЧОГО ЗНАРЯДДЯ**

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
_____ Брикуля В.А.

Керівник роботи

Грудовий Р.С.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Брикуля Владислав Андрійович. Підвищення курсової стійкості прямолінійного руху гусеничного трактора шляхом обліку силового впливу зі сторони робочого знаряддя. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

У магістерській роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення курсової стійкості прямолінійного руху гусеничного трактора шляхом урахування силового впливу з боку робочого знаряддя. Розроблено програмний комплекс для розрахунку силових факторів у зоні контакту гусеничного рушія з ґрунтом при некерованому зсуві з урахуванням пружних властивостей ґрунту, анізотропії взаємодії та відсутності відносного руху бортів, а також для визначення траєкторії руху трактора з урахуванням його некерованого відхилення під дією зовнішніх сил.

Проведено натурні експерименти з дослідження силової рівноваги гусеничної машини, які підтвердили однозначну залежність граничного значення зсувної сили від положення лінії її дії. Обробка осцилограм зовнішньої сили засвідчила принципово різний характер її зміни у випадках поступального та обертального зсуву. Експериментально встановлено, що поступальний зсув під дією сили, прикладеної через центр мас машини, відбувається при критичному куті 21° , що на 4° перевищує його геометричне значення, що підтверджує теоретичні положення щодо повороту годографа граничної зсувної сили внаслідок анізотропії взаємодії ґрунту з гусеничним рушієм.

Доведено, що у разі прикладання зовнішньої сили поза центром мас трактора зсув починається при значно меншій силі порівняно з межею зчеплення та має характер криволінійного ковзання. Розбіжність між експериментальними і теоретичними значеннями граничної зсувної сили не перевищує 6 %, тоді як без урахування анізотропії вона досягає 17 %, що підтверджує необхідність її обов'язкового врахування в розрахунках. За результатами натурних експериментів із оцінки курсової стійкості встановлено, що некероване відхилення гусеничного трактора під дією зовнішньої позацентральної сили виникає лише після досягнення нею граничного значення. Порівняння експериментальних і розрахункових траєкторій руху показало розбіжність у межах 8 %, що підтверджує адекватність запропонованої математичної моделі та доцільність її практичного застосування.

Ключові слова: курсова стійкість, гусеничний трактор, плуг, зсув, траєкторія руху.

ANNOTATION

Brykulya Vladislav Andriyovych. Increasing the directional stability of the rectilinear movement of a tracked tractor by taking into account the force influence from the side of the working tool. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

In the master's thesis, the scientific and applied problem of increasing the directional stability of the rectilinear movement of a tracked tractor by taking into account the force influence from the working tool has been solved. A software package has been developed and registered for calculating the force factors in the contact zone of the tracked tractor with the soil during uncontrolled shear, taking into account the elastic properties of the soil, the anisotropy of interaction and the absence of relative movement of the sides, as well as for determining the trajectory of the tractor's movement, taking into account its uncontrolled deviation under the action of external forces.

Full-scale experiments have been conducted to study the force balance of a tracked vehicle, which confirmed the unambiguous dependence of the limiting value of the shear force on the position of the line of its action. Processing of the oscillograms of the external force has shown a fundamentally different nature of its change in cases of translational and rotational shear. It was experimentally established that the translational displacement under the action of the force applied through the center of mass of the machine occurs at a critical angle of 21° , which is 4° greater than its geometric value, which confirms the theoretical provisions regarding the rotation of the hodograph of the limiting shear force due to the anisotropy of the interaction of the soil with the crawler. It is proved that in the case of applying an external force outside the center of mass of the tractor, the displacement begins at a much lower force compared to the adhesion limit and has the character of curvilinear sliding. The discrepancy between the experimental and theoretical values of the limiting shear force does not exceed 6%, while without taking into account the anisotropy it reaches 17%, which confirms the need for its mandatory inclusion in the calculations. According to the results of full-scale experiments on the assessment of directional stability, it was established that the uncontrolled deviation of the crawler tractor under the action of an external eccentric force occurs only after it reaches the limiting value. Comparison of experimental and calculated trajectories of movement showed a discrepancy within 8%, which confirms the adequacy of the proposed mathematical model and the feasibility of its practical application.

Keywords: directional stability, tracked tractor, plow, displacement, trajectory of movement.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ.....	8
1.1 Актуальність прямолінійного руху тракторних агрегатів.....	8
1.2. Огляд конструктивних рішень, що компенсують некероване відхилення.....	12
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА ВІД ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ.....	15
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	20
3.1 Розрахунок траєкторій руху орного тракторного агрегату.....	20
3.2. Стабілізація курсової стійкості тракторного агрегату.....	23
3.3 Способи цифрового управління траєкторією.....	24
3.4. Конструктивне рішення.....	25
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	29

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах розвитку сільськогосподарського виробництва та інтенсифікації технологічних процесів суттєво зростають вимоги до якості рухових властивостей тракторної техніки. Гусеничні трактори займають провідне місце серед тягових засобів, що використовуються в комплексах з важкими та високопродуктивними робочими знаряддями, завдяки їхній підвищеній прохідності, великій площі опору та кращому розподілу навантаження на ґрунт. Проте одночасно з цим збільшення маси, габаритів та силових впливів від знаряддя спричинює ускладнення динамічних властивостей машини, зокрема зниження курсової стійкості прямолінійного руху.

Курсова стійкість є одним із ключових показників маневреності та ефективності руху гусеничного трактора, що визначає точність виконання технологічних операцій, рівномірність внесення добрив, обробіток ґрунту, посів та інші агротехнічні процеси. Недостатня курсова стійкість призводить до відхилень від заданої траєкторії руху, збільшення витрат пального, нерівномірності виконання операцій та зростання енерговитрат. Особливої уваги ця проблема потребує при взаємодії з важкими робочими знаряддями, що створюють значні бокові та повздовжні сили, які впливають на рухову динаміку трактора.

Сучасні теоретичні та практичні дослідження в галузі машиновикористання переважно зосереджуються на удосконаленні конструкцій гусеничних машин, їхніх гусеничних рушіїв та систем автоматичного регулювання, проте питання комплексного врахування силових впливів від робочого знаряддя для підвищення курсової стійкості залишаються недостатньо вивченими. В умовах широкого впровадження високопродуктивної та автоматизованої сільськогосподарської техніки це створює значні науково-практичні виклики.

Отже, проведення дослідження, спрямованого на розроблення методичних підходів до оцінки та підвищення курсової стійкості гусеничного трактора із врахуванням силових впливів з боку робочого знаряддя, є важливим етапом підвищення ефективності, точності і надійності експлуатації тракторної техніки. Результати такого дослідження можуть мати практичну цінність для конструкторських бюро, науково-дослідних установ та сільськогосподарських підприємств і сприятимуть підвищенню продуктивності та економічності сучасних технологічних процесів.

Мета дослідження – оцінити силовий вплив з боку робочого знаряддя на курсову стійкість гусеничного трактора при виконанні робочих операцій.

Завдання дослідження:

Розробити модель руху гусеничного трактора з врахуванням можливого некерованого відхилення від заданого прямолінійного курсу.

Провести експериментальні дослідження для оцінки адекватності теоретичних положень.

Запропонувати практичні заходи щодо реалізації отриманих результатів дослідження.

Об'єкт дослідження – рух гусеничного машинно-тракторного агрегату з урахуванням взаємодії робочих знарядь з ґрунтом при виконанні технологічних операцій.

Предмет дослідження – некероване відхилення гусеничного машинно-тракторного агрегату під дією зовнішніх сил з боку робочого знаряддя.

