

**ПІДВИЩЕННЯ МАНЕВРНОСТІ КОМБІНОВАНИХ  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ 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 на маневрових якостей комбінованих сільськогосподарських агрегатів на базі тракторів використанням інтелектуальної системи адаптивного керування.*

**Вступ.** До найважливіших чинників, що визначають технічний рівень сучасних тракторів та складних с. г. машин, відноситься ступінь їх оснащення електронними пристроями. Тому розробка електронних систем керування тракторами та машинно-тракторними агрегатами (МТА) на їх базі є вельми актуальним завданням для машинобудування. В даний час накопичений значний досвід застосування електронної апаратури на тракторах. Використання цього досвіду є важливою умовою прискорення розробок нових, більш досконалих електронних пристроїв. Застосування електронної апаратури в системах керування агрегатами трактора у ряді випадків спричинило доцільність зміни конструкції самих агрегатів. Тому сучасна тракторна електронна система керування фактично є комплексом власне електронної апаратури і керованих нею виконавчих пристроїв.

Електронні системи керування, що створюються на базі дискретних елементів і інтегральних мікросхем, що виконують певне завдання керування, відносяться до систем з жорсткою логікою, алгоритм їх функціонування визначається схемотехнікою системи. У мікропроцесорних систем таке обмеження відсутнє, тобто при одній і тій же структурі дані системи можуть реалізовувати різні алгоритми керування унаслідок відповідної зміни запису команд в елементах пам'яті системи. Завдяки цьому мікропроцесорні системи утворюють особливий клас електронних систем керування і мають ряд унікальних можливостей з погляду реалізації найскладніших завдань керування.

**Аналіз публікацій.** Дослідженню питань маневреності колісних машин та проведенню аналізу впливу маневреності на продуктивність, встановленню тенденцій розвитку відповідних технічних засобів неодноразово розглядалось провідними вченими.

В роботах М. А. Подригало, В.П. Волкова, О.А. Бобошко проведений аналіз зчїпних властивостей автомобільних шин з опорною поверхнею [1, 2].

Вказані автори відзначають залежність коефіцієнта зчеплення від тиску в контакті і дотичної напруги в площині контакту, а також розглядають зв'язок коефіцієнта зчеплення з напругою елементів шини в контакті.

Встановлено, що трактор погано піддається управлінню коли колеса рухаються юзом. Дослідженнями Fuchs [3] показано, що електронна автоматика моделей мобільних засобів, які будуть оснащуватися системою курсової стійкості повинна відповідати наступним вимогам:

при порушенні штатних (звичайних) умов руху, коли зчеплення колісних шин трактора з дорогою наближається до своєї фізичної межі, трактор не повинен поводитися непередбачувано, динаміка його руху не повинна змінюватися різко, не повинні мати місця занесення, 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 наказаної норми не повинно впливати на стійкість його руху;

- зовнішні фактори не повинні сильно впливати на рух трактора;

- параметри і характеристики трактора, що відповідають за безпеку руху, повинні залишатися в оптимальних межах для суб'єктивного сприйняття водієм.

Van Zanter і ін. [4] досліджували розподіл ковзання коліс в процесі повного гальмування при русі трактора на поворотах. Ставилася умова забезпечити мінімальне відхилення від необхідного напрямку руху при отриманні мінімального гальмівного шляху. Використовувалася спільна робота систем ABS і ASR. Теоретично було доведено і експериментально підтверджено, що для набуття оптимального поточного миттєвого значення кута бічного відведення колеса, яке піддається керованому гальмуванню, не обов'язково оптимізувати його гальмівне ковзання, як це робиться в системі ABS. Навпаки, для досягнення максимально можливої гальмівної сили при русі трактора на поворотах значення гальмівного ковзання повинні залишатися більше оптимальних для ABS. При цьому інерційні сили бічного відведення трактора обмежуються дією системи ASR і не перевищують сил тертя колісних шин об дорогу. Це унеможлиблює зриву коліс в бічний юз.

