

## ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ РУХУ ТРАКТОРА ХТЗ-160 ПО ЗАДАНИЙ ТРАЕКТОРІЇ ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ

**Макаренко М. Г., доц., Кулаков Ю. М., ст. викл.**

*Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка*

**Макаренко О. М., менеджер**

*UkrFarming*

*Наводяться результати досліджень по підвищенню точності руху трактора ХТЗ-160 по заданій траєкторії використанням інтелектуальної системи адаптивного керування.*

**Вступ.** Проблема підвищення ефективності використання тракторів тісно пов'язана з підвищенням їх маневрових якостей та стабільно гарантованого руху агрегатів по заданій траєкторії (по полю та при розворотах) з використанням сучасних засобів автоматичного інтелектуального керування.

При виконанні технологічних процесів важливо щоб трактор у складі машинно-тракторного агрегату (МТА) рухався по заданій траєкторії з мінімальним відхиленням від неї. Однак, на МТА діють як внутрішні, так і зовнішні фактори, що порушують заданий напрямок руху. Для руху по заданій траєкторії водій через органи керування коригує напрям руху, що забезпечує підтримання прямолінійного руху агрегату або його поворот.

Використання принципів системного підходу дозволяє розглядати рух МТА по заданій траєкторії як систему машина - водій - опорна поверхня (грунт). При цьому однією з найбільш вагомих властивостей трактора у складі МТА є його керованість.

В якості критеріїв оцінки забезпечення руху МТА по заданому напрямку застосовують наступні кількісні показники: граничне значення швидкості зміни кривизни траєкторії різних точок; мінімальний радіус повороту при круговому русі; питома сила тяга, необхідна при повороті; кількість енергії, що витрачається на управління при русі по заданій траєкторії; коефіцієнт використання зчпної ваги при повороті.

**Аналіз публікацій.** Дослідженню питань управління при русі по заданій траєкторії, маневреності колісних машин та проведенню аналізу впливу даних показників на продуктивність, встановленню тенденцій розвитку відповідних технічних засобів неодноразово розглядалось провідними вченими. Так приводяться і аналізуються визначення властивості маневреності у формулюваннях Е. А. Чудакова, А. М. Ляпунова, В. В. Гуськова, Л. В. Смірнова, А. Е. Фаробіна [1, 2] та ін. Розглянуті основні показники і характеристики руху,

що визначають співвідношення параметрів машин, які забезпечують стійкість руху по заданій траєкторії.

В роботах М. А. Подригало, В. П. Волкова, О. А. Бобошко проведений аналіз зчїпних властивостей шин з опорною поверхнею [3, 4]. Вказані автори відзначають залежність коефіцієнта зчеплення від тиску в контактї і дотичної напруги в площинї контакту, а також розглядають зв'язок коефіцієнта зчеплення з напругою елементів шини в контактї.

Враховуючи узагальнене формулювання поняття керованостї та маневреностї, як властивостей машини витримувати заданї через рульовий механїзм курсовий напрям і траєкторїю, слід зазначити, що чисельних оцїнок і методу їх визначення, що безпосередньо характеризують точнїсть траєкторїї МТА на базї трактора не існує. Це затруднює попереднє прогнозування маневреностї на етапах розробки рекомендацїй по створенню на базї енергетичного модуля комбїнованих МТА у яких спостерїгається змїнне положення центру ваги при рїзних умовах агрегування, а, вїдповїдно, значна вїдмїннїсть взаємодїї керованих колїс з опорною поверхнею.

**Мета і постановка задачї.** Метою роботи є дослїдження проблеми пїдвищення точностї ведення трактора ХТЗ-160 по заданїй траєкторїї за рахунок використання інтелектуальної системи керування, здатної корегувати напрямок руху МТА у вїдповїдностї до заданих вимог.

