

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Кириєнко Олександр Валентинович

УДК 631.17

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Поліпшення обертальності машинно-тракторного
агрегату за рахунок удосконалення задньої навісної
системи**

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
_____ Кириєнко О.В.

Керівник роботи

Дерев'янка Д.А.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Кириєнко Олександр Валентинович. Поліпшення обертальності машинно-тракторного агрегату за рахунок удосконалення задньої навісної системи. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

В магістерській роботі встановлено, що одним зі шляхів зниження динамічного навантаження з боку навісного обладнання на трактор є введення в конструкцію задньої навісної системи трактора пружних елементів у місцях з'єднання трактора з обладнанням, що також, своєю чергою, дасть змогу усунути асиметрію передавання вагового навантаження від обладнання на навісний пристрій трактора, що виникає внаслідок нещільного прилягання між з'єднувальною рамкою обладнання та трикутником на тракторі і усунути нерівномірний розподіл крутильних моментів на колесах.

Результати експериментальних досліджень показали, що застосування модернізованої задньої навісної системи трактора Беларус-1221.2 дає змогу наблизити дійсну траєкторію руху машинно-тракторного агрегату до необхідної. Отримано зменшення граничних значень абсциси на 1,4...1,61 м (12,3...14,45 %) і ординати на 1,08...1,47 м (13,77...15,45 %) поворотної полоси для машинно-тракторного агрегату з модернізованою навісною системою порівняно з базовою. При цьому знижуються величини зусилля в тягах навісного пристрою на 24...27 % і прискорення в базових точках навісного обладнання – на 51...59 %.

Ключові слова: поворот, машинно-тракторний агрегат, рух, швидкість, навісна система.

ANNOTATION

Kiriyenko Alexander Valentinovich. Improving the rotation of the machine-tractor unit by improving the rear hitch system. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

In the master's thesis, it was established that one of the ways to reduce the dynamic load from the attachment on the tractor is to introduce elastic elements into the design of the tractor's rear hitch system at the points of connection between the tractor and the attachment, which will also, in turn, eliminate the asymmetry of weight transfer from the attachment to the tractor's hitch, which arises due to a loose fit between the connecting frame of the attachment and the triangle on the tractor and eliminate the uneven distribution of torques on the wheels.

The results of experimental studies have shown that the use of the modernized rear hitch system of the tractor Belarus-1221.2 makes it possible to bring the actual trajectory of the machine-tractor unit closer to the required one. A decrease in the boundary values of the abscissa by 1.4...1.61 m (12.3...14.45 %) and the ordinate by 1.08...1.47 m (13.77...15.45 %) of the turning lane for the machine-tractor unit with the modernized hitch system compared to the basic one was obtained. At the same time, the force in the linkages of the attachment is reduced by 24...27 % and the acceleration at the base points of the attachment is reduced by 51...59 %.

Keywords: turning, machine-tractor unit, movement, speed, hinged system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ.....	33
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	48

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Для обробітку земель використовуються трактори з різними типами приєднання до них робочого обладнання. Існують такі типи ґрунтообробного обладнання: причіпне, напівпричіпне, навісне [1]. Усі зазначені види обладнання мають низку переваг і недоліків, проте, як показує практика, навісне обладнання є найбільш ефективним у роботі. Основними перевагами навісних пристроїв є: проста конструкція, малі вага та металоємність, висока маневреність і простота експлуатації, обслуговування.

Однак, застосування навісного обладнання та збільшення швидкості руху машинно-тракторних агрегатів (МТА) на базі колісних тракторів під час виконання робочих процесів призводить до істотної зміни експлуатаційних характеристик агрегату, що напряду впливають на обертальність під час руху на поворотній смузі. Під час агрегування сільськогосподарського обладнання на задній навісній системі трактора відбувається збільшення інерційних сил, що виникають у ній, ці сили сприяють зсуву агрегату з потрібної траєкторії руху, відбувається занос задньої осі трактора, унаслідок чого збільшуються радіус повороту, витрата пального, кількість впливів оператора на органи керування, погіршується його психофізичний стан, що вкрай негативно впливає на якість виконання технологічної операції та продуктивність агрегату [2].

Одним із наявних напрямів розширення посівних площ є освоєння невикористовуваних нині багатопрофільних полів малих і середніх розмірів. Однак, під час обробітку таких полів різної форми сумарний шлях на поворотній смузі може досягати до 40 % від усього шляху, пройденого агрегатом по полю [8]. Отже, з метою забезпечення необхідної якості виконання сільськогосподарських робіт і збереження високого рівня ресурсозбереження необхідне поліпшення такого показника, як обертальність трактора, -

експлуатаційної властивості колісної машини здійснювати повороти із заданою кривизною на дорозі та місцевості [4], що є комплексним поняттям, яке поєднує такі показники, як стійкість і керованість, і яке безпосередньо оцінюють критеріями цих характеристик.

У зв'язку з вище викладеним, наукові дослідження, спрямовані на поліпшення керованості та підвищення стійкості трактора із заднім навісним обладнанням, і тим самим на раціональне використання ресурсів, збереження родючості ґрунту та збільшення врожайності сільськогосподарських культур, є актуальними і мають важливе значення для розвитку сільського господарства.

Об'єкт досліджень – процес криволінійного руху трактора із заднім навісним обладнанням.

Предмет дослідження: закономірності зміни кінематичних і динамічних характеристик під час криволінійного руху трактора із заднім навісним обладнанням.

Мета роботи: підвищення стійкості криволінійного руху МТА на базі колісного трактора шляхом удосконалення задньої навісної системи.

Завдання дослідження:

- удосконалити конструкцію задньої навісної системи за рахунок застосування пружного елемента в пристрої приєднання навісного обладнання до трактора;

- провести порівняльні експериментальні дослідження з визначення кінематичних і динамічних параметрів під час криволінійного руху МТА з базовою та модернізованою навісними системами.

Методи наукового дослідження. Експериментальні дослідження проведено за апробованими методиками на тракторі Беларус-1221.2 з удосконаленою задньою навісною системою та навісним обладнанням (плуг ПЛН-4-35, сівалка СТВ-12) у польових умовах. Вимірювання виконували сертифікованими та повіреними приладами, результати реєструвалися в пам'яті персонального комп'ютера за допомогою програмного забезпечення Lgraph2. Під

час проведення розрахунків і обробки результатів експерименту використовували сучасні комп'ютери та застосовували програмне забезпечення: Microsoft Excel, Mathcad, Maple.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Дерев'яно Д. А., **Кириєнко О. В.** Критерії оцінки обертальності машинно-тракторного агрегату. 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. 300-302.

2. **Кириєнко О. В.** Способи агрегування машинно-тракторних агрегатів. 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. 15-17.

3. **Кириєнко О. В.** Способи руху машинно-тракторних агрегатів на поворотній смузі. Збірник тез X Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» 18 квітня 2024 р. Житомир: ЖАТФК, 2024. С. 200.

Практичну значимість роботи мають удосконалена конструкція задньої навісної системи, що дає змогу поліпшити обертальність МТА, знизити прискорення в базових точках навісного обладнання та зусилля в тягах заднього навісного пристрою трактора під час повороту; програмні модулі, що дають змогу виконати розрахунок і вибір раціональних величин експлуатаційних параметрів, кінематичних і динамічних характеристик навісного МТА в автоматизованому режимі на персональному комп'ютері.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 20 найменувань.

Загальний обсяг роботи становить 49 сторінок комп'ютерного тексту, містить 25 рисунків.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Способи агрегування машинно-тракторних агрегатів

Тенденція зростання посівних площ сільськогосподарських культур зумовлює необхідність у насиченні вітчизняного ринку сільськогосподарської техніки новим технологічним і високопродуктивним устаткуванням, яке дає змогу підвищити продуктивність і скоротити витрати під час виконання механізованих робіт. Більшість операцій на полі виконують машинно-тракторні агрегати (МТА), що являють собою технічні системи, які складаються з трактора та однієї або декількох одиниць обладнання (машин, знарядь тощо), пов'язаних з'єднувальними пристроями, силовими приводами, керування якими, зазвичай, здійснюється безпосередньо оператором із кабіни трактора за допомогою різноманітних електронних, гідравлічних і пневматичних систем [19].

МТА класифікують за такими ознаками [19]:

1. За призначенням: технологічні (орні, посівні, по догляду за рослинами, збиральні), транспортні, транспортно-технологічні (роздавачі кормів, машини для внесення добрив), вантажно-розвантажувальні.
2. За способом виконання робіт: мобільні, стаціонарно-пересувні, стаціонарні.
3. За способом з'єднання обладнання з трактором: причіпні, напівпричіпні, навісні (рис. 1).
4. За кількістю обладнання в агрегаті: одномашинні та багатомашинні.
5. За кількістю одночасно виконуваних операцій: прості, складні, комбіновані.

б. За розміщенням обладнання відносно трактора та його поздовжньої осі: з переднім, середнім, заднім, бічним, симетричним і асиметричним розташуванням.



а)

б)



в)

Рис. 1.1. Типи МТА за способом з'єднання обладнання з трактором: а – навісний агрегат; б – напівнавісний агрегат; в – причіпний агрегат [19].

Найважливішою характеристикою агрегату, що впливає на більшість його кінематичних, динамічних і геометричних параметрів, є спосіб з'єднання робочого обладнання і трактора [19].

Оскільки виробництво колісних тракторів у світовому тракторобудуванні становить від 85 % до 95 % з огляду на їхню універсальність, простоту в обслуговуванні, меншу металомісткість, зручність, легкість в агрегуванні та кращу маневровість, як порівняти з гусеничними, то понад 60 % тракторного парку представлено універсально-просапними колісними тракторами.

Вочевидь, тип робочого обладнання, що сполучається з трактором, змінює умови його експлуатації, особливо під час виконання технологічних операцій на пухких деформівних ґрунтах, де функціональні якості обмежуються

недостатньою стійкістю та низькою керованістю, зокрема й під час криволінійного руху на поворотній смузі. Тому дослідження з пошуку шляхів поліпшення зазначених експлуатаційних показників універсально-просапних колісних тракторів є перспективним напрямом [19].

1.2. Способи руху машинно-тракторних агрегатів на поворотній смузі

Основними елементами руху МТА під час роботи є прямолінійні робочі ходи та холості повороти. Здійснення повороту - найскладніший для вивчення і виконання елемент. Вибір неправильного способу руху агрегату тягне за собою збільшення ширини поворотної смуги і відповідно довжини холостого ходу, що, своєю чергою, підвищує витрату пального, час маневру і площу негативного впливу руху на ґрунт [20].

Під час руху МТА по полю розрізняють петльові та безпетльові повороти. Їхні схеми проїзду показано на рис. 1.2.

Безпетльові повороти застосовуються в тому разі, якщо відстань між суміжними проходами агрегату більша або дорівнює сумі двох радіусів його повороту. Безпетльові повороти бувають кругові (рис. 1.2а), з прямолінійною ділянкою (рис. 1.2 б) і кутові (рис. 1.2 в) [20].

Петльові повороти застосовуються в тому разі, якщо відстань між суміжними проходами агрегату менша за два радіуси його повороту.

Розрізняють такі види петльових поворотів: із закритою петлею (рис. 1.2г), грушоподібний (рис. 1.2 д), односторонній (рис. 1.2 е), а також грибоподібні з відкритою (рис. 1.2 ж) і закритою (рис. 1.2з) петлею [20].

Основними кінетичними характеристиками всіх видів повороту є: l

- довжина траєкторії повороту; t - час повороту; R - радіус повороту; E

- необхідна ширина поворотної смуги. Зазвичай під R і E мають на увазі їхні мінімально можливі значення з урахуванням викладених вище вимог, а під l

- довжину траєкторії центру агрегату від точки a_n початку повороту до точки b_n його завершення (рис. 1.2) [20].