Окрім систем ABS і ASR в систему управління динамікою руху трактора німецькими інженерами HSCB і ін. [5] було запропоновано включити систему управління активною підвіскою (ACR) і систему контролю рульового управління (APS). Цей комплекс отримав назву «Система VDC» (від «Vehicle Dynamics Control»). VDC — це система активної безпеки трактора, яка постійно контролює дії водія і в надзвичайних ситуаціях, наприклад при різких поворотах на слизкій дорозі, автоматично включається в процес управління і запобігає можливості виникнення бічних відведень (занесень) трактора. При цьому система VDC, подібно до професійного оператора, адаптує тяговий момент двигуна (за допомогою системи ASR) і гальмівні зусилля на колесах (за допомогою системи

ABS) під заданий кермом (за допомогою, системи APS) напрям руху. Система активної підвіски (ACR) утримує трактор від бічного нахилу.

Проте слід відмітити, що система VDC не є системою безпілотного управління, а лише доповнює дії водія, залишаючи за ним відповідальність за вибір напрямку руху, не втручаючись в його маніпуляції, що управляють, до тих пір, поки рух трактора протікає штатно (без юзу коліс і без занесення трактора) [4].

**Мета і постановка задачі.** Метою роботи є дослідження проблеми підвищення маневреності комбінованих сільськогосподарських агрегатів шляхом розробки заходів по забезпеченню їх руху по заданій траєкторії

**Вирішення задачі.** Головне завдання дослідження – поліпшення властивостей керованості колісних тракторів за рахунок застосування комбінованого способу керування поворотом. Також важливим є визначити граничні можливості кінематичного способу керування поворотом колісних тракторів по критеріях стійкості, керованості, повороткості та оцінка можливості їх забезпечення конструктивними заходами; обґрунтувати і провести синтез раціональних законів керування поворотом направляючих коліс для забезпечення необхідних показників маневреності.

У штатних умовах руху траєкторія переміщення трактора відносно опорної поверхні задається маніпуляціями керування водія. Ці маніпуляції, за допомогою відповідних датчиків, перетворюються в електричні сигнали кута повороту рульового колеса, моменту двигуна (по куту повороту осі дросельної заслінки) і тиску в гальмівній системі.

Проте цих сигналів для автоматичної стабілізації стійкості руху в критичних ситуаціях недостатньо і додатково потрібна інформація про такі величини, що безперервно змінюються, як кут бічного відведення передніх коліс ( $\alpha$ ), кут бічного зносу трактора ( $\rho$ ), бічне ковзання ( $S$ ) коліс щодо дорожнього покриття і його напрям (кут  $\gamma$ ), коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою. Всі ці величини є входними варіаційними параметрами системи активної безпеки трактора (VDC) і значно впливають на траєкторію руху трактора, як тільки під колесами з'являється юз.

Фактичний напрям руху трактора відповідає напрямку, вибраному водієм за допомогою відповідного повороту рульового колеса. Бічне ковзання передніх коліс приводить до бічного зносу трактора від заданого рульовим колесом напрямку руху, і радіус повороту залежить не тільки від положення руля, але і від сили бічного відведення та юзу. При недостатньому зчепленні коліс з ґрунтом бічний знос трактора на повороті може стати настільки великим, що втратиться контроль над управлінням і трактор незалежно від дій водія перейде в рух по траєкторії бічним юзом або, більш того, може почати обертатися навколо вертикальної осі.

На рис. 1, а приведена векторна діаграма сил, прикладених до переднього колеса під час руху трактора на повороті, яка відображає фізичну картину втрати стійкості при появі юза під колесами.

На рис. 1, б показані точки додатку векторних сил і моменту розвороту навколо вертикальної осі, а також лінійні координати  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  цих точок щодо центру мас в системі координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