#### **Вирїшення задачї:**

Здатнїсть колїсного агрегату входити в поворот, тобто реагувати на управляючу дїю, є характеристикою керованостї. Керованїсть колїсного агрегату оцїнюється, як правило, по величинї кутового прискорення в площинї дороги, що виникає при поворотї керованих колїс [3]. Кутове прискорення виникає у випадку, якщо момент, що повертає, буде бїльшим моменту опору повороту. Існує поняття коефіцієнта керованостї колїсної машини, що є вїдношенням моменту, що повертає, до моменту опору повороту. В початковий момент часу здїйснення повороту цей коефіцієнт (якщо вїн бїльше одиницї) показує, що колїсний агрегат здатний увїйти в поворот. Таким чином, виникла необхіднїсть дослїдити керованїсть трактора у складї МТА та запропонувати заходи по її пїдвищенню.

Перспективним напрямком вирїшення вказаної проблеми є використання комбїнованого способу управлїння, що дозволяє полїпшити показники маневреностї колїсних тракторів. Необхїднїсть в комбїнованому способї управлїння виникає тодї, коли збїльшення кута повороту керованих колїс  $\alpha$  не призводить до зменшення радїусу повороту  $R_2$  (збїльшенню кутової швидкостї  $\omega$  повороту). Тому розглянемо модель руху колїсної машини на поворотї у випадку  $\alpha = const$  і проведемо оцїнку повороткостї і керованостї при кїнематичному і комбїнованому способах управлїння.

Маневренїсть пов'язана з безпекою руху трактора та точнїстю виконання технологїчних процесїв. Досить часто при втратї трактором керованостї порушується також його стїйкїсть, і навпаки. У зв'язку з цим керованїсть трактора

часто розглядають як окремий випадок загальної задачі його стійкості. Трактор повинний мати добру керованість на будь-якому періоді експлуатації.

Маневреність залежить від бічної еластичності шин коліс, стабілізації керованих коліс, їхніх коливань і відповідності кінематики підвіски керованих коліс кінематиці рульового приводу. Крім того, вона залежить від зовнішніх умов (поперечного ухилу дороги, величини коефіцієнта зчеплення шин з дорогою, бічного вітру і т.п.).

Траєкторію руху трактора в загальному випадку можна розглядати як криволінійну з кривиною, яка безупинно змінюється. Якщо кривина траєкторії близька до нуля, рух умовно вважають прямолінійним.

Криволінійність руху обумовлена необхідністю здійснювати повороти відповідно до траєкторії, що задається водієм, а також в результаті дії зовнішніх збурювань. Такий рух трактора характеризується зміною в часі положення його подовжньої і вертикальної осей, а також наявністю подовжніх і головним чином поперечних прискорень.

Процес керування рухом трактора характеризують три групи параметрів: траєкторні, курсові та крену. На більшість цих параметрів впливають як конструктивні особливості трактора, так і ергономічні дані водія як керуючої ланки. Тому варто розглядати керованість трактора не ізольовано (як механічної системи), а як керованість машинно-тракторного агрегату (МТА).

Надійність керування трактора забезпечується властивістю системи МТА зберігати стійкість керування в заданих умовах і режимах руху.

Для оцінки маневреності існує досить багато оціночних показників. До числа, основних оціночних показників, передбачених національними стандартами і Правилами КВТ ЄЕК ООН, відносять: стійкість керування траєкторії; стійкість курсового керування; стійкість керування траєкторій при гальмуванні; стійкість курсового керування при гальмуванні; граничну швидкість виконання маневру  $V_{np}$ , км/год; швидкість на початку зниження стійкості керування траєкторією  $V_{mp}$ , км/год; швидкість початку зниження стійкості курсового керування  $V_{курс}$ , км/год.

Крім цього, існує цілий ряд додаткових показників і характеристик керованості, з яких можна виділити наступні: характеристику статичної траєкторної керованості; характеристику «ривок руля»; характеристику виходу з повороту; характеристику легкості рульового керування; граничну швидкість входу в заданий поворот; граничну швидкість входу в задану зону; середню кутову швидкість повороту рульового колеса на прямолінійній ділянці дороги.