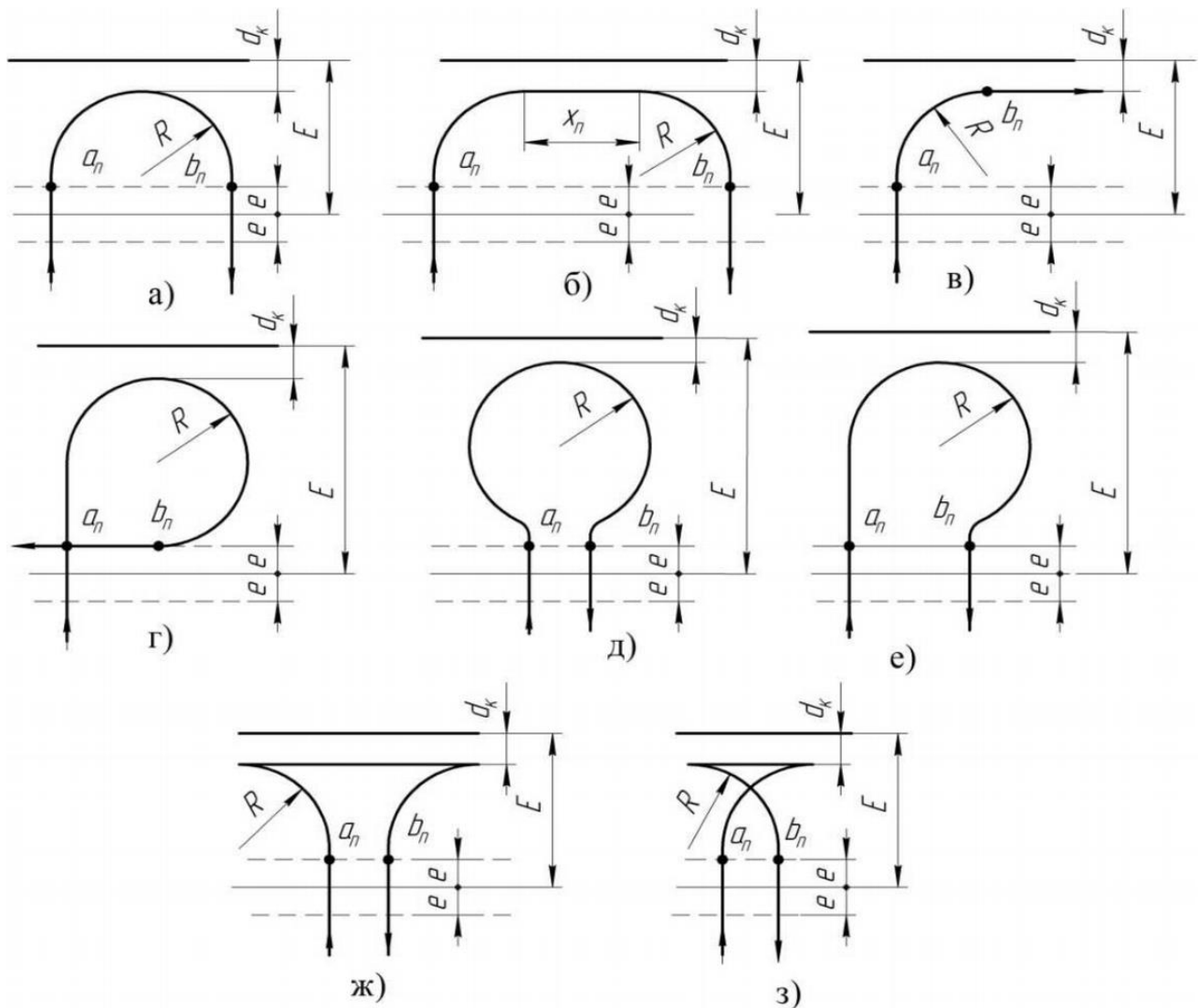


Рис. 1.2. Види поворотів: а – круговий; б – із прямолінійною ділянкою; в – кутовий; г – із закритою петлею; д – грушоподібний; е – односторонній; ж – грибоподібний із відкритою петлею; з – грибоподібний із закритою петлею [20].

1.3. Поворотність машинно-тракторного агрегату

Вивчення криволінійного руху МТА необхідне для аналізу обертальності трактора - експлуатаційної властивості колісної машини здійснювати повороти із заданою кривизною на дорозі та місцевості [1], що є комплексним поняттям,

яке поєднує в собі такі показники, як стійкість та керованість, та безпосередньо оцінюється критеріями цих характеристик [2].

Якщо не забезпечено необхідної керованості та стійкості МТА, то підвищуються динамічні навантаження на трактор і сільськогосподарське устаткування, що своєю чергою є причиною збільшення енерговитрат, погіршуються психологічний і фізичний стани оператора, знижуються техніко-економічні показники роботи агрегату та якість виконання агротехнічних операцій, не виключено часткове, а в деяких випадках повне знищення культурних рослин на засіяних поворотних смугах [1, 3, 5].

З огляду на те, що як під час прямолінійного, так і під час криволінійного руху на трактор впливає безліч різноманітних зовнішніх чинників, оператор, впливаючи лише на кермове колесо, не може забезпечити рух суворо за теоретичною траєкторією руху, що є найкоротшою. Він може лише максимально можливо до неї наблизитися, намагаючись зберегти необхідну швидкість і уникнути занесення коліс [5].

Стійкість і керованість є взаємопов'язаними параметрами. За достатнього рівня стійкості МТА оператору немає необхідності надмірно впливати на органи управління для збереження швидкості і траєкторії руху, що свідчить про хорошу керованість, тому комплекс цих понять і визначає обертальність [5, 8]. Розрізняють виділяють статичну і динамічну обертальність.

Статична обертальність - властивість машини, що рухається по колу із закріпленим кермом (за незмінного повороту керованих коліс), змінювати кривизну траєкторії залежно від швидкості руху під дією бокової складової сили інерції, аеродинамічної сили або будь-якого іншого збурення, включно зі зміною характеристик шин і підвіски [4, 8, 13].

Динамічна обертальність – властивість машини змінювати кривизну траєкторії відповідно до повороту керма і зміни швидкості руху [4, 13, 18].

більшість авторів розглядають поняття стійкості в сукупності з керованістю. Забезпечивши, приміром, ідеальну стійкість, можна привести показник керованості до необхідних вимог, тому слід пам'ятати про це і вирішувати питання забезпечення стійкості, не порушуючи при цьому керованість [3, 1, 5, 6]. Саме тому більшість науковців використовують поняття обертальності трактора, як сукупність таких факторів як стійкість і керованість [8, 13, 15].

Також, виходячи з аналізу літератури випливає, що вивчення обертальної здатності проводили переважно для окремого трактора [7, 8, 9]. Проте, в роботах [6, 7, 8, 20] експериментально доведено і теоретично обґрунтовано, що навісні пристрої чинять значний вплив на кінематичні та динамічні характеристики агрегату під час криволінійного руху. Тому теоретичні та експериментальні дослідження обертальності необхідно проводити не тільки для окремого трактора, а й для МТА загалом. Експериментальні дослідження всіх етапів криволінійного руху навісного МТА в умовах реальної експлуатації не проводилися, а під час розв'язання більшості різноманітних аналітичних завдань, пов'язаних із вибором параметрів агрегатів і режимів їхньої роботи, конструктивною ув'язкою трактора з навісним обладнанням, за основу беруть статичні моделі та методи теорії рівноваги механічних систем. У реальних умовах експлуатації МТА являє собою комплекс складних динамічних процесів, викликаних нерівномірними коливаннями трактора, навісного обладнання, швидкості та напрямку руху [8, 13].

Виявлено також, що практично відсутні дослідження з пошуку шляхів підвищення експлуатаційних якостей МТА під час криволінійного руху на поворотній смузі, зокрема щодо зниження впливу на трактор з боку навісного обладнання.

1.4.Критерії оцінки обертальності

Підвищення робочих швидкостей агрегату, зростання енергонасиченості тракторів призводить до зростання знакозмінних зусиль, підвищення динамічної навантаженості МТА і ґрунту, що істотно погіршує його експлуатаційні характеристики, зокрема під час криволінійного руху. Тому необхідною є оцінка обертальності трактора, оскільки без цього неможливо підвищити не тільки якість виконуваної технологічної операції, а й забезпечити безпеку роботи [18].

Нині запропоновано достатню кількість оціночних критеріїв стійкості та керованості колісних машин, але лише деякі з них можливо використовувати для дослідження зазначених властивостей криволінійного руху МТА [18].

Загальноприйнятими критеріями для оцінки обертальності трактора є такі:

1. Мінімальний радіус повороту трактора під час криволінійного руху.
2. Граничне значення швидкості зміни кривизни траєкторії.
3. Кількість енергії, витрачена на керування трактором під час його руху по заданій траєкторії.
4. Питома сила тяги, необхідна для виконання повороту.
5. Коефіцієнт використання зчіпної сили рушія.

Параметри, що впливають на критерії обертальності, бувають керованими, на які можливий вплив оператора, і некерованими. До керованих параметрів відносять кут і кутову швидкість повороту керованих коліс, кутову швидкість повороту і швидкість поступального руху трактора, час повороту і шлях, пройдений трактором. Решта параметрів (переважно конструктивні) – некеровані [18].

На більшість перерахованих вище параметрів можливий вплив оператора, як керівної ланки, тому, щоб його виключити, необхідно вибрати такі критерії обертальності, які відображають тільки конструктивні параметри агрегату [18].

Запропоновано критерій оцінки статичної обертальності, що є відношенням фактичного і теоретичного радіусів повороту:

$$\frac{1}{U} = \frac{R_{\phi}}{R_m} \quad (1)$$

де R_{ϕ} – фактичний радіус повороту, м; R_m – теоретичний радіус повороту, м.

Однак під час здійснення повороту найважливішими факторами є час, що витрачається на розворот, і зміна при цьому швидкості руху МТА відносно прямолінійної ділянки, оскільки момент опору повороту залежить від кута повороту керованих коліс і швидкості руху трактора. Довжина шляху тих ділянок, які трактор проходить зі змінним радіусом кривизни траєкторії (вхід у поворот, вихід із повороту), і ділянок із постійною кривизною також має бути необхідною складовою показників, що характеризують обертальність трактора [18].

На основі вищесказаного запропоновано наступний показник поворотності трактора:

$$K_n = \frac{L \times v}{\omega} \quad (2)$$

де L – база трактора, м;

v – швидкість поступального руху трактора, м/с;

ω – кутова швидкість повороту керованих коліс трактора, с⁻¹.

Одним із показників обертальності, що заслуговують також на увагу, у зв'язку з цим є критерій Струхалія, який показує залежність кута повороту агрегату за час проїзду шляху, що дорівнює довжині колісної бази [18]:

$$p = \frac{L \times \Omega}{v} \quad (3)$$

де Ω – кутова швидкість повороту трактора, с⁻¹.

У деяких роботах рекомендується для використання як оцінку обертальності на перехідних ділянках повороту наступний комплексний критерій керованості, що є сукупністю показників (1), (2) і (3):

$$U = \frac{L}{\omega \times R_\phi \times T_\phi} \quad (4)$$

де R_ϕ – миттєвий фактичний радіус повороту, м; T_ϕ – час, необхідний для досягнення даного радіуса повороту, с.

Під час криволінійного руху рекомендується використовувати тягову силу як критерій для оцінки тягової здатності трактора [18].

Що менша її величина за інших ідентичних умов, то нижчі витрати потужності двигуна трактора, що реалізується на криволінійний рух.

Під час повороту коефіцієнт використання зчепної сили колеса оцінюється відношенням різниці можливої сили зі зчеплення і сумарної сили, що діє в контактні рушія з опорною поверхнею, до можливої сили тяги зі зчеплення. Що більше значення коефіцієнта використання зчепної сили, то вищими є можливості трактора до виконання криволінійного руху та меншою є ймовірність втрати керованості й обертальності. Однак, обчислення складових формули для визначення цього коефіцієнта є досить трудомістким процесом, тому, зокрема, для повнішого аналізу енергетичного балансу, у багатьох роботах пропонують наступний метод оцінювання енергетичних властивостей трактора на повороті за величиною питомих енергетичних витрат [18]:

$$E_{\text{пит}} = \frac{M\varphi}{S} \quad (5)$$

де M – провідний момент рушія, Н×м;

φ – кут повороту рушія в окружному напрямку на пройденому шляху S (м), рад.

Характер зміни траєкторії кінематичного центру під час криволінійного руху трактора дає досить повне уявлення про стійкість під час повороту трактора. Для оцінки траєкторії повороту рекомендується застосовувати величини ширини (абсциси x) і висоти (ординати y) поворотної смуги, які показують поперечні та поздовжні відхилення МТА, оскільки під час виконання сільськогосподарських операцій поворот необхідно прагнути проводити з мінімально можливим радіусом, що призводить до скорочення площі поворотних смуг, значного зменшення кількості ушкоджених рослин на них та зниження ущільнення й розпилення ґрунту [18].

1.5. Шляхи поліпшення обертальності машинно- тракторних агрегатів

Аналіз робіт у царині дослідження криволінійного руху МТА показує, що можливі два практичні напрямки підвищення стійкості та поліпшення керованості колісного трактора у складі навісного МТА, один із яких можна визначити як технологічний, інший як конструктивний [1-7].