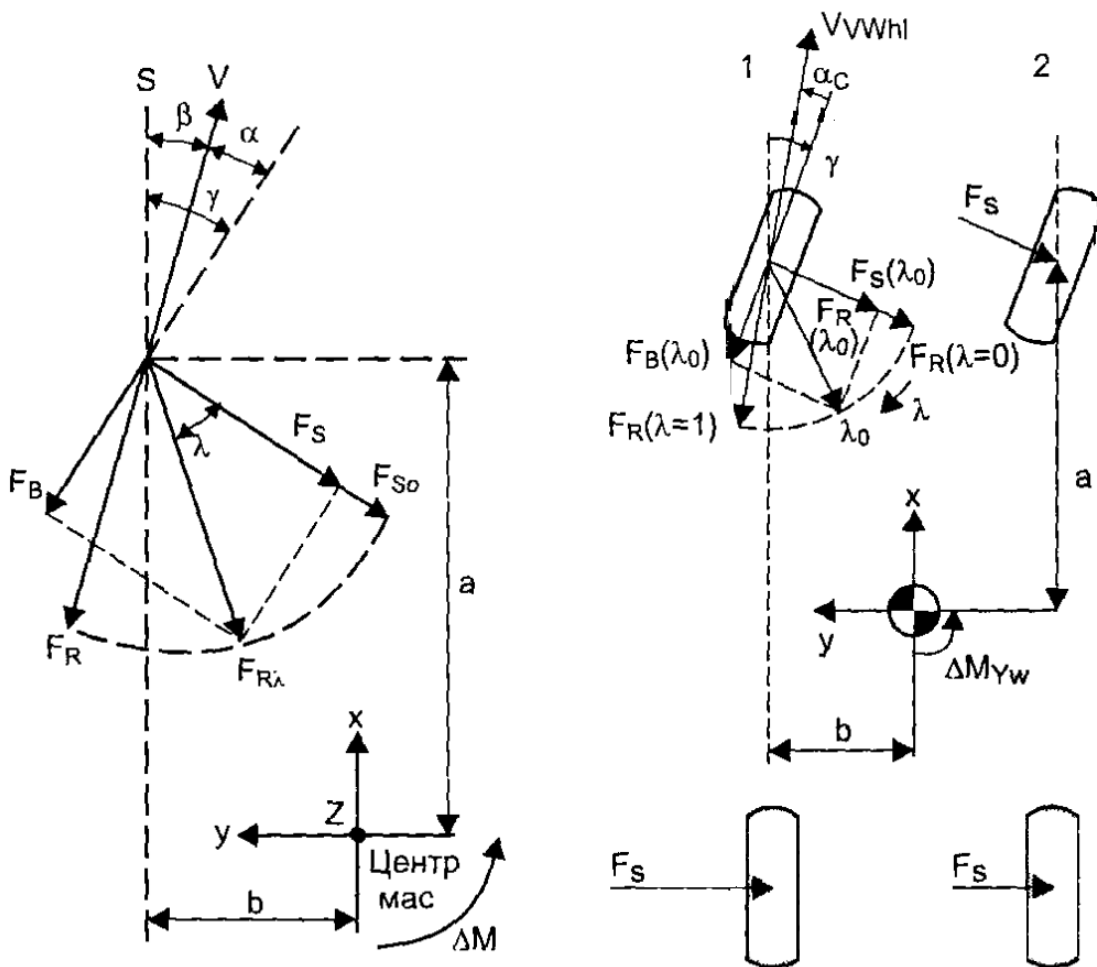


Рис. 1 – Сили, що діють на колеса трактора при повороті

На рис. 1 позначено:  $V$  - вектор швидкості руху трактора;  $S$  - подовжня вісь трактора;  $\gamma$  - кут повороту колеса щодо осі  $S$ ;  $\alpha$  - кут бічного відведення колеса від фактичного напрямку руху (від вектора  $V$ );  $\delta = (\gamma - \alpha)$  - кут бічного відведення трактора («кут рискання»);  $F_S$  - бічна сила що діє на вісь колеса;  $F_B$  - гальмівна сила колеса при його ковзанні по дорозі;  $F_R$  - результуюча сила бічного відведення колеса, що дорівнює векторній сумі гальмівної ( $F_B$ ) і бічної ( $F_S$ ) сил ( $F_R = F_S + F_B$ );  $\chi$  - кут між віссю колеса і напрямом його ковзання

Кут бічного відведення колеса виникає під впливом бічної сили коли еластична шина деформується в бічному напрямі, внаслідок чого вектор швидкості  $V$  трактора відхиляється від площини обертання колеса.

Збільшення бічної сили  $F_S$  є головною причиною збільшення кута  $\alpha$ . Відношення  $F_S/\alpha$  називається коефіцієнтом опору відведенню.