В цілому під керованістю розуміють сукупність властивостей, що визначають характеристики реакцій трактора на керуючі впливи водія та зовнішні збурювання, а також витрати водієм енергії на керування.

Під стійкістю руху трактора по заданій траєкторії розуміють сукупність властивостей, що визначають числові характеристики тих граничних значень, при перевищенні яких трактор не повертається у вихідне положення після припинення дії збудливого сигналу.

При криволінійному русі по горизонтальній поверхні та відсутності бічних сил на трактор у поперечному напрямку діє тільки сила інерції  $P_{jy}$  (рис.1).

Складові цієї сили, що припадають на передні і задні колеса трактора викликають відповідні їм кути відведення  $\delta_1$  і  $\delta_2$ , які тільки в окремому випадку рівні за величиною.

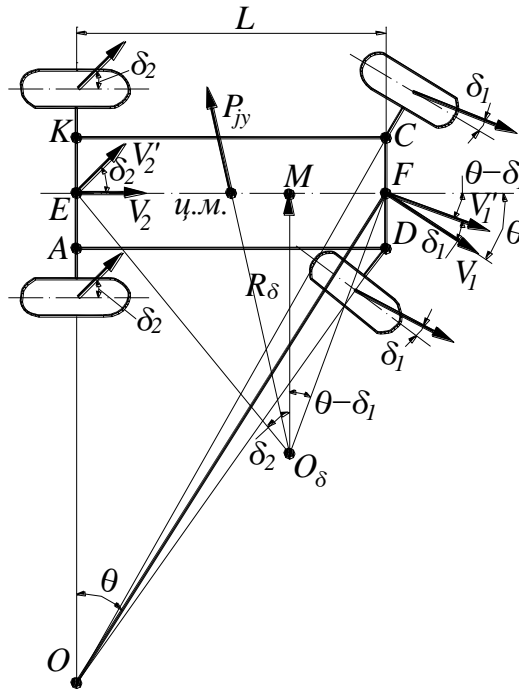


Рис. 1 – Схема повороту трактора при бічному відведенні шин

Відведення правого і лівого коліс однієї осі також неоднакове, внаслідок чого вектори їх швидкостей не рівнобіжні. Для керованих коліс це, зокрема, обумовлюється і поворотом їх на різні кути. У той же час траєкторія руху визначається кутами відведення центрів його передньої і задньої осей, які є середніми між кутами відведення відповідних правих і лівих коліс.

При наявності бічного відведення, на такі ж кути і в той же бік відхиляються вектори швидкостей середніх точок передньої  $V_1$  і задньої  $V_2$  осей. Позначимо нові вектори  $\vec{V}'_1$  і  $\vec{V}'_2$ . Відповідно змінюється і положення миттєвого центра повороту трактора, як точки перетинання перпендикулярів до векторів швидкостей  $\vec{V}'_1$  і  $\vec{V}'_2$ . З урахуванням бічного відведення шин він уже буде не в точці  $O$ , а в точці  $O_\delta$ . Середній радіус повороту трактора з урахуванням впливу бічного відведення шин  $R_\delta$ , визначається довжиною перпендикуляра з миттєвого центра повороту на подовжню вісь трактора, тобто буде дорівнювати відрізку  $O_\delta M$ .

У трикутнику  $EMO_\delta$  кут  $EO_\delta M$  дорівнює по побудові  $\delta_2$ , а в трикутнику  $MFO_\delta$  кут  $MFO_\delta = \theta - \delta_1$ , де  $\theta$ , – середній кут повороту передніх керованих коліс.