Перший напрям пов'язаний із вибором раціональних експлуатаційних характеристик, що забезпечують підвищення ефективності роботи досліджуваного МТА під час руху на поворотній смузі. До цих характеристик можна віднести швидкість поступального руху трактора v , кутову швидкість повороту рульового колеса ω_p , а отже – керованих коліс. Від їхніх величин, вочевидь, залежить і час, що витрачається на здійснення руху, і кутова швидкість. Для більш стійкого та керованого руху значення як v , так і ω_p мають зменшуватися [5].

Однак, це тягне за собою зниження продуктивності МТА, збільшення площі поворотної смуги [5]. Тому вибір даних характеристик має бути обґрунтований залежно від умов роботи, типу і складу агрегату, його масово-геометричних параметрів і оптимізований, виходячи з умов ефективного функціонування агрегату [6].

Вибір раціонального способу повороту навісного МТА також є важливим резервом збереження стійкості та керованості, тому ведуться дослідження з розроблення нових способів руху трактора на ворітній смузі [1]. Розв'язання цього завдання дуже докладно викладено в спеціальній літературі [6].

Беляєвим О.М. запропоновано комбінований спосіб повороту МТА [11] та обґрунтовано його ефективність [5]. Застосування цього способу дозволило поліпшити тягову динаміку трактора, забезпечило зниження поперечного і поздовжнього відхилення від заданої траєкторії криволінійного руху.

Як показали дослідження, потенційні можливості тракторів із навісним сільськогосподарським обладнанням значно обмежуються через негативний вплив останніх на процес криволінійного руху. Для підвищення швидкості руху

МТА при забезпеченні якісних умов кочення коліс по деформованій пухкій опорній основі, що деформується, необхідно, з огляду на це, визначити раціональні параметри деяких вузлів, які визначають характер взаємодії навісного устаткування з тракторами і їхніми механізмами з трактором і провести пошук шляхів вибору конструктивних рішень для їх подальшої реалізації [1-7].

Найперспективнішим напрямом стабілізації навантажувальних режимів трактора у складі МТА та боротьби з негативними наслідками збільшення динамічних навантажень є введення пружних ланок у окремі механізми трактора та навісного обладнання з метою зменшення впливу постійно змінюваних навантажень на трактор або окремі його вузли та агрегати [1-10].

У результаті досліджень виявлено, що незалежно від місця встановлення пружного елемента з підібраними раціональними параметрами, що враховують експлуатаційні та конструктивні характеристики об'єкта, він дає змогу знизити інтенсивність і величини ударних і змінних навантажень на деталі двигуна, муфти зчеплення, трансмісії, зменшити буксування рушіїв, коливання зовнішнього навантаження і частоти обертання двигуна, зменшити витрати пального і підвищити продуктивність [6, 9].

Найфундаментальніші дослідження в досліджуваній царині було проведено для тракторно-транспортних агрегатів, які виявили, що одним із найперспективніших шляхів зниження середніх величин і амплітуд коливань зовнішнього навантаження є введення пружного зв'язку в тягово-зчіпний пристрій (ТЗП) між трактором і причіпним засобом.

Мандрик І.І. [8] запропонував конструкцію активної пружно- демпфуючої ТСУ, основним елементом якої є гідроамортизатор. Застосування вдосконаленого ТСУ дало змогу підвищити продуктивність праці на 9...14 % за рахунок збільшення середньої швидкості на повороті на 10...15 %.

Алексеев С.А. експериментально і теоретично довів, що застосування ТЗК зі встановленим у ньому гідравлічним акумулятором дає змогу зменшити гальмівний шлях на 12...28 %, що сприяє підвищенню продуктивності МТА на 10...17 % і зниженню витрати палива до 5 % [3].

Причіпний пристрій, запропонований Шишкіним А.В. [144], який містить у собі ресорний пружний елемент, показав свою ефективність під час експериментальних досліджень. Так, знизилася динамічність навантаження трактора в складі МТА на 20...25 %, гакове навантаження зменшилося на 10...12 %, продуктивність збільшилася на 12...15 % за повної завантаженості трактора.

Поліпшення обертальності МТА з навісним обладнанням стало можливим завдяки застосуванню пружно-демпферних приводів (ПДП), які встановлюють у ходову частину трактора замість жорстких напівосей [8, 15, 16]. Як для одиночного трактора, так і для МТА застосування УДП дало змогу зменшити мінімальний радіус повороту на 8...10 % порівняно з базовою конструкцією приводу ведучих коліс.

При цьому підвищується стійкість трактора до заносу, оскільки інтенсивність бічного ковзання трактора з УДП нижча, а швидкість руху, на якій воно виникає, вища. Крім вищесказаного, застосування УДП у конструкції трактора дало змогу зменшити середньоквадратичні прискорення вертикальних коливань мостів під час повороту на 8...16 %, а середньоквадратичні прискорення поступального руху – на 10...18 %.

Зниження енерговитрат від застосування УДП на пересування навісного комбінованого МТА на поворотній смузі становило 14...25 %.

Вдалося також збільшити середню поступальну швидкість руху на 5...7% і знизити негативний вплив рушіїв на ґрунт.

Одним із конструктивних рішень, що дають змогу поліпшити обертальну здатність трактора, зокрема у складі навісного МТА, є застосування в тракторі кінематичних схем підвісок, що забезпечують під час повороту машини вибір

необхідного кута нахилу коліс передньої осі трактора для збереження заданої траєкторії руху. Недоліком цього способу є можливість застосування винятково на тракторах із чотирма керованими колесами і необхідність внесення складних технічних рішень у конструкцію підвіски [106].

У роботі [5] зазначено, що для підвищення ефективності використання будь-якого МТА можливо застосовувати пневмогідравлічне навішування, що дало змогу поліпшити тягово-зчіпні властивості, знизити витрату палива та збільшити продуктивність.

Однак, застосування гідротрансформатора знижує ККД двигуна і збільшує витрату палива. Нівелювати ці недоліки можливо за рахунок застосування двигуна постійної потужності. Даний спосіб підвищення ефективності використання МТА вимагає значних змін конструкції, як самого трактора, так і навісної системи.

Рижих М.Є. запропонував [1] одноточкову конструкцію навісної системи, застосування якої дало змогу знизити жорсткість з'єднання трактора і знаряддя та підвищити рівномірність ходу плуга за глибиною при виконанні оранки. Такий підхід дав змогу підвищити продуктивність орного агрегату в середньому на 22 % і скоротити витрату палива на 28 % під час виконання орних робіт.

Проведений аналіз показав, що можливість застосування пружних елементів у місцях бокового з'єднання навісного обладнання з трактором не досліджувалися. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває питання пошуку та наукового обґрунтування конструктивного рішення щодо пружного бокового зв'язку в навішуванні для оптимізації режиму криволінійного руху МТА, що спрямовано на найбільш повне використання тягових властивостей, енергетичних ресурсів, збереження необхідної траєкторії руху.

1.6. Висновки по розділу

1. Найпоширенішою нині схемою комплектації МТА на базі колісних тракторів є заднє триточкове навішування обладнання, що забезпечується автоматичним зчіпним пристроєм.

2. Вибір способу руху навісного МТА на поворотній смузі є завданням, що належить до конкретних умов експлуатації (тип обладнання, розміри та конфігурація поля, вид технологічного процесу тощо), але в основі кожного з відомих способів повороту лежать елементи кругового безпетльового повороту, тому результати його дослідження можна переносити на інші способи.

3. Однією з найважливіших експлуатаційних властивостей будь-якого МТА, що працює в умовах пухких деформівних ґрунтів, що впливають на продуктивність і економічність, є обертальність, для оцінки якої використовують критерії, що відносяться до стійкості руху і керованості.

4. Імовірним вирішенням проблеми зниження динамічного навантаження з боку навісного обладнання на трактор під час криволінійного руху є застосування пружного зв'язку між ними за допомогою вбудованих без порушення вихідної конструкції в бічних елементах навісної системи пружних елементів.

5. Під час моделювання процесу криволінійного руху колісного трактора на пухкому ґрунті, що деформується, визначення бічного відхилення від заданої траєкторії необхідно проводити за методикою, що розглядає трактор як єдиний об'єкт, а не описує кочення окремого колеса, оскільки це складно та неоднозначно, бо процеси, що відбуваються під час кочення кожного з них.

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для підтвердження ефективності застосування на тракторі Білорусь-1221.2 вдосконаленої навісної системи, розроблення аналітичних методів опису дійсної криволінійної траєкторії руху МТА та підтвердження адекватності теоретичних математичних моделей реальному технологічному процесу було проведено лабораторні та лівосторонні експерименти.

Дослідження проводилися на тракторі класу 2 з усіма ведучими і передніми керованими колесами Беларус-1221.2 [14]. Трактор агрегувався з навісним обладнанням: плугом ПЛН-4-35 і сівалкою СТВ-12 і, щоб визначити ступінь впливу навісного обладнання на обертальну здатність, були поставлені також досліди з одиночним трактором.

Під час випробувань трактор обладнали модернізованою і серійною задньою навісною системою [4, 11]. У модернізованій конструкції навісної системи між охоплювальною навісною рамкою трактора (рис. 2.1а) і охоплювальною навісною рамкою знаряддя (рис. 2.1б) розміщено прокладку з пружного матеріалу - поліуретану 1 (рис. 2.1в) [11]. Прокладка 1 встановлена на зовнішніх охоплюваних поверхнях швелера 2. Для збереження якісних

показників пружного матеріалу прокладки, насамперед для запобігання задирам у момент зчленування трактора і знаряддя, до неї зверху прикріплено металеві пластини 3 (рис. 2.1в, г).

Програма експериментальних досліджень складалася з таких етапів:

- підготовка та перевірка вимірювальних приладів і обладнання;
- тарування вимірювальних приладів;
- підготовка МТА до роботи й установлення на нього необхідних для проведення експериментів приладів, устаткування і пристосувань;
- проведення польових випробувань.

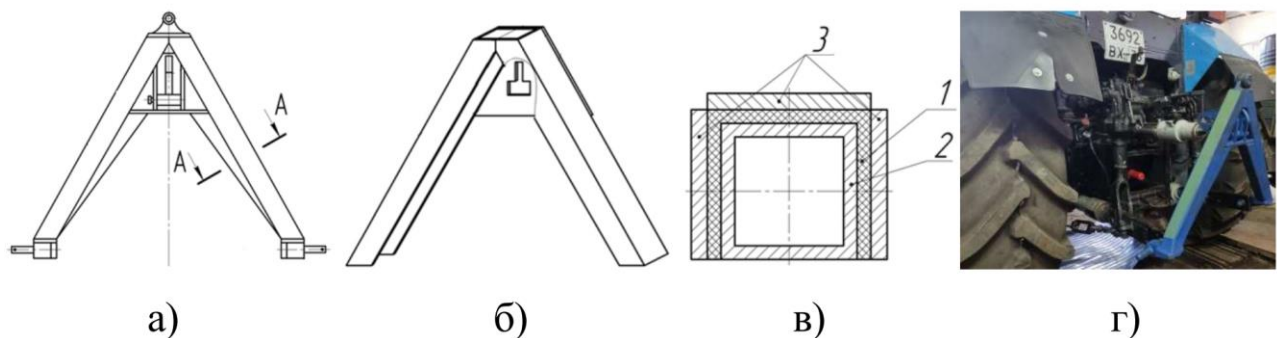


Рис. 2.1. Удосконалена конструкція задньої навісної системи трактора Беларус-1221.2: а – охоплювана рамка навісної системи; б – охоплювальна рамка навісної системи; в – переріз А-А охоплюваної рамки навісної системи; г – загальний вигляд навісної системи на тракторі.

Лабораторні дослідження проводилися для визначення характеристик, необхідних під час моделювання процесу криволінійного руху МТА, тарування вимірювальних приладів і налаштування обладнання.

Для успішного проведення польових випробувань необхідно було виконати низку підготовчих операцій у лабораторних умовах. Одна з них - визначення масово-геометричних параметрів трактора і агрегованих із ним знарядь. Маса трактора і МТА зі встановленим вимірювальним обладнанням і повністю заправленим паливним баком і обважнювачем масою 75 кг на місці оператора визначали шляхом зважування на автомобільних вагах. Точність

зважування становила $\pm 0,2$ %. За відомою методикою [2] було визначено координати центру мас трактора і МТА на платформних вагах. Геометричні розміри трактора і навісного обладнання визначали на рівній горизонтальній поверхні за допомогою рулетки, інструментальної лінійки і лазерного далекоміра з функцією вимірювання кутів. Точність вимірювальних приладів - ± 1 мм [3].