Методи наукового дослідження. Опис формування силових факторів у контакті гусеничного рушія з ґрунтом виконано на основі математичної теорії тертя. Математичне моделювання руху здійснено з використанням методів теоретичної механіки, диференціального та інтегрального числення. Розробка програмних комплексів проведена з використанням сучасного комп'ютерного пакету MathCad.

Верифікація основних теоретичних положень, математичної моделі руху і прийнятих припущень проводилася безпосереднім експериментальним дослідженням. Для обробки експериментальних результатів застосовувалися методи математичної статистики і теорії ймовірності.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Брикуля В. А. Розрахунок траєкторій руху орного тракторного агрегату. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 42-45.

2. Грудовий Р.С., Брикуля В.А. Актуальність прямолінійного руху тракторних агрегатів Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 623-627.

3. Грудовий Р.С., Брикуля В.А., Шевчук О.А. Огляд конструктивних рішень, що компенсують некероване відхилення руху трактора. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

Практична значущість. Представлено практичні рекомендації та технічні рішення щодо розробки тензометричної установки в системі кріплення робочого знаряддя до трактора для вимірювання її силового впливу.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 25 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 31 сторінку комп'ютерного тексту, містить 21 рисунок.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ

1.1 Актуальність прямолінійного руху тракторних агрегатів

Усі машинно-тракторні агрегати більшу частину своєї роботи виконують під час руху в прямолінійному напрямку [1]. При цьому відхилення від заданого курсу призводить до зниження продуктивності та якості виконаної роботи. У зв'язку з цим курсову стійкість слід розглядати як актуальний аспект під час проектування нових і модернізації наявних тракторних агрегатів [2].

Під час руху будь-якого машинно-тракторного комплексу на нього з боку ґрунту діють зовнішні сили. І якщо силовий вплив з боку рушія забезпечує необхідний рух тракторного агрегату, то дія з боку робочого знаряддя часто його порушує та призводить до некерованого відхилення від заданого курсу [2]. Рух машинно-тракторного агрегату загалом являє собою сукупність керованого та некерованого рухів. Керований рух забезпечується оператором машини, тоді як некерований є наслідком дії зовнішніх сил з боку робочого знаряддя. У цьому випадку оператор машинно-тракторного агрегату змушений постійно коригувати керуючі дії [2].

Позацентрові сили з боку робочого знаряддя часто спостерігаються під час роботи будівельно-дорожньої техніки [2]. Класичним прикладом може слугувати робота автогрейдера під час укладання та розширення дорожнього полотна (рис. 1.1). У цьому випадку робоче знаряддя винесене убік, і сила опору, що діє на нього, здатна розвертати машину [1].

Некероване відхилення під дією зовнішніх сил з боку робочого знаряддя спостерігається також під час роботи землерийної техніки – наприклад, у бульдозера під час роботи з перекосом відвала (рис. 1.2), у рихлильника та корчувальника за навантаження на крайній зуб, а також у екскаватора під час бокового зміщення стріли [1].



Рис. 1.1. Робота під час укладання та розширення дорожніх узбіч.



Рис. 1.2. Робота бульдозерного агрегату з перекосом відвала [2].

Поперечне зміщення зовнішнього навантаження створює розвертальний момент, здатний відхилити машину від заданої траєкторії [1]. Аналогічна ситуація спостерігається під час розчищення доріг від снігу. Через поворот відвала та нерівномірне накопичення сніжної маси результуюча зовнішня сила опору зміщується ближче до краю відвала (рис. 1.3). Однак некероване відхилення від заданого курсу спостерігається не завжди й залежить від величини зовнішніх зсувних сил [2].



Рис. 1.3. Робота снігоочисного трактора з поворотним відвалом.

Питання курсової стійкості набувають найбільшої актуальності для тракторних агрегатів сільськогосподарського призначення, оскільки якісний

обробіток ґрунту є першим кроком до отримання високого врожаю [1]. Наприклад, для збереження прямолінійного курсу руху під час роботи з оборотним плугом оператору доводиться коригувати напрям руху приблизно через кожні сто метрів шляху [2].

Сучасне землеробство включає різноманітні технології передпосівного обробітку ґрунту. Однак основним способом і досі залишається традиційна оранка відвальним плугом, яка становить 30–35% усіх енергетичних витрат у польоводстві [2]. Технологія з обертанням орного шару не лише підрізає та загортає бур'яни на глибину, недосяжну для проростання, але й забезпечує перемішування шарів ґрунту, захищає від збудників інфекцій і позитивно впливає на подальший ріст і розвиток рослин [2].

Нормальна сила опору, що виникає на лемішній поверхні відвального плуга, відхиляється від повздовжньої осі трактора на кут $15...25^\circ$. Оскільки лінія її дії часто не проходить через центр мас тракторного агрегату, вона здатна відхиляти машину від заданого напрямку руху внаслідок виникнення розвертального моменту [2].

Крім того, невідповідність між шириною захвату плуга та шириною трактора зумовлює асиметричність плужних агрегатів, що додатково погіршує проблему курсової стійкості трактора (рис. 1.4) [2].



Рис. 1.4. Трактор з лемішним плугом під час оранки

Для збереження прямолінійного руху оператору доводиться постійно коригувати напрямок машини. У колісних тракторів вплив на кермо здійснюється

15–20 разів на кожні 100 метрів шляху. У гусеничних тракторів вплив на важіль керування фрикціоном відбувається через кожні 4–6 метрів ходу агрегату. Це призводить до підвищення втомлюваності оператора, зниження продуктивності роботи на 10–15% та збільшення зносу вузлів трансмісії [2].

Некероване відхилення може спостерігатися і під час роботи з роторним або дисковим плугом, оскільки воно зумовлене поворотом робочих органів відносно повздовжньої осі трактора (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Трактор з роторним плугом [2].

Ще одним прикладом дії позацентрної зовнішньої сили з боку робочого знаряддя є сільськогосподарський трактор із консольною косаркою (рис. 1.6) [2].



Рис. 1.6. Трактор із консольною косаркою.

Бокове зміщення косарки призводить до бокового зміщення сили опору робочого знаряддя, що може викликати відхилення траєкторії його руху. Для забезпечення необхідної якості роботи оператор тракторного агрегату змушений виконувати додаткові робочі проходи, щоб обробити пропущені ділянки. У свою чергу це призводить до додаткового переуцільнення ґрунту, що негативно впливає на його якість [2].

Зменшення переуцільнення ґрунту можливо досягти шляхом збільшення площі контакту рушія з поверхнею землі, що зумовлює широке застосування гусеничних рушіїв із цією метою. Наприклад, під час оранки – як найбільш енергоємної операції – використання гусеничної техніки є найдоцільнішим [2].

Таким чином, питання курсової стійкості руху є актуальними практично для всіх тракторних агрегатів. Порушення курсової стійкості призводить до необхідності постійного коригування управління машинно-тракторним агрегатом, що підвищує втомлюваність оператора, знижує продуктивність технологічного процесу та сприяє підвищеному зносу вузлів трансмісії. Необхідність постійного контролю за збереженням заданого курсу машини ставить завдання розроблення систем керування, які компенсують дію зовнішніх сил. Для цього потрібно дослідити рух машинно-тракторного агрегату з урахуванням зовнішніх сил з боку робочих знарядь [2].

1.2. Огляд конструктивних рішень, що компенсують некероване відхилення

Оскільки питанням курсової стійкості вже давно приділяється значна увага, існує низка технічних рішень, призначених для стабілізації прямолінійного руху.

В роботі [1] запропонував додатковий підкермовувальний пристрій, який безпосередньо впливає на орган керування (рис. 1.7). Запропонований механізм являє собою додаткову зубчасту передачу і призначений для підкермовування колісного трактора [3].



Рис. 1.7. Підкермовувальний пристрій [3].

В роботі [2] запропоноване конструктивне рішення для поліпшення керованості руху трактора на підвищених швидкостях (рис. 1.8) [2].