$K_v = F/\alpha$  (Н/град). Якщо кут  $\alpha$  досягає значень  $12...20^\circ$ , то бічна сила  $F_S$  на сухому асфальті стає рівній силі  $F$ , зчеплення шини колеса з опорною поверхнею ( $F = F_R$ ) і відведення колеса переходить в його бічне ковзання (юз). При дії на колесо подовжньої тягової сили  $F_L$  або гальмівної сили, коефіцієнт опору відведенню ( $K_v$ ) знижується. Якщо колесо нахилиється по вертикалі, у бік дії бічної сили, то кут відведення колеса збільшується, при зворотному напрямі сили  $F_S$  кут  $\alpha$  зменшується.

Коли під передніми колесами з'являється юз, кут  $\chi$ , що визначає напрям

ковзання, зростає і, залежно від зміни коефіцієнта ковзання  $S$  в межах  $0 < S < 1$ , змінює свою величину від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . При цьому за рахунок юза починає збільшуватися сила  $F$  гальмування колеса (без спрацьовування гальмівної системи), а бічна сила  $F_y$ , відповідно до векторної діаграми зменшується. Зміна напрямку ковзання (кут  $X$ ) при бічному юзі приводить до обертання результуючої сили  $F_R$  навколо вертикальної осі повороту колеса, що викликає перерозподіл сил  $F_L$ ,  $F$ ,  $F_s$  і утворення моменту  $M$  обертання кузова трактора щодо центру мас під впливом ковзання даного колеса. Ясно, що при бічному ковзанні  $S$ , близькому до одиниці, бічне відведення трактора перевищує критичне значення, внаслідок чого трактор стає некерованим. Сумарний момент обертання трактора навколо вертикальної осі дорівнює сумі моментів від кожного колеса окремо

Управляючи тяговими силами  $FD$  ведучих коліс і гальмівними силами  $F_B$  всіх чотирьох коліс, можливо добитися такого руху трактора на поворотах або на слизькій дорозі, при якому критичне значення сумарного моменту  $M_E$ , при якому кути бічного відведення центрів переднього і заднього мостів з'являються не під впливом бічного юза, а в результаті еластичного прогину шин всіх чотирьох коліс. У такому разі колеса не зриваються в юз і трактор залишається керованим. (Згідно ОСТУ 37.001.05186, керованість трактора — це його здатність точно слідувати повороту передніх коліс.) Функції автоматичного управління підгальмовуванням і тяговою силою коліс при повороті трактора на великій швидкості або при русі по слизькій дорозі виконує система управління курсовою стійкістю (система VDC).

Для забезпечення високої якості реалізації складних і точних рухів керування напрямком руху застосовуються методи інтелектуального управління (advanced intelligent control), які включають наступні функції комп'ютерного управління.

1. Управління процесом механічного руху модуля або багатовимірної системи в реальному часі з обробкою сенсорної інформації.

2. Організація управління функціональними рухами системи, яка припускає координацію управління механічним рухом системи і супутніми зовнішніми процесами.

3. Взаємодія з людиною-оператором через людино-машинний інтерфейс в режимах автономного програмування (off-line) і безпосередньо в процесі руху МС (режим on-line).

4. Організація обміну даними з периферійними пристроями, сенсорами і іншими пристроями системи.

Датчики вимірюють параметри роботи системи, для того, щоб визначити необхідну величину сигналу керування (кількість палива, що подається, момент запалювання і необхідна витрата повітря двигуном і тому подібне).

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 кількість упорскуваного форсунками палива, момент упорскування палива, а також визначити коефіцієнт корекції для встановлення необхідної частоти

обертання двигуна на даному режимі та напрям руху.

Відповідно до отриманих результатів розрахунків, електронний блок управління виробляє сигнали керування, і посиляє їх до певних виконавчих пристроїв. Основним елементом системи управління є комп'ютер, швидкодія якого дозволяє відстежувати зміну стану керованого агрегату та дій водія.

Крім того, в програмі електронного блоку управління, є функції попереджувального регулювання подачею палива та напрямком руху, чого не може зробити найдосконаліший оператор. Електронний блок управління відстежує умови роботи агрегату, а потім, за допомогою закладеної програми, визначає необхідну величину дії управління.