Для точного вимірювання необхідних параметрів під час польових випробувань необхідно провести тарування датчиків, визначити тарувальні коефіцієнти з подальшою конвертацією отриманих значень у загальноприйнятій фізичні величини. Для визначення зусиль у всіх трьох продольних тягах навісного пристрою використовували тензозв'язки, для тарування яких необхідно було відтворити навантаження, що впливатимуть на ланку під час польових випробувань [6, 12]. У лабораторних умовах це було здійснено за допомогою універсальної розривної машини. Величину зусилля, що додається, контролювали динамометром [3].

У результаті було отримано залежності показань напружень у тензозв'язках від сприйманого ними навантаження. У всіх тензозв'язках ця залежність – лінійна (рис. 2.2), що дало змогу достовірно визначити їхні тарувальні коефіцієнти [3].

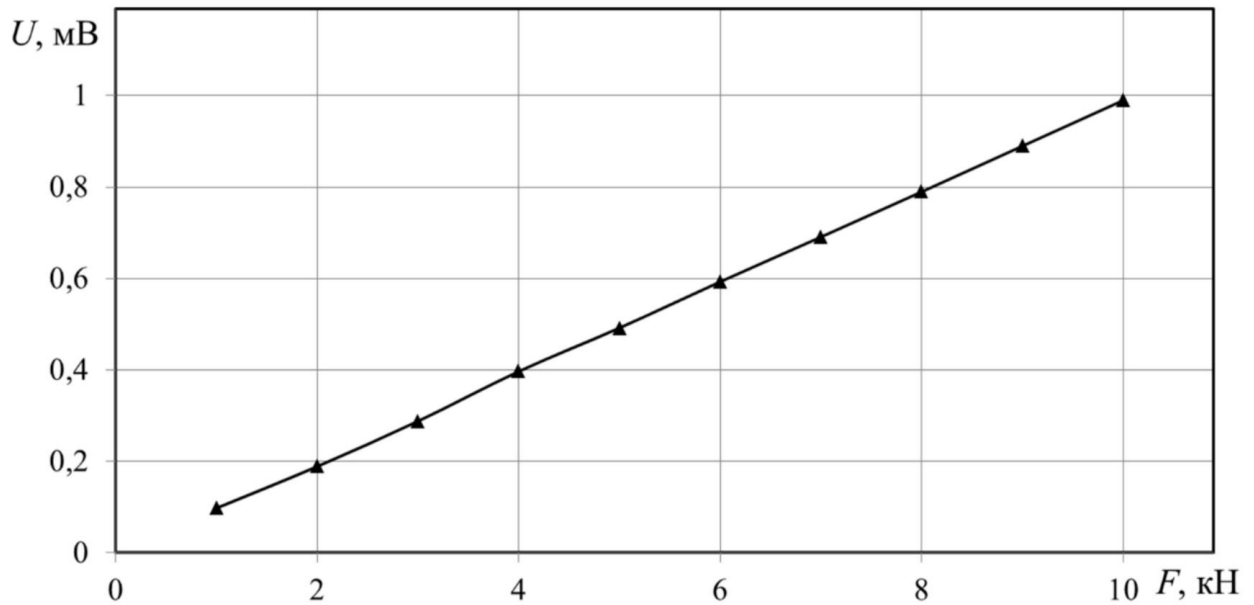


Рис. 2.2. Тарувальний графік тензовена.

Таким чином, надалі в процесі експериментальних досліджень за допомогою тарувальних коефіцієнтів було отримано дійсні значення навантажень, що передаються через тензовення на поздовжні тяги навісного пристрою.

У процесі підготовки обладнання до польових дослідів необхідно налаштувати і відкалібрувати навігаційну систему і підрульовальний пристрій [2, 3, 4]. У пам'ять навігаційного модуля необхідно внести відомості про трактор, зокрема масово-геометричні параметри, а також інформацію про поле, на якому проводилася серія заїздів і поворотів.

ДСТУ "Трактори сільськогосподарські колісні. Методи оцінки керованості" [5] встановлює в якості методу для оцінки керованості сільськогосподарських колісних тракторів зусилля на органі рульового керування під час руху трактора зі справним рульовим керуванням по траєкторії, наведеній на малюнку 3.3 (розміри в метрах), що має протяжність, яка дорівнює шляху, прохідному трактором за 5 с, і з рульовим керуванням в аварійному стані під час руху подібного виду траєкторією, тільки з дещо відмінними геометричними характеристиками, яка має протяжність, яка дорівнює шляху, що прохідний

трактор за 8 с, по майданчику з твердим покриттям. Трактор має рухатися зі швидкістю 10 ± 1 км/год за певною траєкторією під час повороту праворуч - лівим переднім колесом, під час повороту ліворуч - правим переднім колесом.

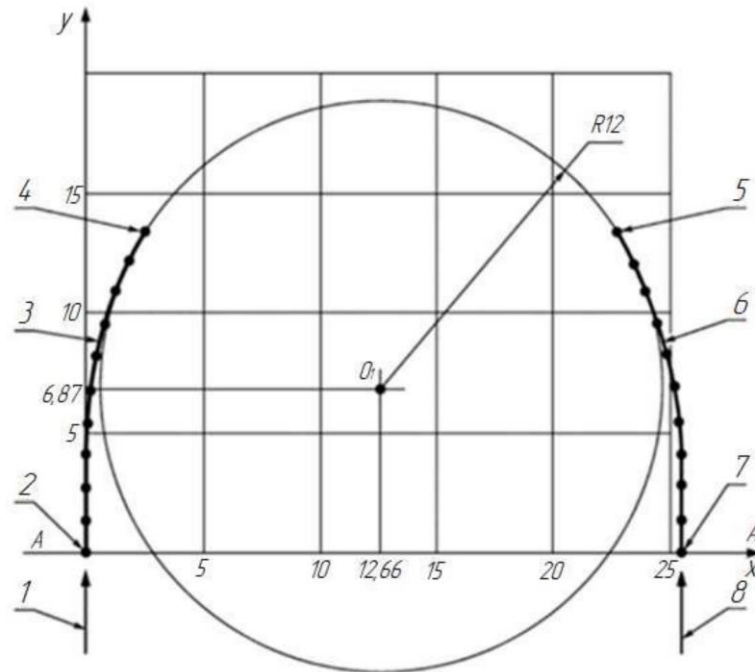


Рис. 2.3. Розмітка ділянки траєкторії руху трактора для експериментальної оцінки керованості: 1, 8 – напрямки руху трактора перед виїздом на траєкторію; 2, 7 – стартові точки руху за траєкторіями; 3 – траєкторія повороту трактора направо; 4, 5 – фінішні точки руху за траєкторіями; 6 – траєкторія повороту трактора ліворуч; AA – стартова лінія.

Перед виїздом на траєкторію трактор повинен мати зазначену швидкість і положення, що відповідає прямолінійному руху.

Вимірювання починають з моменту перетину передніми колесами трактора лінії AA і закінчують у момент досягнення передніми колесами точки сполучення з колом радіусом 12 м (точки 4 і 5). Зусилля керування на кермовому колесі трактора, що має привід передніх коліс, визначають як за увімкненого, так і за вимкненого приводу, за допомогою динамометра. Усі вимірювання проводять не менше трьох разів під час повороту трактора як праворуч, так і ліворуч. Контроль за фактичною траєкторією руху трактора і за

відхиленням її від траєкторії, позначеної розміткою, здійснюють за слідом маркувального пристрою.

У ДСТУ "Автотранспортні засоби. Керованість і стійкість. Технічні вимоги. Методи випробувань" [4], що регламентує критерії та методи оцінки керованості та стійкості деяких типів автотранспортних засобів, під час випробувань на повороті запропоновано траєкторію на поверхні дороги з твердим покриттям. Як критерій оцінки застосовується максимальна швидкість автотранспортного засобу при виконанні маневру, що визначається як середнє арифметичне значення швидкостей трьох заїздів з найбільшою швидкістю, за якої не було виходу за межі розмітки або відриву одного з коліс від поверхні дороги.

Однак, здійснити рух за позначеною розміткою траєкторією під час проведення випробувань за зазначеними методиками доволі складно навіть на твердій опорній основі, а на пухкому деформівному ґрунті взагалі не видається можливим з огляду на наявність у МТА сільськогосподарського призначення бокового ковзання та заносу, які є критичними умовами руху [9]. Саме з умов їх відсутності необхідне визначення максимальної швидкості виконання маневру під час руху не за відомою траєкторією, а за фактичною [9].

трактор або МТА, оснащений базовою або вдосконаленою системою, або з задньою навісною системою розташовують на початку передбачуваного маршруту руху на підготовленій ділянці поля.

Переконавшись, що сигнали датчиків дають нульові положення і, перевіривши калібрування навігаційної системи, виконуються повороти-заїзди в такій послідовності: оператор здійснює розгін прямою до певної швидкості, яка відповідає обраному номінальному режиму роботи, після чого, за сигналом, система автоматизованого рульового управління AutoTrac Universal-300 рівномірно обертає рульове колесо до упору передніх коліс (управо або вліво). Рух кривою триває доти, доки повздовжня вісь трактора не повернеться на кут

180° від початкового положення на ділянці розгону обертанням кермового колеса у зворотний бік з метою виходу на прямолінійний рух [4, 8, 10].

Для реалізації вищевказаної методики та отримання достовірних результатів трактор або МТА з модернізованою або серійною задньою навісною системою повинен виконати не менше трьох заїздів для кожної комбінації параметрів поступальної швидкості руху та кутової швидкості повороту керованих коліс від нульового положення до упору [8]. При цьому повороти мають здійснюватися як вліво, так і вправо.

Швидкість поступального руху по поворотній смузі варіюється в межах 1,36...2,556 м/с, а кутова швидкість повороту керованих коліс – 0,124...0,31 с⁻¹.

Для виконання програми експериментальних досліджень на тракторі було змонтовано комплекс датчиків і реєструвальних пристроїв для контролю та фіксації величин необхідних параметрів, серед яких:

- час досвіду;
- лінійні прискорення в базових точках знарядь;
- зусилля в поздовжніх тягах навісного пристрою трактора;
- шлях, пройдений трактором;
- координати траєкторії руху трактора.

Для визначення прискорень використовувалися тензовібраційні акселерометри на основі стрічкових тензорезисторів (рис. 2.4).

Вимірювання зусиль у всіх трьох поздовжніх тягах заднього навішування проводили тензозв'язками (рис. 2.5), робота яких заснована на застосуванні тензорезисторів, наклеєних за мостовою схемою на заздалегідь підготовлену площину.



Рис. 2.4. Тензовібраційний акселерометр



Рис. 2.5. Тензоланка

Тензоланки встановлювали всередину розбірних тяг із можливістю регулювання довжини. Усі датчики підключалися до двох аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) L-Card LTR-EU-2 (рис. 2.6).



Рис. 2.6. АЦП LTR-EU-2

Виведення інформації з АЦП на персональний комп'ютер здійснювалося через програмне забезпечення Lgraph2 (рис. 2.7), що дає змогу відстежувати одночасно кілька сигналів із різних датчиків у режимі реального часу.

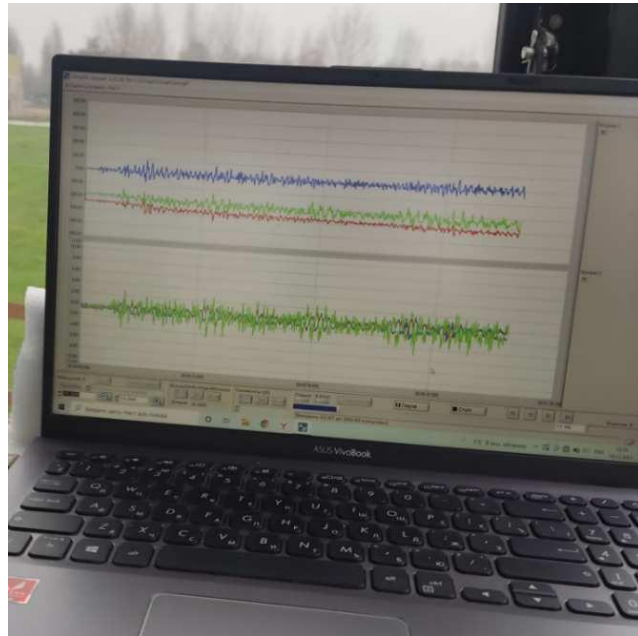


Рис. 2.7. Виведення інформації з АЦП.