Стабілізатор дозволяє збільшити бічні реакції ґрунту, тим самим забезпечуючи можливість прямолінійного руху. Однак питання щодо раціональної глибини занурення та параметрів (діаметра) запропонованого пристрою залишилося невивченим [3].

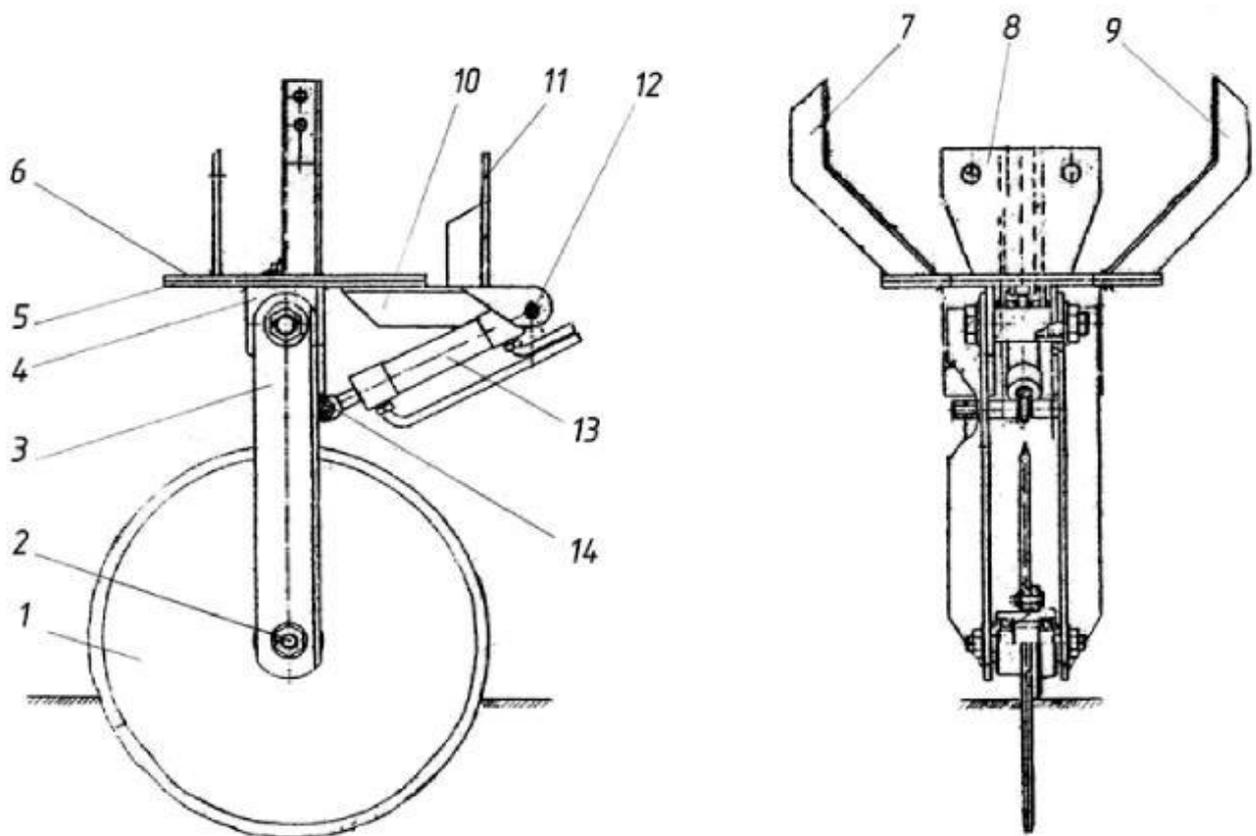


Рис. 1.8. Стабілізатор прямолінійного руху трактора [3].

Аналогічний пристрій, що підвищує опір боковому некерованому відхиленню коліс трактора від заданої прямолінійної траєкторії, описано в роботі [3] (рис. 1.9) [3].

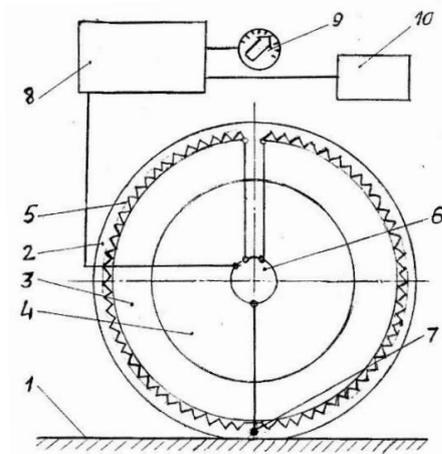


Рис. 1.9. Спосіб підвищення зчеплення шин трактора з ґрунтом [3].

Механізм дозволяє регулювати глибину занурення, яка може коригуватися оператором безпосередньо на місці. Такий спосіб авторами розглядається як гідна розробка порівняно з іншими конструктивними методами підвищення зчеплення [3].

Незважаючи на велику кількість запропонованих технічних рішень, усі вони стосуються конструкції робочого знаряддя окремо від базової машини, що, на нашу думку, є не зовсім правильним. Відсутність повноцінних досліджень некерованих відхилень машинно-тракторного агрегату під дією зовнішніх позацентрових сил дала змогу сформулювати мету та завдання дослідження [3].

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА ВІД ПРЯМОЛІНІЙНОГО РУХУ

На даному етапі експериментальних досліджень була проведена оцінка курсової стійкості руху тракторного агрегату під впливом позацентрального зовнішнього зусилля. Результатом досліджень було вимірювання траєкторії руху та оцінка відхилення від заданого прямолінійного курсу залежно від зовнішньої зсувної сили. Метою експериментальних досліджень була оцінка адекватності математичної моделі руху тракторного агрегату з некерованим відхиленням від заданого прямолінійного курсу під дією зовнішньої позацентральної сили.

Натурні випробування проводилися на прямолінійній ґрунтовій доріжці, попередньо розміченій через кожні 10 метрів. Зовнішній опір створювався за допомогою дослідної самохідної лабораторії на базі ДЕТ-250. Лабораторія чіплялася до крайнього зуба розпушувача, що забезпечувало позацентрову зовнішню силу (рис. 2.1).

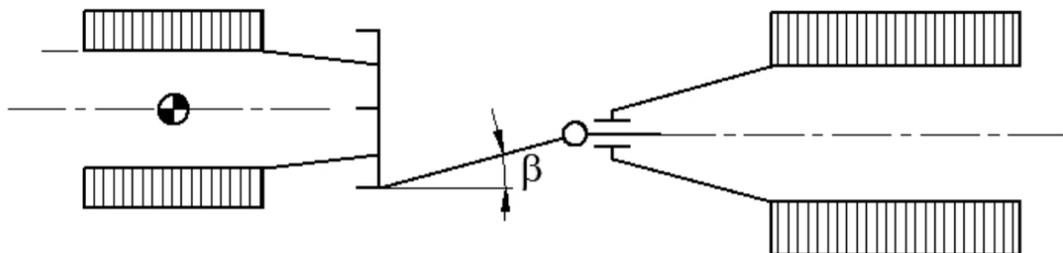


Рис. 2.1. Схема експерименту з відведення трактора.

У процесі експерименту трактор рухався прямолінійно при незмінних керуючих параметрах. Рух тракторного агрегату здійснювався на нижчій передачі з постійною швидкістю (0,39-0,45 м/с). Вимірювання бічного відхилення Δy від наміченого прямолінійного напрямку проводилося в процесі руху шляхом установки фішок по краю гусениці трактора. Вимірювання лінійних розмірів проводився за допомогою рулетки з похибкою вимірювання $\pm 0,5$ мм. Всього було проведено шість дослідів.