Тоді:

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{EM}{MO_\delta} = \frac{EN}{R_\delta}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}(\theta - \delta_1) = \frac{MF}{R_\delta}. \quad (2)$$

Звідси, оскільки сума  $EM+MF=L$  – база трактора, знаходимо середній радіус повороту  $R_\delta$  трактора з урахуванням впливу бічного відведення шин

$$R_{\delta} = \frac{L}{\operatorname{tg} \delta_2 + \operatorname{tg}(\theta - \delta_1)}. \quad (3)$$

Враховуючи, що кути відведення невеликі ( $5 - 10^\circ$ ), а кути повороту керованих коліс при високих швидкостях руху, коли відведення істотно впливає на керованість трактора, також не є великими, тангенси кутів можна замінити самими кутами, вираженими в радіанах

$$R_{\delta} = \frac{L}{\theta + \delta_2 - \delta_1}. \quad (4)$$

Порівняння формул свідчить про те, що співвідношення кутів відведення коліс передньої осі  $\delta_1$  і задньої осі  $\delta_2$  у різному ступені змінюють величину середнього радіуса повороту. Якщо кути відведення коліс передньої і задньої осей однакові ( $\delta_1 = \delta_2$ ), середні радіуси повороту однакові

$$R_{cp} = R_{\delta}. \quad (5)$$

У цьому випадку бічне відведення коліс не впливає на кривину траєкторії повороту і лише миттєвий центр повороту зміщується вперед відносно осі задніх коліс трактора. Такі трактори визначаються як ті, що мають нейтральну поворотність. Для проходження кругової траєкторії певного радіуса  $R_{cp}$  потрібен однаковий кут повороту керованих коліс  $\theta$  як при жорстких, так і з урахуванням впливу бічного відведення.

Якщо кут відведення передніх коліс  $\delta_1$  більший, ніж у задніх коліс  $\delta_2$ , знаменник у формулі (4) зменшується і середній радіус повороту за рахунок впливу відведення збільшується.

$$\delta_1 > \delta_2 \rightarrow R_{\delta} > R_{cp}. \quad (6)$$

Такі трактори визначають як трактори що мають недостатню поворотність. Для проходження, повороту із заданим радіусом  $R_{cp}$ , при недостатній поворотності водій повинний компенсувати вплив бічного відведення більшим кутом повороту керованих коліс  $\theta_{\delta}$ , у порівнянні з кутом при жорстких колесах

$$\theta_{\delta} > \theta. \quad (7)$$

Якщо ж кут бічного відведення передніх коліс  $\delta_1$  менший, ніж у задніх коліс  $\delta_2$ , знаменник у формулі (4) збільшується і середній радіус повороту за рахунок впливу відведення зменшується.

$$\delta_1 < \delta_2 \rightarrow R_{\delta} < R_{cp}. \quad (8)$$

Трактор, при заданому куті повороту керованих коліс  $\theta$ , що відповідає при жорстких колесах повороту по колу з радіусом  $R_{cp}$ , у цьому випадку за рахунок відведення буде втягуватися в більш крутий поворот з меншим радіусом  $R_{\delta}$ . Тому такі трактори визначають як ті, що мають надлишкову поворотність і для повороту з заданою кривизною (заданим радіусом  $R_{cp}$ ) водій повинен повертати керовані колеса на кут  $\theta_{\delta}$ , менший, ніж було б потрібно у випадку жорстких коліс.

$$\theta_{\delta} < \theta. \quad (9)$$

З вищевикладеного випливає, що водій трактора має можливість компенсувати вплив бічного відведення на кривизну траєкторії повороту як при недостатній, так і при надлишковій поворотності. Проте в останньому випадку теоретично можливо нестійкий рух з повною втратою керованості. Дійсно, зменшення радіусу повороту  $R_{\delta}$  при  $\delta_2 > \delta_1$  викликає відповідне збільшення відцентрової сили, яка обернено пропорційна радіусу повороту. Внаслідок збільшеної бічної сили зростають кути бічного відведення, що додатково зменшує радіус повороту з відповідними наслідками.