Для визначення траєкторії руху трактора використовувалася навігаційна система Starfire-3000 (рисунок 2.8), адаптована для використання на тракторі Беларус-1221.2 [2].



Рис. 2.8. Навігаційна система Starfire-3000 на тракторі Беларус-1221.2

Середня похибка визначення координат даною системою становить не більше 30 мм, що дає змогу з доволі високою точністю отримати дійсну траєкторію руху. Модуль навігаційної системи встановлюється на даху трактора за допомогою штатного кронштейна (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Модуль навігаційної системи Starfire-3000, встановлений на даху трактора Беларус-1221.2.

Для виведення інформації з приймача використовувався дисплей GreenStar-4240. Він має можливість виводити всю необхідну інформацію, відображає швидкість руху, вид виконуваної роботи, кут повороту рульового колеса. Через меню налаштувань, можливо, відкалібрувати приймач навігації, задати геометричні параметри трактора, вибрати параметри оброблюваного поля, зберігати і вивантажувати з пам'яті пристрою збережені координати траєкторії руху (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Монітор GreenStar-4240 у кабіні трактора Беларус-1221.2

Для встановлення рульового колеса від AutoTrac Universal-300 [3] на рульовий вал трактора Беларус-1221.2 було виготовлено перехідну втулку (рис. 2.11), зовнішню частину якої кріплять до рульового колеса, а внутрішню – з'єднують із його валом за допомогою шліцевого з'єднання.



Рис. 2.11. Перехідна втулка.

Блок універсального підрульовального пристрою АТУ-200 закріплюється на рульовій колонці в місці кріплення підрульового перемикача за допомогою спеціального кронштейна (рис. 2.12).



Рис. 2.12. Кронштейн кріплення підрулювального пристрою.

Кронштейн був виготовлений з металевої смуги сталі марки СТЗ шириною 25 мм і товщиною 5 мм. На готовому виробі просвердлено чотири отвори діаметром 10 мм відповідно до точок кріплення на рульовій колонці та блоці підрулювального пристрою.

Після серії випробувань інформація записувалася на знімний носій за допомогою інтерфейсу USB. Подальше опрацювання отриманих даних проводили на персональному комп'ютері.

Висновки по розділу

Запропонована методика проведення польових досліджень трактора або МТА для отримання достовірних результатів передбачає виконання щонайменше трьох заїздів для кожної комбінації параметрів поступальної швидкості руху та кутової швидкості повороту керованих коліс від нульового положення до упору. При цьому повороти повинні здійснюватися як вліво, так і вправо. Швидкість поступального руху по поворотній смузі варіюється в межах 1,36...2,556 м/с, а кутова швидкість повороту керованих коліс – 0,124...0,31 с⁻¹.

Розроблений комплекс апаратури, зокрема тензометричної, обладнаний приладами і датчиками, дає змогу одночасно і в широких межах реєструвати під час проведення експериментів достатню кількість параметрів, що характеризують основні показники роботи агрегатору без значущих похибок.

Реалізований спосіб визначення траєкторії криволінійного руху МТА за допомогою навігаційної системи Starfire-3000, адаптованої для трактора Беларус-1221.2, дає змогу отримати її координати з високою точністю.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У програму лабораторних досліджень входило визначення характеристик, необхідних для моделювання процесу криволінійного руху МТА, тарування та налаштування вимірювальних приладів, розробка конструкції, монтаж і перевірка працездатності вдосконаленої навісної системи трактора Беларус-1221.2.

Запропонована модернізована конструкція навісної системи [11] відрізняється від серійної тим, що між трикутником, установленим на тракторі, та замком знаряддя розміщено прокладку 1 з пружного матеріалу – поліуретану марки НЦ-ПУ 5 з обґрунтованими фізико-механічними характеристиками. Прокладка наклеюється на зовнішні площини бічних поверхонь трубчастих елементів трикутника.

З метою збереження вихідних геометричних характеристик, що відповідають базовій навісній системі, і вписування прокладки у вихідну

конструкцію, стандартний трикутник розділили на вихідні вузли, а потім було незначно зменшено довжини трубчастих елементів таким чином, щоб під час складання за шаблоном розмірні параметри модернізованої системи з пружною прокладкою відповідали базовій.

Після необхідних тарувань встановили тензометричну та іншу вимірювальну апаратуру на трактор і навісне обладнання. Тензо-ланки були вбудовані в розбірні поздовжні верхню і нижні тяги, акселерометри для визначення прискорень встановлені в трьох базових точках на знаряддях. Аналогово-цифрові перетворювачі та персональний комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням розташовувалися всередині кабіни трактора для можливості регулювання, виставляння нульового значення прискорень розташування датчиків перед виконанням проїздів і контролю за їхніми показаннями.

Після встановлення трикутника на трактор проводилося налаштування навісної системи і перевірка її працездатності. Зокрема, регулювали довжини тяг із вбудованими в них тензозвеньями і кут нахилу трикутника відповідно до технічних вимог. У лабораторних умовах проведено оцінку якості зчленування навісного обладнання, що використовується під час випробувань. Зазначено більш щільне прилягання один до одного трикутника і замка навішування, що сприяє зменшенню крену і перекосу навісного обладнання в транспортному положенні.

Під час виконання різних польових сільськогосподарських операцій МТА, крім робочих ходів, здійснює повороти і холості проїзди, які можуть становити до 30...40 % від загальної довжини щоденних маршрутів [8].

Під час виконання основної технологічної операції, рухаючись по прямій, трактор не може миттєво перейти до криволінійного руху та здійснити поворот за мінімально можливим радіусом з огляду на бічне відведення та ковзання рушіїв на деформівній і пухкій опорній основі.

При цьому існує висока ймовірність виникнення екскаваційно-бульдозерного ефекту, за якого відбувається інтенсивне ковзання і навіть занос МТА.

Найбільш кінематично складними і динамічно навантаженими в процесі криволінійного руху на поворотній смузі є ділянки "вхід у поворот" і "усталений поворот" [15, 5], тому саме ці етапи обрано для експериментальних досліджень з метою визначення необхідних параметрів для оцінювання впливу навісного обладнання, яке перебуває в транспортному положенні, на обертальність МТА під час здійсненні кругового безпетльового повороту [5]. Основними характеристиками для порівняння дослідних результатів обрано граничні (максимальні) значення абсциси x_{\max} і ординати y_{\max} кривої траєкторії, описуваної кінематичним центром трактора на поворотній смузі.

Під час проведення експериментальних досліджень так само, як і під час аналітичних розрахунків, заведено, що перехід від траєкторії великої кривизни до прямолінійного руху ("вихід із повороту") відбувається за тим самим законом, що під час переходу від прямолінійного руху до ділянки усталеного повороту ("вхід у поворот"). Тому за основу взято одну, в нашому випадку також ліву гілку кругового безпетльового повороту.

На рис. 3.1 – 3.4 наведено графіки залежностей x_{\max} і y_{\max} від швидкості поступального руху v одиночного трактора, МТА з базовою та модернізованою навісними системами у складі трактора Білорусь- 1221.2 і сівалки СТВ-12 за різних кутових швидкостей повороту ω керованих коліс під час кругового безпетльового повороту.

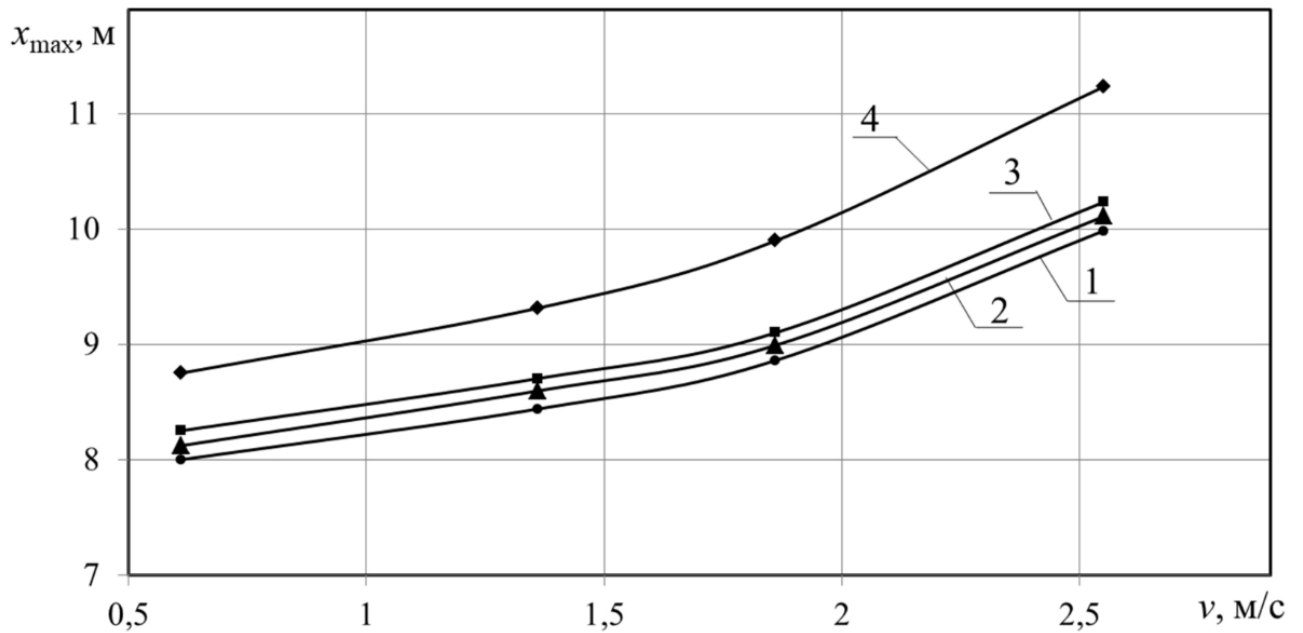


Рис. 3.1. Графіки залежності абсциси x_{\max} від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$: 1 – теоретична траєкторія руху трактора; 2 – дійсна траєкторія руху трактора; 3 – дійсна траєкторії руху МТА (дослідне навішування); 4 – дійсна траєкторія руху МТА (базове навішування)

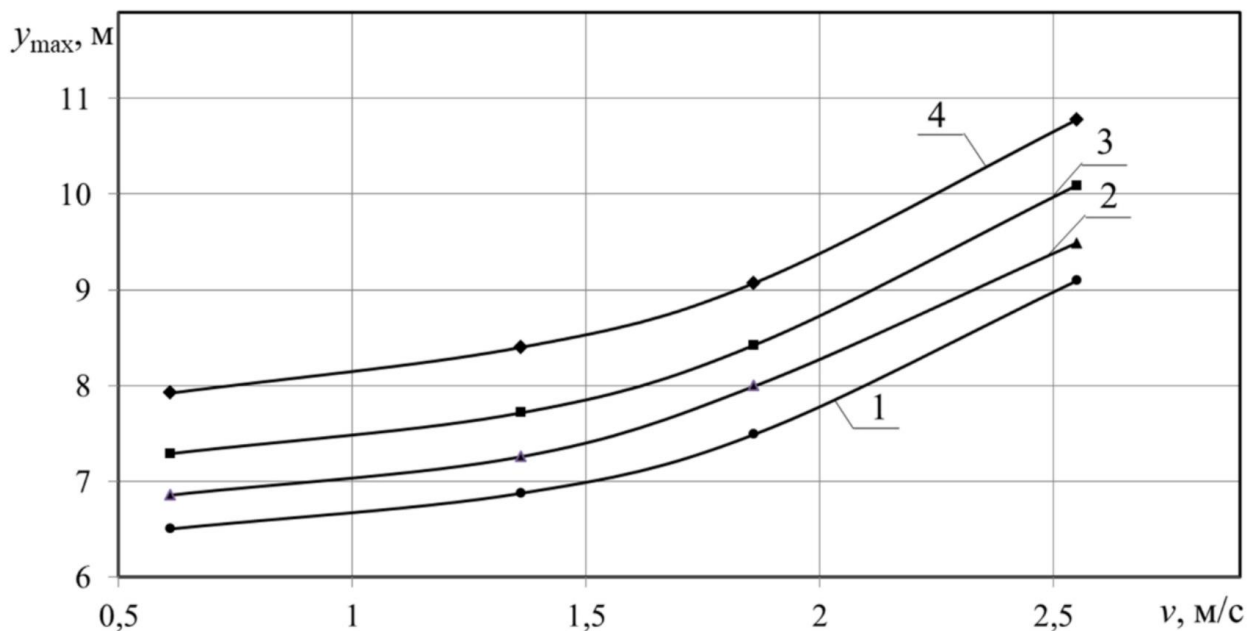


Рис. 3.2. Графіки залежності абсциси y_{\max} від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$: 1 – теоретична траєкторія руху трактора; 2 – дійсна траєкторія руху трактора; 3 – дійсна траєкторія руху МТА (дослідне навішування); 4 – дійсна траєкторія руху МТА (базове навішування).