Будь-яка сила характеризується трьома параметрами: модулем, напрямком і точкою прикладання. Точка прикладання (крайній зуб розпушувача) в процесі експерименту залишалася незмінною і мала зміщення 0,9 метра відносно поздовжньої осі трактора.

Величина зовнішнього тягового опору P записувалася на осцилограму. Лабораторія забезпечувала значення зовнішнього опору в діапазоні від 20 до 100 кН, що становить від 8 до 40% ваги трактора.

Максимальне зусилля опору (≈ 100 кН, що становить близько 42% від ваги трактора) спостерігалось в 6 досліді, а мінімальне (≈ 25 кН, що становить близько 10% від ваги трактора) – в 5 досліді.

Раніше було доведено, що для кожної лінії дії існує єдине значення граничної зсувної сили. Експериментально напрямок лінії дії зовнішнього зусилля вимірювався за допомогою кута β нахилу каната відносно поздовжньої осі трактора (рис. 2.1). Вимірювання проводилися без зупинки (по ходу руху). Похибка вимірювання становила $\pm 0,5$ градуса.

Геометрія руху представлена на рис. 2.2-2.4.

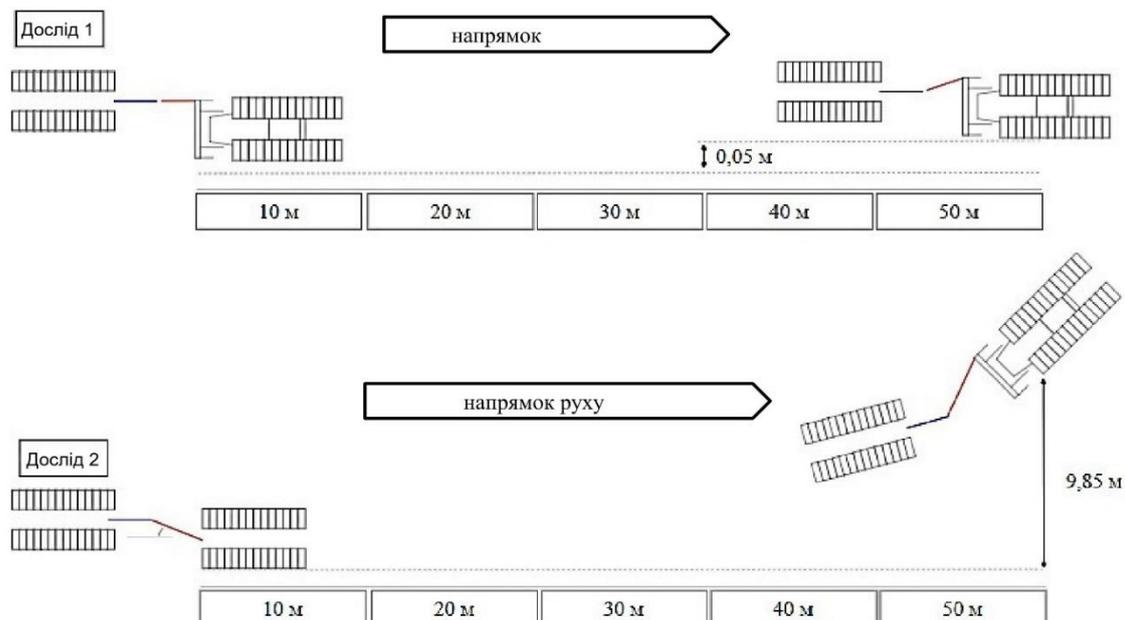


Рис. 2.2. Геометрія руху (дослід 1 і 2).

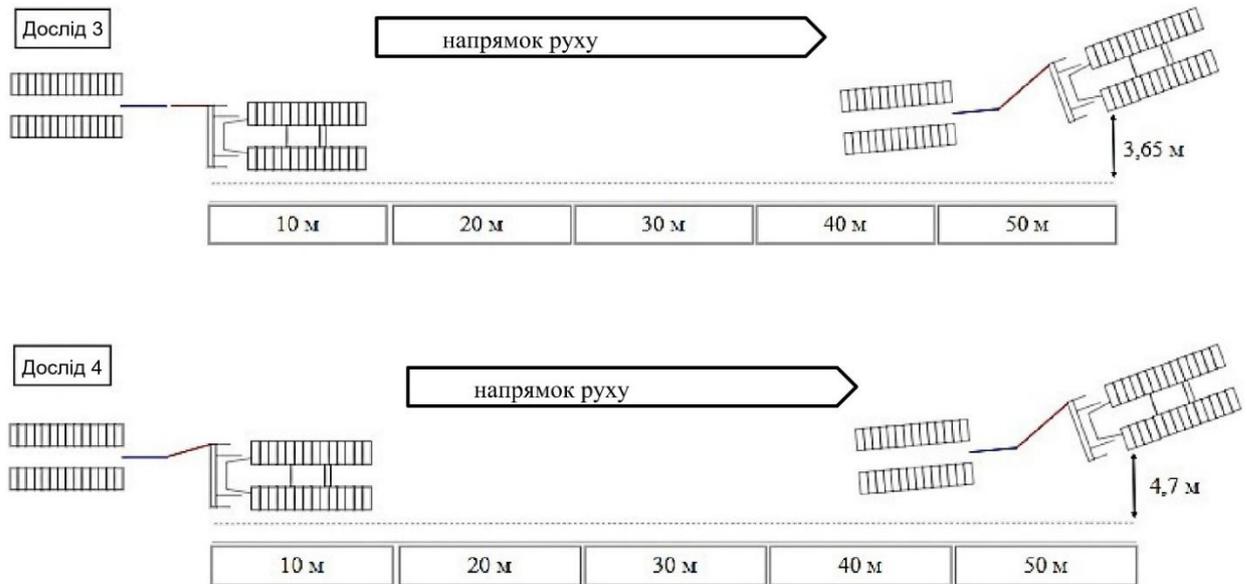


Рис. 2.3. Геометрія руху (дослід 3 і 4).