Трактор погано піддається управлінню коли колеса рухаються юзом. Дослідженнями встановлено, що електронна інтелектуальна система керування рухом трактора повинна відповідати наступним вимогам:

- при порушенні штатних (звичайних) умов руху, коли зчеплення колісних шин трактора з опорною поверхнею наближається до своєї фізичної межі, трактор не повинен поводитися непередбачувано, динаміка його руху не повинна змінюватися різко, не повинні виникати заноси, різкі розвороти, з'їзди з дороги або перекидання;

- навіть на слизьких або обмерзлих дорогах відхилення від заданого водієм напрямку руху повинні залишатися мінімальними (в межах забезпечення безпеки); ступінь завантаженості трактора в межах заданої норми не повинна впливати на стійкість його руху;

- зовнішні фактори не повинні значно впливати на рух трактора; параметри і характеристики трактора, що відповідають за безпеку руху, повинні залишатися в оптимальних межах для суб'єктивного сприйняття водієм.

Для забезпечення високої якості реалізації складних і точних рухів доцільно застосувати методи інтелектуального управління (advanced intelligent control). При роботі системи датчики вимірюють параметри факторів, для того, щоб визначити необхідну величину сигналу керування.

Сигнали з цих датчиків є вхідними параметрами для електронного блоку керування. Електронний блок керування використовує інформацію, що надходить на нього, від різних датчиків для того, щоб визначити оптимальну величину коректувальної дії для забезпечення відповідності руху МТА по заданій траєкторії.

Відповідно до отриманих результатів розрахунків, електронний блок управління виробляє сигнали керування, і надсилає їх до певних виконавчих пристроїв. Основним елементом системи управління є комп'ютер, швидкодія якого дозволяє відстежувати зміну стану керованого агрегату та дій водія. Виконавчими механізмами або актюаторами - є пристрої підгальмування коліс одного з бортів, за допомогою яких блок управління здійснює керовані дії.

Основною особливістю системи керування стійкістю є її функціонування не в процесі гальмування, а в процесі криволінійного руху, тобто активний вплив на динаміку руху. Блок керування системи адаптивного керування, використовуючи показники датчиків повороту рульового колеса і датчиків кутової швидкості коліс, розраховує теоретичні показники динаміки руху і

порівнює їх з показниками датчиків крутного моменту і поперечного прискорення.

Принцип роботи даної системи наступний. Датчики частоти обертання коліс безперервно передають значення швидкості кожного колеса. Сигнал від датчика кута повороту рульового колеса передається по шині (CAN) у блок керування. Уся ця інформація аналізується модулем керування для розрахунку напрямку руху, заданого рульовим керуванням і розпізнає поведінку трактора. Датчик бічного прискорення повідомляє блоку керування про бічний рух трактора, тоді як датчик ризику сигналізує про появу моменту. За даними цих двох датчиків блок керування визначає поточний стан трактора.

Якщо поточний стан відмінний від заданого, то прораховується цикл керування. Система стабілізації руху визначає яке колесо має бути пригальмовано і наскільки різко. Після цього система перевіряє, наскільки вдалим було втручання, на основі даних від датчиків. Цикл керування завершується при успішному результаті втручання, і система керування переходить до стеження за поведінкою трактора. Якщо стійкість руху не відновлена, то цикл керування повторюється.

На рисунку 2, а показані порівняльні значення найбільш важливих змінних величин, аналіз яких здійснювався в процесі моделювання: кут повороту руля (град.), швидкість ризику (град/с), бічне прискорення (м/с<sup>2</sup>), кут бічного відходу трактора (град.). На рисунку 2, б показана модельована траєкторія руху тракторів.