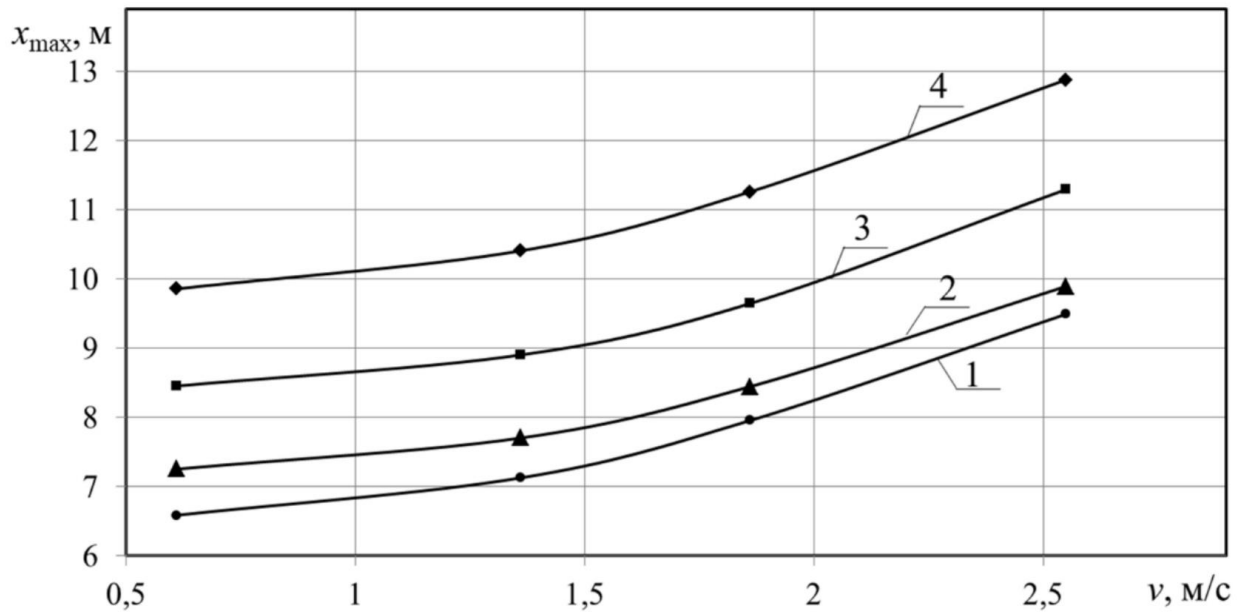


Рис. 3.3. Графіки залежності абсциси x_{\max} від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$: 1 – теоретична траєкторія руху трактора; 2 – дійсна траєкторія руху трактора; 3 – дійсна траєкторії руху МТА (дослідне навішування); 4 – дійсна траєкторія руху МТА (базове навішування).

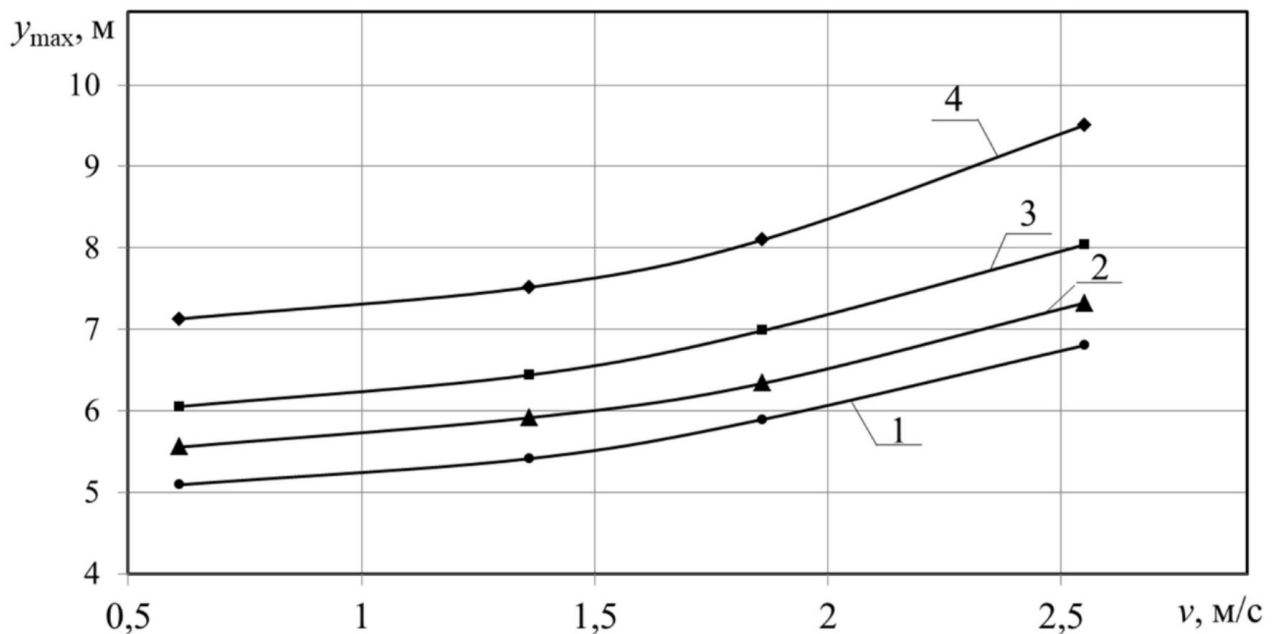


Рис. 3.4. Графіки залежності абсциси y_{\max} від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$: 1 – теоретична траєкторія руху трактора; 2 – дійсна траєкторія руху трактора; 3 – дійсна траєкторії руху МТА (дослідне навішування); 4 – дійсна траєкторія руху МТА (базове навішування).

Результати дослідів показали, що при постійній кутовій швидкості керованих коліс і збільшенні поступальної швидкості руху МТА зростають граничні значення абсциси x_{\max} та ординати y_{\max} траєкторії кінематичного центру агрегату (рис. 3.1 – 3.4).

Так за швидкості поступального руху одиночного трактора $v = 0,61$ м/с і швидкості повороту керованих коліс $\omega = 0,155$ с⁻¹ граничні дослідні координати дійсної траєкторії руху кінематичного центру дорівнюють: $x_{\max} = 8,12$ м і $y_{\max} = 6,85$ м. Для теоретичної траєкторії за тих самих ω і v отримано розрахунком $x_{\max} = 8,01$ м і $y_{\max} = 6,54$ м.

Експериментальні та теоретичні значення шуканих параметрів при збільшенні v до 2,556 м/с при цьому відповідно дорівнюють: $x_{\max} = 10,1$ м і $y_{\max} = 9,49$ м; $x_{\max} = 9,98$ м і $y_{\max} = 9,09$ м. Таким чином, зі збільшенням поступальної швидкості руху v з 0,61 м/с до 2,556 м/с гранична абсциса x_{\max} і гранична ордината y_{\max} дійсної траєкторії руху збільшилися відповідно на 1,98 м і 2,64 м, а для теоретичної траєкторії збільшення становило 1,84 м і 2,55 м. Середнє прирощення граничних значень абсциси й ординати при цьому становило близько 23 %.

При збільшенні швидкості поступального руху v МТА з базовою навісною системою у складі трактора Беларус-1221.2 і сівалки СТВ-12 (рисунки 3.1 – 3.4, криві 4) з 0,61 м/с до 2,556 м/с за всіх реалізованих кутових швидкостей повороту керованих коліс ω граничні значення дійсних траєкторій x_{\max} і y_{\max} зростають так само, як і у випадку з дійсною та теоретичною траєкторіями руху окремого трактора, у середньому на 23 %.

Із порівняння залежностей x_{\max} і y_{\max} дійсних траєкторій кінематичного центру від поступальної швидкості руху v МТА з базовою навісною системою у складі трактора Беларус-1221.2 і сівалки СТВ-12 (рисунок 3.1, крива 4, рисунок 3.2, крива 4) з тими самими параметрами,

що й для одиночного трактора (рисунок 3.1, крива 2, рисунок 3.2, крива 2), за кутової швидкості повороту керованих коліс $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$ видно, що відбувається зростання в усьому діапазоні збільшення v як поздовжніх Δx_{\max} на 0,63...1,12 м (7,18...10 %) відхилень, так і поперечних Δy_{\max} на 1,07...1,28 м (11,89...13,62 %) навісного агрегату, як порівняти з одиночним трактором.

У разі збільшення кутової швидкості повороту керованих коліс до $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$ значення відхилень зростають відповідно до $\Delta x_{\max} = 2,6...2,9 \text{ м}$ (23,17...26,4 %) (рис. 3.3, крива 2, крива 4) і $\Delta y_{\max} = 1,57...2,18 \text{ м}$ (21,31...22,96 %) (рис. 3.4, крива 2, крива 4).

Таким чином, зменшення часу маневру входу в поворот призводить до збільшення приблизно в 3,0 раза абсциси повороту, а ординати - в 1,4 раза.

Для того, щоб трактор перейшов від прямолінійної траєкторії до траєкторії великої кривизни під час входу в поворот на керованих колесах повинні виникнути бокові реакції з боку ґрунту, необхідний вплив яких зумовлений, зокрема, і кутовою швидкістю повороту керованих коліс, за збільшення якої відбувається інтенсивніше їхнє ковзання в напрямку поздовжньої осі трактора. За меншої кутової швидкості відбувається поступове збільшення бічних реакцій у міру зростання кута повороту керованих коліс і менш інтенсивне їхнє прослизання, чим можна пояснити зменшення при цьому відхилення від необхідної траєкторії руху. За різкого погіршення ґрунтових умов збільшується коефіцієнт опору коченню f і зменшується коефіцієнт зчеплення φ коліс із ґрунтом, отже, зменшується допустимий кут повороту керованих коліс, за якого можливе їхнє обертання без ковзання.

Порівняння величин дійсних максимальних абсцис і ординат траєкторії руху МТА з базовою навісною системою з їхніми теоретичними значеннями показало, що при кутовій швидкості повороту керованих коліс $\omega = 0,155 \text{ c}^{-1}$ збільшення Δx_{\max} становило $0,7...1,25 \text{ м}$ (8,41...11,11 %) (рисунок 3.1, крива 1, крива 4), а Δy_{\max} - $1,38...1,69 \text{ м}$ (15,62...18,16 %) (рисунок 3.2, крива 1, крива 4); за $\omega = 0,31 \text{ c}^{-1}$ - $\Delta x_{\max} = 3,27...3,38 \text{ м}$ (26,3...33,17 %) (рисунок 3.3, крива 1, крива 4), - $\Delta y_{\max} = 2,04...2,7 \text{ м}$ (27,26...28,58 %) (рисунок 3.4, крива 1, крива 4).

Аналізуючи вищенаведене, можна стверджувати, що заднє навісне обладнання має значний вплив на процес криволінійного руху МТА, тому для того, щоб отримати достовірні результати і дати адекватну оцінку обертальності агрегату під час криволінійного руху, необхідно провести дослідження не лише для окремого трактора, а й для МТА в цілому.

Як зі збільшенням швидкості поступального руху v , так і кутової швидкості повороту керованих коліс ω зростають відхилення від теоретичної траєкторії руху (рисунки 3.1 – 3.4). Це пов'язано з тим, що зростають вертикальні коливання остова трактора, ударні навантаження та інерційні зусилля з боку навісного обладнання, відбувається інтенсивніше бічне ковзання коліс. Ці фактори негативно впливають на обертальність МТА, сприяють буксуванню коліс, погіршенню або навіть втраті керованості та стійкості.