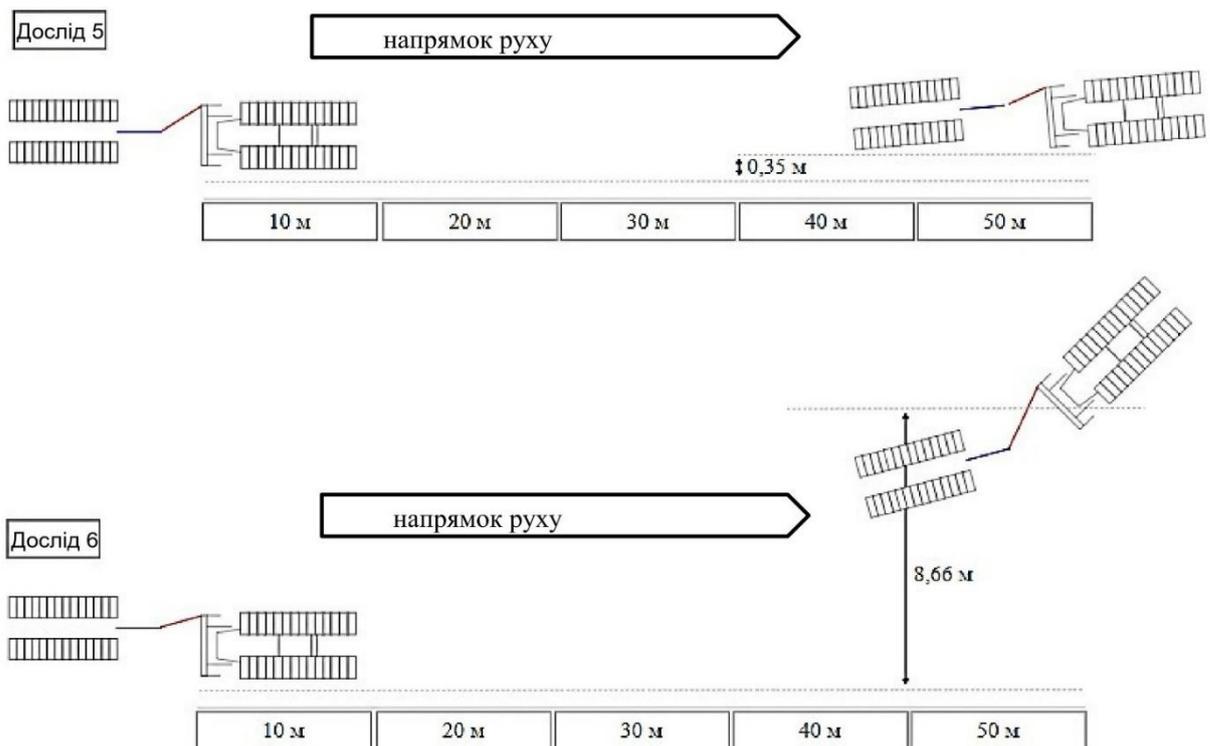


Рис. 2.4. Геометрія руху (дослід 3 і 4).

З шести проведених дослідів у двох з них бічне відхилення практично відсутнє. Відхилення в досліді 1 не перевищило 5 сантиметрів за 30 метрів пройденого шляху, а в досліді 5 – всього 35 сантиметрів відповідно за той же шлях. Тому ці досліді з обробки були виключені.

За експериментальними даними були побудовані апроксимуючі криві траєкторії руху трактора. Близькість експериментальних результатів до апроксимуючої кривої при нелінійній залежності оцінювалася коефіцієнтом Пірсона.

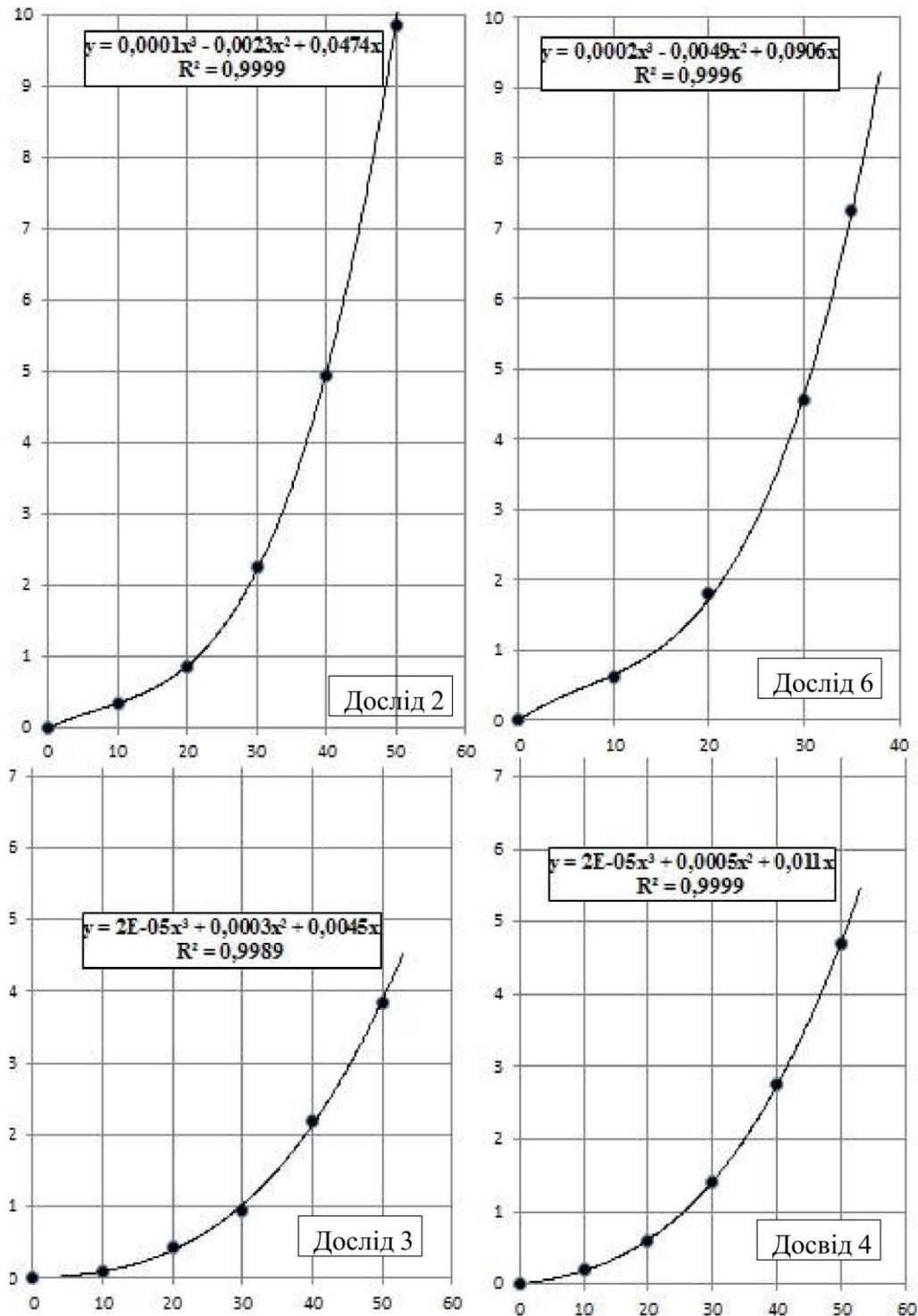


Рис. 2.4. Експериментальні траєкторії руху трактора з позacentровим зовнішнім навантаженням.

Висновки по розділу

Експериментально підтверджено, що відхилення від заданого курсу має місце тільки в разі, коли зовнішня сила досягає свого граничного значення. З шести дослідів у двох дослідах, де зовнішній опір не перевищував 12,5% ваги трактора, бічне відхилення було відсутнє.

При керованому прямолінійному русі і дії зовнішнього позацентрового навантаження експериментальні траєкторії є криволінійними, що підтверджує теоретичне положення про некерованому миттєво-обертвому ковзанню, викликаному силою з боку робочого знаряддя.

Експериментальні траєкторії руху апроксимовані поліномами третього порядку, що підтверджує змінний радіус кривизни і квазістатичність математичної моделі. Максимальні відхилення експериментальних значень від ліній тренду не перевищили 8,8%, що відповідає хорошій якості проведення експерименту.

Адекватність математичної моделі оцінювалася за величиною бічного відхилення. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями не перевищила 5,5%, що знаходиться в межах похибки самого експерименту і підтверджує адекватність моделі.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розрахунок траєкторій руху орного тракторного агрегату

Оскільки найбільшу актуальність відхилення від прямолінійного руху мають сільськогосподарські машинно-тракторні агрегати, на основі розробленого програмного комплексу було проведено розрахунки траєкторії руху з оборотним плугом (рис. 3.1) [1].

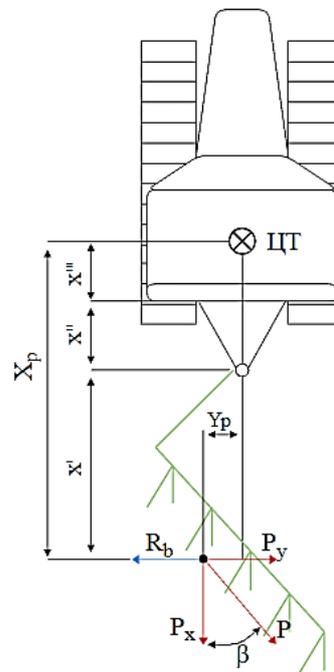


Рис. 3.1. Розрахункова схема для визначення відхилення сільськогосподарського трактора від прямолінійної траєкторії за рахунок дії сил на плузі [1].