На трактор, як стандартне устаткування, може бути встановлена система динамічної стабілізації курсової стійкості (СКС), що забезпечує поперечну стійкість трактора при будь-яких умовах під час руху. В основу її роботи покладено те, що бічне ковзання однієї з осей – це обертання трактора навколо його вертикальної осі. За допомогою датчиків, встановлених у визначених місцях трактора, СКС визначає його нестійке положення і стабілізує рух при заносі, при русі нерівною дорогою і т.д. Датчик швидкості обертання трактора навколо вертикальної осі – це основа СКС, але крім нього для функціонування системи необхідні й інші: датчик кута повороту рульового колеса, що дає інформацію про траєкторію руху, яка задається водієм; датчик швидкості обертання коліс (використовуються датчики АБС), що визначають швидкість руху; датчик поперечного прискорення трактора, що реєструє будь-яке бічне переміщення трактора (слід зазначити, що при одночасному ковзанні передньої і задньої осей обертання трактора відсутнє, датчик швидкості обертання «мовчить»), а з датчика поперечного прискорення сигнал надходить у блок керування (БК); датчик тиску гальмівної рідини, що повідомляв про гальмівне зусилля на окремих колесах трактора при роботі СКС.

Робота СКС здійснюється наступним чином: сигнали з датчиків надходять в електронний БК, зв'язаний за мультиплексною лінією з блоком керування двигуном і трансмісією, звідки він одержує поточні дані крутного моменту ДВЗ, положення педалі подачі палива і про увімкнену передачу. По цій же лінії СКС може коректувати роботу БК двигуна і БК трансмісії (при наявності такої) – наприклад, «порадити» трансмісії переключитися на зимовий режим роботи при русі трактора по слизькій поверхні. БК СКС постійно порівнює фактичне поводження трактора з розрахунковим і, якщо він відхиляється від розрахункової траєкторії, СКС повертає його назад. Це робиться двома шляхами: точно розрахунковим гальмівним імпульсом, що прикладається до одного чи декількох коліс, або зменшенням крутного моменту двигуна. СКС виправляє помилки водія і стабілізує трактор у випадку бічного ковзання на мокрому, крижаному, гравійному чи будь-якому несприятливому покритті дороги при всіх режимах руху – гальмуванні, розгоні чи русі накотом.

Система адаптивного керування відрізняється від традиційної антиблокувальної системи, оскільки контролює не лише процес гальмування від початку натиснення на педаль і до повної зупинки тракторного агрегату, але

і процес руху. Система адаптивного керування (рис. 2) складається з наступних елементів: 1 - блок керування; 2 - гальмівний кран; 3 - модулятор передньої осі; 4 - модулятор задньої осі; 5 - датчик бічного прискорення; 6 - датчик ристання; 7 - датчик кута повороту рульового колеса; 8 - виключення стоп сигналу. 9 ... 12 - датчики частоти обертання коліс; 13 - діагностичний кабель; 14 - динаміка тракторного агрегату та поведінка оператора; 15 - електронна лампа на панелі приладів.