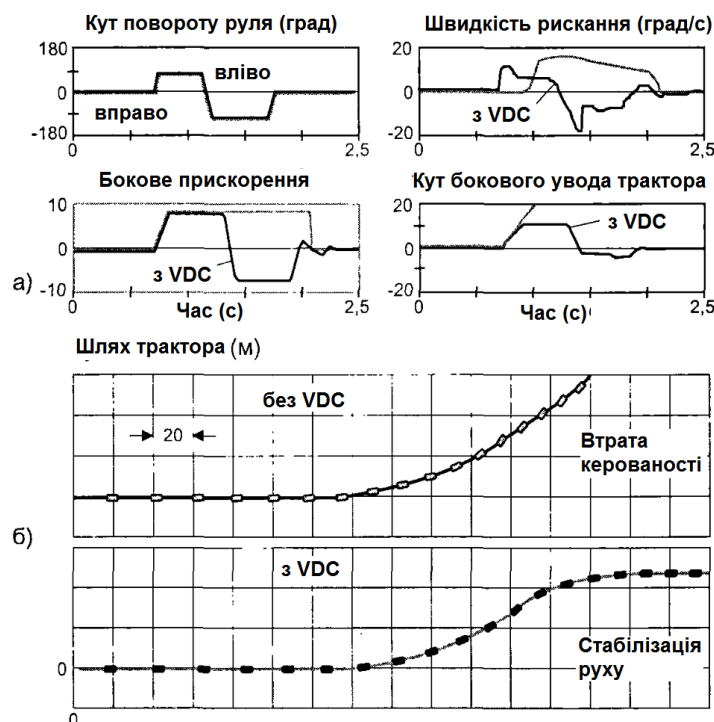


Рис. 2 – Дослідження руху трактора з системою адаптивного керування при різкій зміні напрямку руху

Оскільки при повороті трактора вертикальні реакції на колесах зовнішнього борту більші, ніж на колесах внутрішнього, то, створюючи на колесах дотичні реакції пропорційно вертикальному навантаженню, можна

забезпечити максимальні значення  $\frac{d\omega}{dt}$  і  $\alpha^*$ . Граничний середній кут  $\bar{\alpha}^*$  повороту керованих коліс обмежений граничними силами по зчепленню коліс з дорогою. При великих  $\bar{\alpha} > \bar{\alpha}^*$  збільшуються бічні реакції на колесах, що спричиняє за собою зменшення  $R_{k1} + R_{k2}$  до нуля.

На рисунку 3 приведені залежності мінімального радіусу повороту  $R_{2min}$  трактора ХТЗ-16131 від швидкості руху для комбінованого та кінематичного способів повороту.

На полі, підготовленому під посів комбінований спосіб керування забезпечує більш високе значення  $\omega_{max}$  (менше  $R_{2min}$ ) в порівнянні з кінематичним. Застосування комбінованого способу керування на цьому ж полі дає зниження повороткості трактора ХТЗ-16131 на 10-35%, що суттєво впливає на кінцевий результат – продуктивність даного машинно-тракторного агрегату.

При виконанні розвороту на поворотних смугах при виконанні технологічних операцій, система інтелектуального керування трактора самостійно визначає в який момент, яке колесо необхідно підгальмувати, щоб знизити або запобігти бічному проковзуванню або відведенню керованих коліс.