Поздовжня координата зовнішньої сили на робочому знарядді визначалася так:

$$X_p = x' + x'' + x''', \quad (3.1)$$

де x' – відстань від точки кріплення плуга до трактора до точки прикладання результуючої зовнішньої сили з боку ґрунту; x'' – відстань від

ведучої зірочки трактора до точки кріплення робочого обладнання; x''' – відстань від ведучої зірочки трактора до центра мас трактора [1].

Як базові машини було обрано три вітчизняні трактори різних тягових класів: Т-70, ДТ-75 та Т-150 (рис. 3.2). Технічні характеристики тракторів наведено в табл. 3.1 [1].



Рис. 3.2. Гусеничні сільськогосподарські трактори, обрані для розрахунку: а) Т-70; б) ДТ-75; в) Т-150 [1].

Таблиця 1 – Технічні характеристики тракторів

Трактор	Маса трактора, кг	Ширина гусениці, м	Коля	База	x'' , м	x''' , м
Т-70	4160	0,2	1,35	1,895	0,78	1,2
ДТ-75	5700	0,39	1,33	1,612	0,96	1,05
Т-150	8500	0,4	1,33	1,8	0,87	1,1

Як робочі знаряддя були розглянуті плуги (рис. 3).

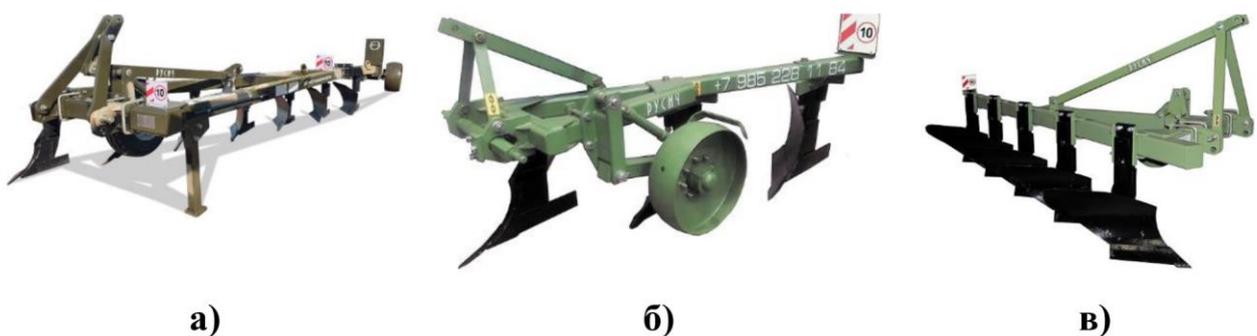


Рис. 3.3. Плуги, обрані для розрахунку: а) ПЛН 6×35; б) ПЛН 3×35; в) ПЛН 5×35.

Згідно з інформацією, наданою виробниками, кут нахилу лемішної поверхні становить $\beta = 22^\circ$. Розрахунок проводився в програмі. У результаті були побудовані траєкторії руху тракторних агрегатів під час оранки, що підтверджують відхилення від прямолінійної траєкторії (рис. 3.4–3.6) [1].

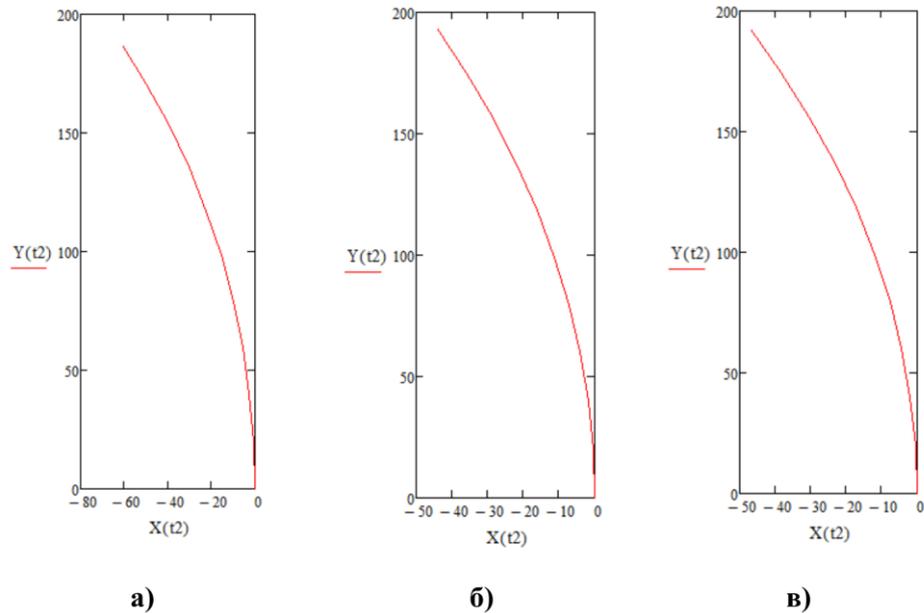


Рис. 3.4. Траєкторії руху машинно-тракторного агрегату у складі трактора ДТ-75 з плугом: а) ПЛН 3×35; б) ПЛН 5×35; в) ПЛН 6×35 [1].

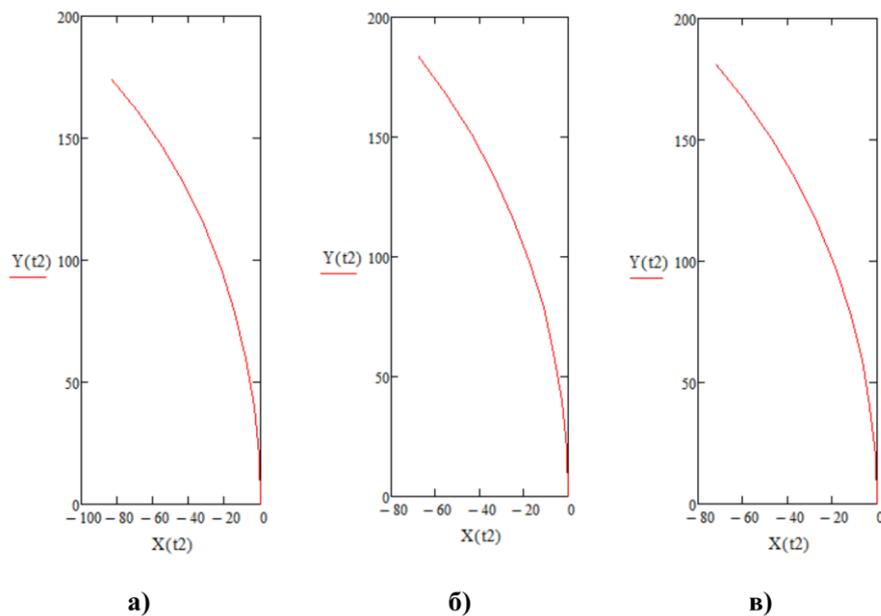


Рис. 3.5. Траєкторії руху машинно-тракторного агрегату у складі трактора Т-70 з плугом: а) ПЛН 3×35; б) ПЛН 5×35; в) ПЛН 6×35 [1].