Завдяки еластичним властивостям пружного елемента, вписаного в модернізовану навісну систему трактора, вдалося знизити вплив інерційних сил з боку навісного обладнання на процес криволінійного руху агрегату. Експериментально виявлено, що для МТА з дослідною навісною системою у складі трактора Беларус-1221.2 і сівалки СТВ-12 так само, як і в усіх раніше розглянутих випадках, зі збільшенням поступальної швидкості руху v відбувається зростання максимальних значень абсцис і ординат дійсних траєкторій повороту в межах 21...24 % (рисунки 3.1 - 3.4, криві 3). При зміні поступальної швидкості руху v з $0,61 \text{ м/с}$ до $2,556 \text{ м/с}$ і постійній кутовій

швидкості руху керованих коліс $\omega = 0,155 \text{ c}^{-1}$ відбувається зменшення граничних значень абсциси та ординати траєкторії кінематичного центру МТА з модернізованою навісною системою відповідно на $\Delta x_{\max} = 0,5...0,99 \text{ м}$ (5,7...8,79 %) (рисунок 3.1, крива 3, крива 4) і $\Delta y_{\max} = 0,63...0,69 \text{ м}$ (6,36...8,16 %) (рисунок 3.2, крива 3, крива 4) порівняно з МТА з базовою навісною системою. У тому самому діапазоні зміни швидкостей v і значенні $\omega = 0,31 \text{ c}^{-1}$ зменшення склали: $\Delta x_{\max} = 1,4...1,61 \text{ м}$ (12,3...14,45 %) (рисунок 3.3, крива 3, крива 4), $\Delta y_{\max} = 1,08...1,47 \text{ м}$ (13,77...15,45 %) (рисунок 3.4, крива 3, крива 4).

Порівняння значень дійсних максимальних абсцис і ординат траєкторії руху МТА з модернізованою навісною системою і теоретичних значень цих параметрів показало, що при кутовій швидкості повороту керованих коліс $\omega = 0,155 \text{ c}^{-1}$ збільшення Δx_{\max} становило $0,24...0,26 \text{ м}$ (2,4...3 %) (рисунок 3.1, крива 1, крива 3), а $\Delta y_{\max} = 0,75...1 \text{ м}$ (9,98...11,09 %) (рисунок 3.2, крива 1, крива 3). У разі збільшення кутової швидкості керованих коліс до $\omega = 0,31 \text{ c}^{-1}$ отримано відповідно: $\Delta x_{\max} = 1,69...1,87 \text{ м}$ (15,96...22,08 %) (рисунок 3.3, крива 1, крива 3), $\Delta y_{\max} = 0,97...1,23 \text{ м}$ (15,37...15,94 %) (рисунок 3.4, крива 1, крива 3).

На рис. 3.5 і 3.6 наведено експериментальні графіки залежності довжини траєкторії l від швидкості поступального руху v для МТА з базовою і модернізованою навісними системами. Наприклад, довжина траєкторії, описуваної кінематичним центром МТА з базовою навісною системою за $v = 2,556 \text{ м/с}$ та $\omega = 0,155 \text{ c}^{-1}$ становила $l = 25,58 \text{ м}$; за $v = 1,86 \text{ м/с}$ та $\omega = 0,31 \text{ c}^{-1}$ – $l = 22,44 \text{ м}$. Результати експериментів засвідчили, що за будь-якого значення ω при збільшенні v відбувається зростання довжини траєкторії кругового безпетльового повороту, описуваного кінематичним центром у середньому на 23 %. Застосування пружного елемента дало змогу зменшити довжину траєкторії l за $\omega = 0,155 \text{ c}^{-1}$ на $1,26...1,87 \text{ м}$ (5,98...7,31 %), за $\omega = 0,31 \text{ c}^{-1}$ – на $2,86...3,14 \text{ м}$ (11,38...14,52 %).

На рис. 3.7 і 3.8 наведено експериментальні графіки залежностей максимальних абсцис x_{\max} і максимальних ординат y_{\max} дійсної траєкторії

кінематичного центру МТА від його швидкості поступального руху v з базовою та модернізованою навісними системами у складі трактора Беларус-1221.2 і плуга ПЛН-4-35 за різних кутових швидкостей повороту ω керованих коліс для кругового безпетльового повороту.

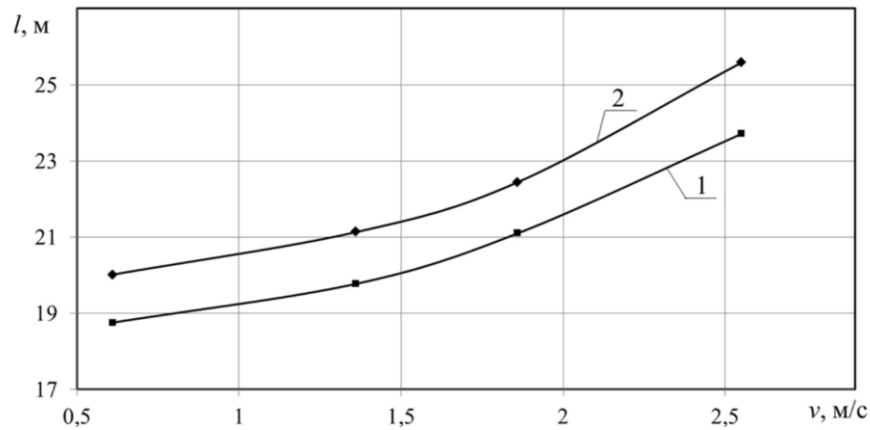


Рис. 3.5. Графіки залежності довжини траєкторії руху кінематичного центру МТА l від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,155 \text{ с}^{-1}$: 1 – дійсна траєкторія руху МТА з модернізованою навісною системою; 2 – дійсна траєкторія руху МТА з базовою навісною системою.

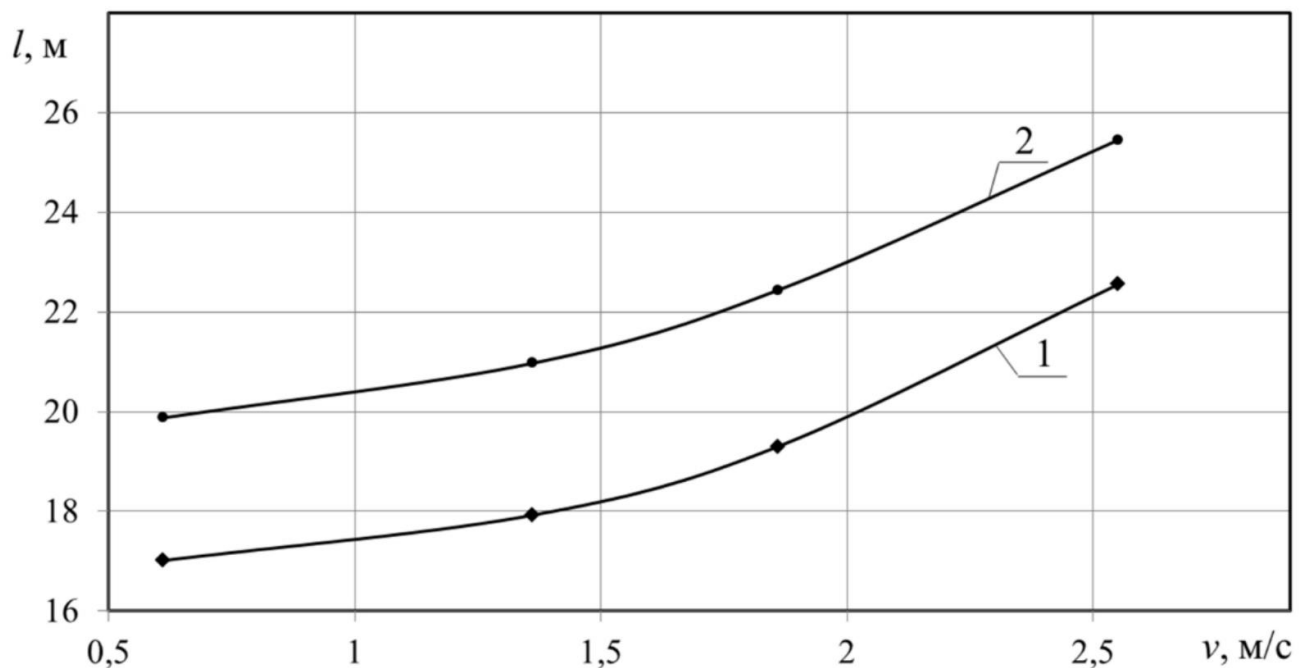


Рис. 3.6. Графіки залежності довжини траєкторії руху кінематичного центру МТА l від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$: 1 – дійсна траєкторія

руху МТА з модернізованою навісною системою; 2 – дійсна траєкторія руху МТА з базовою навісною системою.

Аналіз дослідних даних показав, що за однакових значень v і ω граничні абсциса x_{\max} й ордината y_{\max} дійсної траєкторії руху МТА у складі Беларус-1221.2+СТВ-12 (рис. 3.1 – 3.4, криві 3) у середньому відповідно на 7 % і 6 % більші, ніж для МТА Беларус-1221.2+ПЛН-4-35 (рис. 3.7, 3.8), що дає змогу зробити висновок про більш динамічно-напружений режим руху трактора, що агрегується із сівалкою, з огляду на її значні масово-геометричні характеристики.

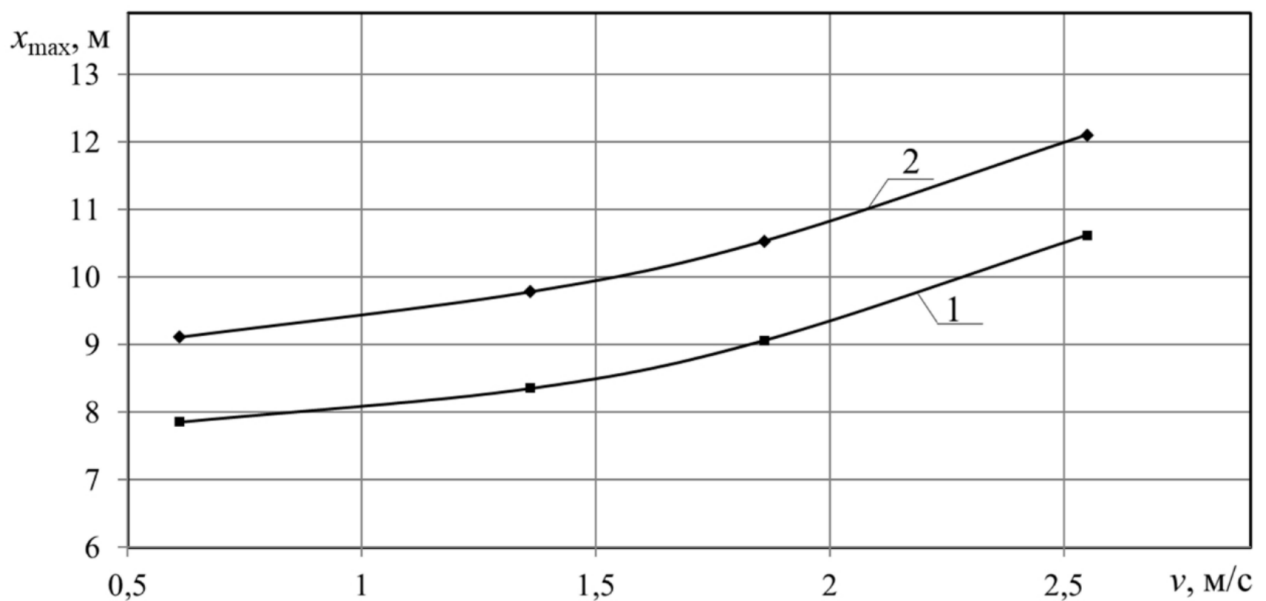


Рис. 3.7. Графіки залежності абсциси x_{\max} від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$: 1 – дійсна траєкторія руху МТА з модернізованою навісною системою; 2 – дійсна траєкторія руху МТА з базовою навісною системою

Виявлено також, що для агрегату в складі трактора і плуга, за сталої кутової швидкості повороту керованих коліс $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$ і зміни поступальної швидкості v з 0,61 м/с до 2,556 м/с спостерігається зменшення

значень максимальної абсциси і максимальної ординати дійсної траєкторії руху МТА з модернізованою навісною системою відповідно на $\Delta x_{\max} = 1,25... 1,48$ м (12,28...13,73 %) (рис. 3). 1,48 м (12,28...13,73 %) (рис. 3.7), $\Delta y_{\max} = 0,98...1,64$ м (11,97...14,58 %) (рис.3.8) порівняно з базовою навісною системою.