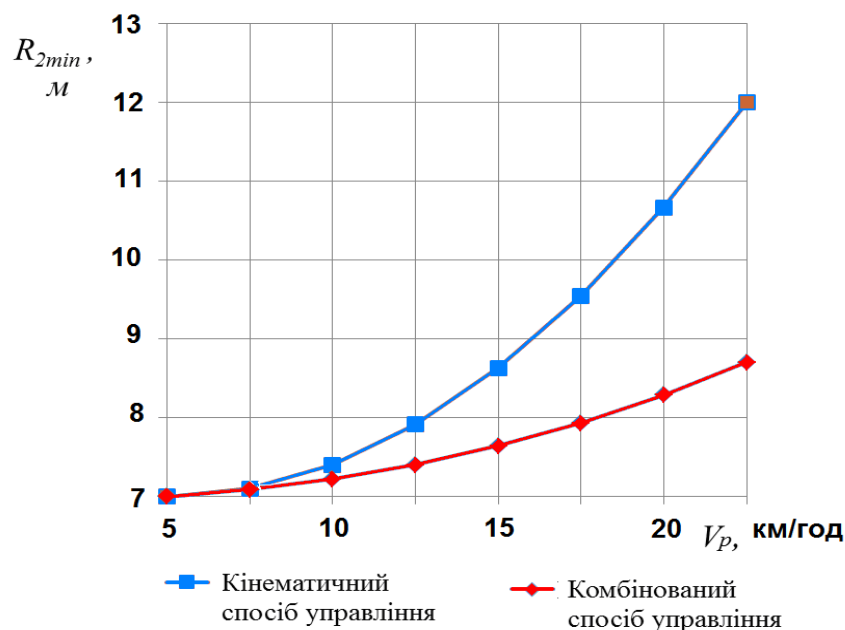


Рис. 3 – Залежність мінімального радіусу повороту від швидкості руху

**Висновки.** Застосування системи інтелектуального керування є одним із засобів поліпшення властивостей керованості колісних тракторів, що мають зміщений до задньої осі центр мас (мале навантаження на керовані колеса). Для його ефективного застосування необхідно автоматично узгодити кут повороту керованих коліс і різницю дотичних реакцій на ведучих колесах. Застосування комбінованого способу керування, у порівнянні з кінематичним, дозволяє зменшити радіус повороту (збільшити кутову швидкість) машини удвічі.

Автоматичне узгодження кутів повороту керованих коліс і гальмування заднього внутрішнього колеса трактора є найбільш ефективним варіантом реалізації комбінованого способу керування поворотом.



Проведеним аналізом встановлено, що керованість трактора при повороті забезпечується двома діями  $dV_{X1}/dt$  і  $d\bar{\alpha}/dt$ . Ступінь впливу  $dV_{X1}/dt$  залежить від кривизни траєкторії руху машини, а вплив  $d\bar{\alpha}/dt$  – від швидкості руху  $V_{X1}$  і чутливості машини до повороту  $\mu_l$ .

Дослідженнями встановлено, що на полі, підготовленому під посів комбінований спосіб керування забезпечує більш високе значення  $\omega_{max}$  (менше  $R_{2\ min}$ ) в порівнянні з кінематичним. Застосування комбінованого способу керування на цьому ж полі дає зниження повороткості трактора ХТЗ-16131 на 10-35%, що суттєво впливає на кінцевий результат – дозволяє чітко виконувати технологічний процес, поліпшити якість робіт, підвищити продуктивність машин, зменшити експлуатаційні витрати і т.д.

### Список використаних джерел

1. Литвинов А.С., Немцов Ю.М., Волков В.С. Некоторые вопросы динамики неустановившегося поворота автомобиля // Автомобильная промышленность. 1978.- № 3.- с. 20-22.
2. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин.-М.: Машиностроение, 1970.- 176 с.
3. Подригало М.А., Бобошко А.А. Синтез законов рационального управления поворотом колесной машины // Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета. Вып. 15 - 16. - Харьков: Изд-во ХНАДУ. - 2001. - с. 143 - 145.
4. Подригало М., Гречко Л., Бобошко О. Підвищення маневреності колісних тракторів // Машинознавство. - 1999. - № 10. - с. 55 - 58.

### Аннотация

#### **ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАКТОРА ХТЗ-160 ПО ЗАДАНОЙ ТРАЕКТОРИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Макаренко Н. Г., Кулаков Ю. М., Макаренко А. Н.*

*Приводятся результаты исследований по повышению точности движения трактора ХТЗ-160 по заданной траектории использованием интеллектуальной системы адаптивного управления.*

### Abstract

#### **INCREASE OF STABILITY OF MOTION OF TRACTOR OF ХТЗ-160 ON ZADANOY OF TRAJECTORY THE USE OF INTELEKTUAL'NOY OF SYSTEM OF ADAPTIVE CONTROL**

*N. Makarenko, Y. Kulakov, A. Makarenko*

*Results over of researches are brought on the increase of exactness of motion of tractor of KHTZ-160 on the set trajectory the use of the intellectual system of adaptive control.*