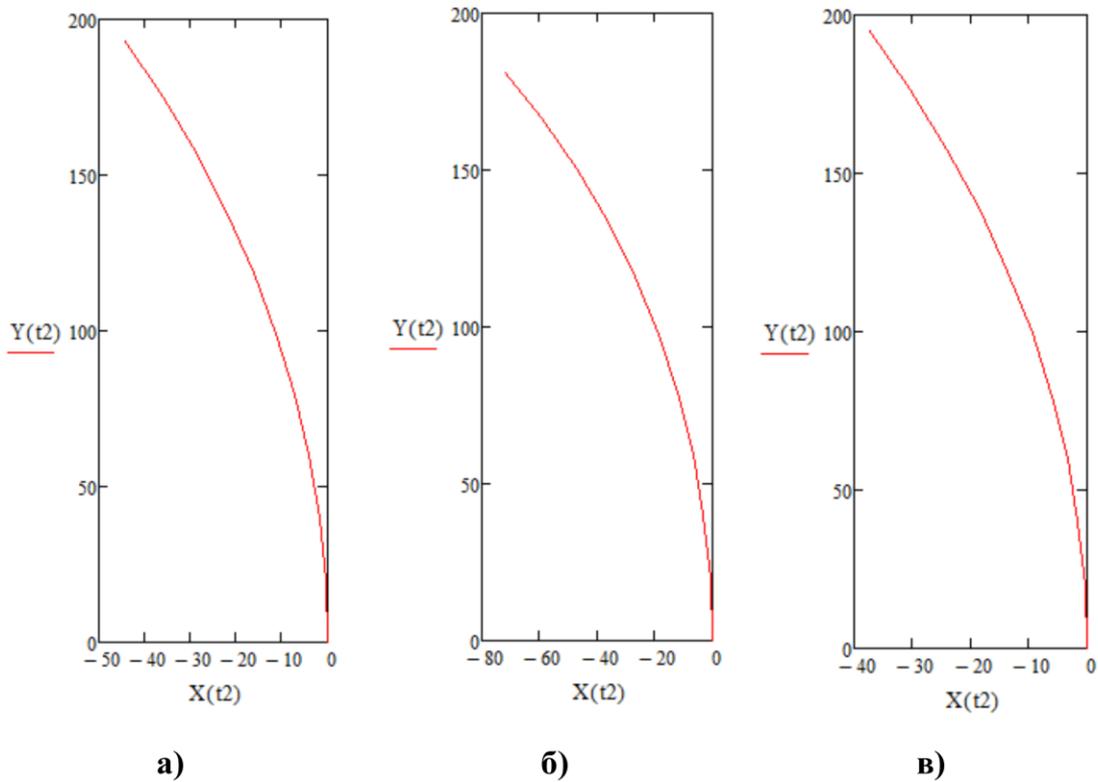


Рис. 3.6. Траєкторії руху машинно-тракторного агрегату у складі трактора Т-150 з плугом: а) ПЛН 3×35; б) ПЛН 5×35; в) ПЛН 6×35 [1].

3.2. Стабілізація курсової стійкості тракторного агрегату

Питання стабілізації прямолінійного руху машинно-тракторного агрегату при виконанні ним технологічного процесу є актуальними. Існують різні заходи, що дозволяють впливати на курсову стійкість трактора:

- рекомендації щодо сумісності механізмів і машин;
- різні конструктивні рішення;
- кваліфікаційні рішення (оператора);
- автоматизовані системи.

З'явилися рекомендації щодо кріплення робочого знаряддя до базової машини, спрямовані на зниження негативного впливу опору на курсову стійкість машинно-тракторного агрегату [3]. В силу ряду економічних причин (нестача

тракторів потрібного класу, поява нових робочих знарядь та ін.) ці рекомендації не завжди виконуються.

Для вирішення поставленої проблеми збереження курсової стійкості розроблені різні конструктивні рішення, починаючи з модернізації існуючих робочих знарядь і закінчуючи додатковими пристроями до них [6, 7,]. Однак, всі вони не базової машини і не дозволяють коригувати траєкторію в разі її порушення.

Кваліфікація оператора дозволяє скорегувати траєкторію в будь-який момент в потрібному напрямку незалежно від причини відхилення. Однак, це призводить до додаткової його стомлюваності і, як наслідок, втрати якості управління.

Використання автоматизованих систем є найбільш раціональним методом вирішення в сучасних умовах, коли все більше уваги приділяється безпілотним транспортним засобам.

3.3 Способи цифрового управління траєкторією

В даний час, найбільш широкое поширення отримав зовнішній контроль за траєкторією руху машини. Як правило, для цього використовуються два принципово різних способи цифрового управління:

- штучний зір (реперні точки, образи перешкод тощо);
- супутникова навігація (GPS).

Обидва способи базуються на початковій побудові програмної траєкторії та подальшому коригуванні реального руху, використовуючи зворотній зв'язок.

В якості зворотного зв'язку, як правило, виступають координати або швидкість рухомого об'єкта [3, 4, 5]. Однак, такий спосіб не враховує причину втрати курсової стійкості, а контролює тільки її наслідок.

Оскільки машинно-тракторний агрегат контактує з ґрунтом за допомогою рушії і робочого знаряддя, то можливі дві причини втрати курсової стійкості:

1. зміна параметрів ґрунту під рушієм (різне зчеплення по бортах машини, несподівана перешкода на одному з бортів тощо);

2. позацентрове зусилля з боку робочого знаряддя.

Зовнішній вплив з боку рушія в основному є випадковим і не підлягає прогнозуванню. Існуючі наукові дослідження цього явища [4, 5] показали, що непоганий результат досягається шляхом контролю бортових швидкостей.

Однак, даний підхід абсолютно не враховує сили з боку робочих знарядь, які носять системний характер [7]. У зв'язку з цим, нами було запропоновано розширити канал зворотного зв'язку за рахунок врахування силового впливу з боку робочого знаряддя.

За результатами проведеного дослідження виявлено, що для прогнозування траєкторії руху базового трактора недостатньо знати значення зовнішньої сили з боку робочого знаряддя, необхідно врахувати і її напрямок. Для цього необхідно виміряти поздовжню і поперечну зовнішню складову сили

3.4. Конструктивне рішення

В якості прикладання зовнішньої сили найзручніше прийняти точку кріплення робочого знаряддя до базового трактора. Для цього силові датчики для вимірювання поздовжньої і поперечної сили пропонується вбудувати в раму його кріплення (рис. 3.7.)

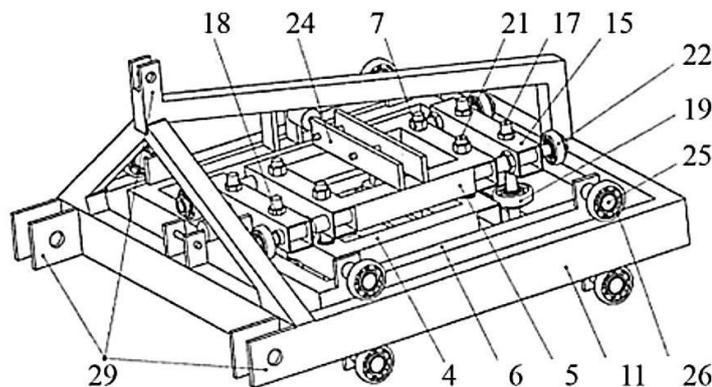


Рис. 3.7. Загальний вигляд тензорами кріплення робочого знаряддя.

Для з'єднання робочого знаряддя з базовим трактором на рамі 11 закріплені рухомі рами 5-6, оснащені датчиками розтягування-стиснення. При впливі зовнішніх сил на робочий орган, рама 5 переміщається по рамі 6 перпендикулярно напрямку руху тракторного агрегату і впливає на тензорезисторний датчик, що вимірює поперечну складову сили опору P_y . Рама 6 переміщається по рамі 11 у напрямку руху тракторного агрегату і діє на тензорезисторний датчик, що вимірює поздовжню складову сили опору P_x .

Для даної конструкції тензорами пропонуються силові датчики DEF- A2t (рис. 3.8).