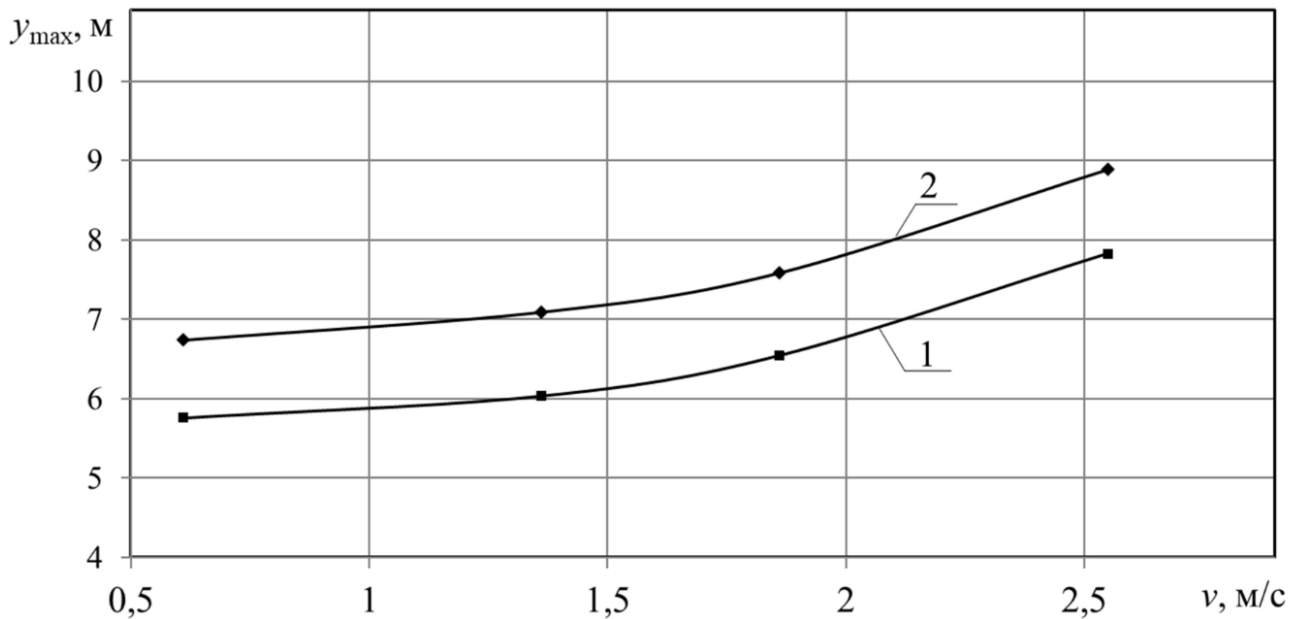


Рис. 3.8. Графіки залежності абсциси y_{\max} від поступальної швидкості руху v за $\omega = 0,31 \text{ с}^{-1}$: 1 – дійсна траєкторія руху МТА з модернізованою навісною системою; 2 – дійсна траєкторія руху МТА з базовою навісною системою.

Під час криволінійного руху на МТА діє бічна сила, що являє собою рівнодію складових сили інерції та сили тяжіння, які діють на бічну поверхню трикутника навішування. Бічна сила створює момент опору повороту, який прагне змістити трактор із заданої траєкторії, внаслідок цього відбувається збільшення нерівномірності розподілу вертикальних навантажень і бічних реакцій по колесах трактора, що призводить до збільшення їхнього буксування та бічного ковзання МТА [2], а іноді до повної втрати зчеплення з опорною основою.

Експериментально доведено, що збільшення кутової швидкості повороту керованих коліс призводить до зростання відхилень Δx_{\max} і Δy_{\max} від необхідної траєкторії руху, що зумовлено збільшенням моменту опору повороту, основною

складовою якою є сила інерції, що виникає в місцях з'єднання навісного обладнання і трактора [8].

Зменшення зусилля в поздовжніх тягах модернізованої навісної системи порівняно з базовою (рис. 3.9) пов'язане з тим, що прокладка з еластомеру, вписана в конструкцію навішування, має поглинаючу здатність і врівноважує частину сили інерції, яка передається від навісного обладнання трактору.

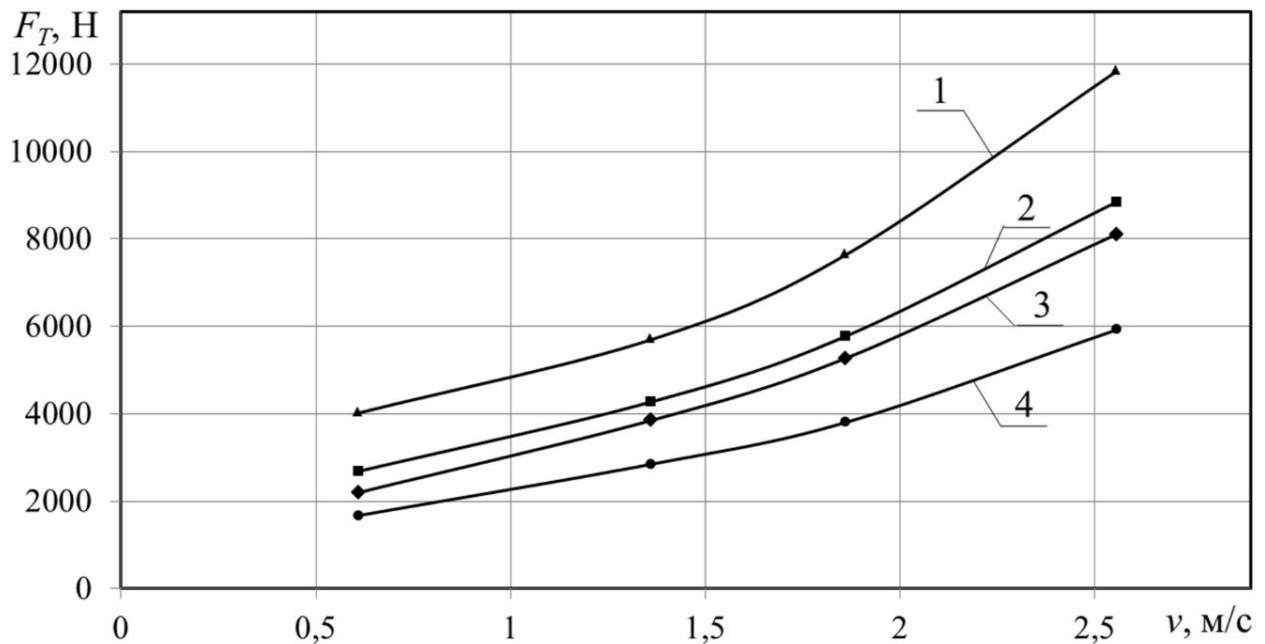


Рис. 3.9. Графіки залежності зусилля в тягах навісного пристрою FT від поступальної швидкості руху v : 1 – базова навісна система за $\omega = 0,31 \text{ c}^{-1}$; 2 – базова навісна система за $\omega = 0,155 \text{ c}^{-1}$; 3 – модернізована навісна система за $\omega = 0,31 \text{ c}^{-1}$; 4 – модернізована навісна система за $\omega = 0,155 \text{ c}^{-1}$.

Виявлено, що зусилля в тягах - розтягувальне, найбільше значення воно має в правій тязі під час здійснення повороту праворуч; під час здійснення повороту ліворуч – у лівій тязі.

Застосування прокладки з пружного елемента в конструкції задньої навісної системи дало змогу знизити значення переданого від навісного обладнання на трактор зусилля на 24...27 %.

Результати експериментальних досліджень підтвердили доцільність застосування модернізованої навісної системи, бо вона сприяє зниженню інерційних навантажень, які передаються від навісного обладнання трактору

через навісну систему, та зменшенню абсциси й ординати повороту, що дає змогу зменшити ширину й висоту поворотної смуги, а отже, і її площу.

Висновки по розділу

Застосування дослідної задньої навісної системи трактора Беларус-1221.2 дає змогу наблизити дійсну траєкторію руху МТА до необхідної. Отримано зменшення граничних значень абсциси x_{\max} на 1,4...1,61 м (12,3...14,45 %) і ординати y_{\max} на 1,08...1,47 м (13,77...15,45 %) поворотної смуги для МТА з модернізованою навісною системою порівняно з базовою.

Під час експериментальних досліджень доведено, що застосування прокладки з пружного елемента в конструкції задньої навісної системи трактора дало змогу знизити величини зусилля в тягах навісного пристрою на 24...27 % і прискорення в базових точках навісного обладнання – на 51...59 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Одним зі шляхів зниження динамічного навантаження з боку навісного обладнання на трактор є введення в конструкцію задньої навісної системи трактора пружних елементів у місцях з'єднання трактора з обладнанням, що також, своєю чергою, дасть змогу усунути асиметрію передавання вагового навантаження від обладнання на навісний пристрій трактора, що виникає внаслідок нещільного прилягання між з'єднувальною рамкою обладнання та трикутником на тракторі і усунути нерівномірний розподіл крутильних моментів на колесах.

Запропонована методика визначення бічного відхилення МТА від потрібної траєкторії дає змогу аналітично описати дійсну траєкторію руху МТА, а змінюючи поступальну швидкість руху та кутову швидкість повороту керованих коліс – визначити параметри, необхідні для виконання оптимального безпетльового повороту.

Результати експериментальних досліджень показали, що застосування модернізованої задньої навісної системи трактора Беларус-1221.2 дає змогу наблизити дійсну траєкторію руху МТА до необхідної. Отримано зменшення граничних значень абсциси на 1,4...1,61 м (12,3...14,45 %) і ординати на 1,08...1,47 м (13,77...15,45 %) поворотної полоси для МТА з модернізованою навісною системою порівняно з базовою. При цьому знижуються величини зусилля в тягах навісного пристрою на 24...27 % і прискорення в базових точках навісного обладнання – на 51...59 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лапін В.І. Експлуатація та ремонт сільськогосподарської техніки: підручник. Київ: Агроосвіта. 2018. 350 с.
2. Ковальчук О.В., Петров В.І. Будова та вдосконалення навісних систем тракторів. Харків: Колегіум. 2019. 285 с.
3. Жук В.О. Машинно-тракторні агрегати: ефективність роботи та шляхи її підвищення. Львів: ЛНАУ. 2020. 312 с.
4. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Проблеми трибології. 2020. № 2. С 34–41.
5. Васильєв П.О., Савчук О.Г. Теорія та розрахунок сільськогосподарських машин. Вінниця: Нова книга. 2017. 290 с.
6. Григоренко П.І., Шевчук В.М. Динаміка та маневреність тракторів з навісними агрегатами. Полтава: ПДАА. 2019. 275 с.
7. Карпенко С.І. Удосконалення конструкції задньої навісної системи тракторів. Київ: Аграрна наука. 2021. 260 с.
8. Дорошенко Л.А. Підвищення ефективності використання машинно-тракторного агрегату. Харків: ТОР. 2018. 280 с.
9. Кузьменко В.І. Оптимізація роботи навісного обладнання сільськогосподарських тракторів. Одеса: ОНАХТ. 2020. 265 с.
10. Rogovskii, I. L., Borak, K. V., Maksimovich, E. Yu., Smelik, V. A., Voinash, S. A., Maksimovich, K. Yu., & Sokolova, V. A. (2020). Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes. T-series. Journal of Physics : Conference Series. 1679 (4), art. №. 042084.

11. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с
12. Бойко С.П., Іваненко О.П. Ефективність та надійність роботи тракторних навісних систем. Львів: ЛНТУ. 2018. 245 с.
13. Грищенко І.В. Маневреність тракторних агрегатів на полях з різними умовами роботи. Київ: Освіта України. 2019. 310 с.
14. Мороз О.Г. Механізми керування навісним обладнанням тракторів. Полтава: ПДАА. 2021. 280 с.
15. Степаненко П.О. Динаміка взаємодії агрегатів із навісними пристроями. Харків: ХНАУ. 2020. 312 с.
16. Смірнов В.О. Підвищення маневреності тракторів за рахунок модернізації навісних систем. Тернопіль: Економічна думка. 2018. 295 с.
17. Жук Г.Л. Системи навіски тракторів: проблеми та перспективи удосконалення. Вінниця: Нова книга. 2019. 270 с.
18. Дерев'яно Д. А., Кириєнко О. В. Критерії оцінки обертальності машинно-тракторного агрегату. 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. 300-302.
19. Кириєнко О. В. Способи агрегування машинно-тракторних агрегатів. 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. 15-17.
20. Кириєнко О. В. Способи руху машинно-тракторних агрегатів на поворотній смузі. Збірник тез X Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу

сіськогосподарських машин і знарядь» 18 квітня 2024 р. Житомир: ЖАТФК, 2024. С. 200.