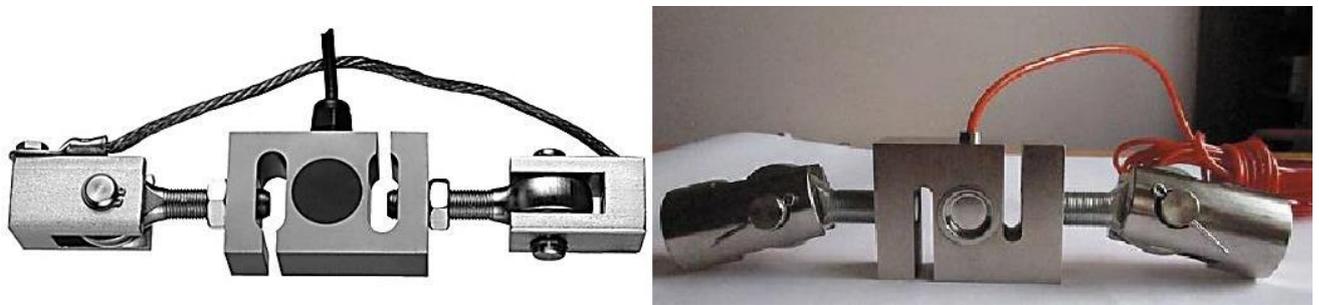


Рис. 3.8. Загальний вигляд тензорезисторного датчика DEF-A2.

Обрані датчики забезпечують точність вимірювання 0,01% і мають широкий діапазон вимірюваних величин

Через аналого-цифровий перетворювач датчики легко підключаються до комп'ютера, що дозволяє швидко обробити виміряні значення. Далі відбувається порівняння виміряного зовнішнього силового впливу з граничним розрахунковим значенням зсувної сили. У разі перевищення гранично допустимого значення подається сигнал на коригування траєкторії.

Висновки по розділу

1. Проведено математичні розрахунки для тракторів Т-70, ДТ-75 і Т-150 з робочими плугами 3/5/6 корпусів, які підтвердили прогнози відхилення від прямолінійної траєкторії під дією з боку робочого знаряддя.

2. Обґрунтовано необхідність введення силового впливу з боку робочого знаряддя в канал зворотного зв'язку в системі управління машинно- тракторним агрегатом.

3. Представлено конструктивне рішення передачі силового сигналу, що представляє тензору в місці кріплення робочого знаряддя з базовим трактором; обрано набір рекомендованих датчиків для вимірювання сили; практичні рекомендації передані на виробництво при проєктуванні безпілотного машинно-тракторного агрегату сільськогосподарського призначення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблено та зареєстровано програмний комплекс для розрахунку силових факторів у контакті з гусеничним рушієм при некерованому зсуві з урахуванням: пружних властивостей ґрунту, анізотропії взаємодії та відсутності відносного руху бортів і для розрахунку траєкторії руху з врахуванням некерованого відхилення під дією зовнішніх сил з боку робочого знаряддя.

Проведено натурні експерименти з силової рівноваги, які підтвердили однозначність залежності граничного значення зсувної сили від лінії її дії. Обробка осцилограм зовнішньої сили показала принципово різний характер її зміни в разі поступального і обертального зсуву.

Експериментально зафіксовано, що поступальний зсув під дією сили, що проходить через центр мас машини, відбувається при критичному куті $\alpha_{кр} = 21^\circ$, що на 4° більше його геометричного значення. Це підтверджує теоретичні результати про поворот годографа граничної зсувної сили за рахунок анізотропії взаємодії в бік найменшого зчеплення; Експериментально підтверджено, що коли зовнішня сила не проходить через центр ваги машини, зсув починається при силі, значно меншій за межу зчеплення, і являє собою криволінійне ковзання. Розбіжність експериментальних і теоретичних значень граничної зсувної сили не перевищила 6% (без урахування анізотропії розбіжність становить до 17% - відповідно анізотропними властивостями не слід нехтувати).

В результаті натурних експериментів з оцінки курсової стійкості зафіксовано, що некероване відхилення трактора під дією зовнішньої позацентрової сили має місце тільки в разі досягнення нею свого граничного значення. Порівняння експериментальних і розрахункових траєкторій руху показало розбіжність даних в межах 8%, що підтверджує адекватність математичної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Брикуля В. А. Розрахунок траєкторій руху орного тракторного агрегату. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 42-45.
2. Грудовий Р.С., Брикуля В.А. Актуальність прямолінійного руху тракторних агрегатів Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 623-627.
3. Грудовий Р.С., Брикуля В.А., Шевчук О.А. Огляд конструктивних рішень, що компенсують некероване відхилення руху трактора. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.
4. Naderi-Boldaji M., Hossein Karparvarfard S., Azimi-Nejadian H. Investigation of the predictability of mouldboard plough draught from soil mechanical strength (cone index vs. shear strength) using finite element modelling. Volume 108, August 2023, Pages 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.04.001>.
5. Baikenzhe N., Tynybekov S., Kyrgyzbay B., Ashim K., Kamzanov N., Kozbagarov R., Influence of the cutting angle on the resistance of bulldozer working equipment blade burial when the machine is moving. Mechanical Engineering in Transport. Communications 27 (3) В 216 - В 224.
6. Пилип В. Є. Загальна динаміка колісних та гусеничних енергетичних засобів : конспект лекцій. Миколаїв, 2014. 178 с.

7. Кюрчев В. М., Надикто В. Т., Скляр О. Г. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі : монографія. Мелітополь, 2021. 657 с.
8. Гунько І. В. Теорія руху тракторів і автомобілів : навч. посіб. Київ, 2016. 312 с.
9. Григоренко С. П. Динаміка машинно-тракторних агрегатів : навч. посіб. Харків, 2018. 286 с.
10. Кравчук В. І., Коваль С. М. Сільськогосподарські машини та агрегати : підручник. Київ, 2020. 544 с.
11. Сукенік І. П. Дослідження курсової стійкості гусеничних машин : магістерська робота. Тернопіль, 2021. 92 с.
12. Бондаренко О. В. Експлуатаційні властивості гусеничних тракторів : навч. посіб. Полтава, 2019. 248 с.
13. Brossard J.-P. Dynamique du véhicule : modélisation des systèmes complexes : ouvrage scientifique. Lausanne, 2006. 412 p.
14. Brossard J.-P. Dynamique des véhicules articulés : monographie. Paris, 2017. 368 p.
15. Abbassi Y. Dynamique des véhicules : modélisation, commande et simulation : monographie. Saarbrücken, 2011. 284 p.
16. Bouton N. Stabilité dynamique des véhicules tout-terrain légers : thèse de doctorat. Clermont-Ferrand, 2009. 192 p.
17. Crolla D. Vehicle Dynamics Handbook : scientific edition. Paris, 2014. 600 p.
18. Bernard J. Engins agricoles et traction sur sols déformables : ouvrage scientifique. Paris, 2015. 332 p.
19. Ministerio de Trabajo de España. Tractor agrícola: estabilidad frente al vuelco : informe técnico. Madrid, 2016. 64 p.

20. García A. Dinámica de vehículos todoterreno : manual universitario. Madrid, 2018. 420 p.
21. López J. Modelado dinámico de tractores agrícolas : tesis doctoral. Valencia, 2017. 210 p.
22. Martínez P. Sistemas tractor–implemento: análisis dinámico : monografía. Barcelona, 2019. 295 p.
23. Rodríguez L. Estabilidad direccional de vehículos agrícolas : estudio científico. Sevilla, 2020. 180 p.
24. Universidad Politécnica de Valencia. Dinámica del automóvil y vehículos especiales : manual docente. Valencia, 2016. 510 p.
25. Назаренко І. П. Тягово-зчіпні властивості тракторів : монографія. Київ, 2015. 364 с.