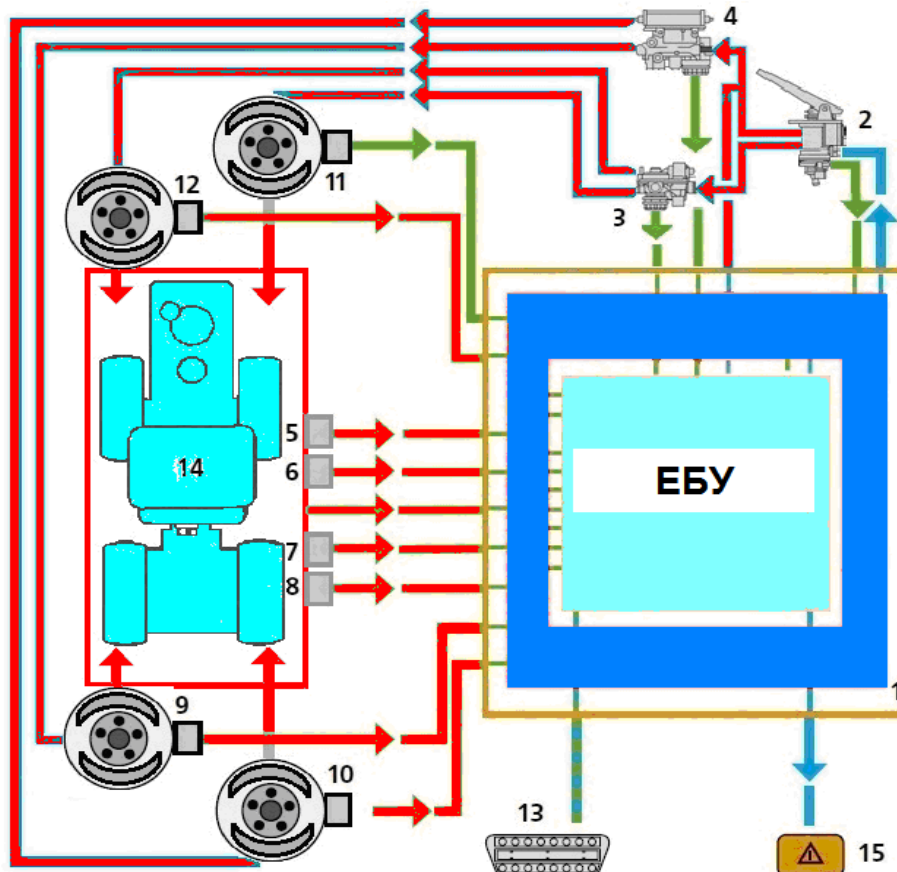


Рис. 2 – Інтелектуальна система адаптивного керування рухом трактора по заданій траєкторії

Блок керування аналізує сигнали внутрішніх і зовнішніх датчиків і управляє модулями регулювання тиску передньої і задніх осей. До зовнішніх датчиків відносяться датчики швидкості коліс.

Внутрішні датчики включають датчики положення гальмівної педалі в підпедальному крані, датчики тиску в модулях керування тиском. Але в інтелектуальній системі автоматичного керування основна відмінність полягає в наявності інтегрованої системи керування стійкістю, що має на увазі наявність додаткового блоку керування, датчиків повороту рульового колеса, поперечного прискорення і крутного моменту.

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 рискання сигналізує про появу крутного 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.

Для оцінки ефективності системи адаптивного керування проводилися теоретичні та модельні дослідження руху трактора під час маневру зміни траєкторії. Порівнювалися два однотипні трактори, один з яких обладнаний системою VDC. Маневр здійснювався шляхом різкого повороту рульового колеса в позитивну і негативну сторони з кроком  $90^\circ$ . Були прийняті наступні початкові умови експерименту: швидкість трактора 30 км/год, положення педалей управління гальмом і акселератором під час маневру не змінювалося; поверхня дороги однорідна.

Результати досліджень з використанням системи показують, що швидкість рискання і кут бічного відведення трактора швидко досягають великих значень і водій повинен швидко цьому протидіяти. Після чергового маневру рульовим колесом швидкість рискання та кут бічного відведення трактора знову швидко змінюються і знову виникає необхідність у втручанні.

На рисунку 3, а показані порівняльні значення найбільш важливих змінних величин, аналіз яких здійснювався в процесі моделювання: кут повороту рулюючої (град.), швидкість рискання (град/с), бічне прискорення ( $m/s^2$ ), кут бічного відходу трактора (град.). На рисунку 3, б показана модельована траєкторія руху тракторів.

Після першої вхідної дії поворотом рульового колеса на  $90^\circ$  звичайний трактор показує виникаючу нестійкість, яка виникає внаслідок затримки появи бічної сили на задніх колесах (в порівнянні з передніми). При зміні кута повороту рульового колеса в протилежному напрямі, швидкість рискання і кут бічного відведення швидко збільшуються, стабільність трактора не відновлюється, і трактор продовжує з'їжджати з заданої траєкторії.

Після першої вхідної дії поворотом рульового колеса трактор з системою VDC також проявляє деяку нестійкість. Але при цьому система VDC формує



гальмівний момент, прикладений до першого переднього колеса, що приводить до повороту результуючої сили на цьому колесі і як наслідок, — до уповільнення зростання швидкості рискання та кута бічного відведення (рис. 3, а). Трактор утримується від зносу. Після другої входної дії поворотом рульового колеса (рис. 3, а) швидкість рискання змінює свій знак, а система VDC формує гальмівний момент на лівому передньому колесі, внаслідок чого трактор знову стабілізується.

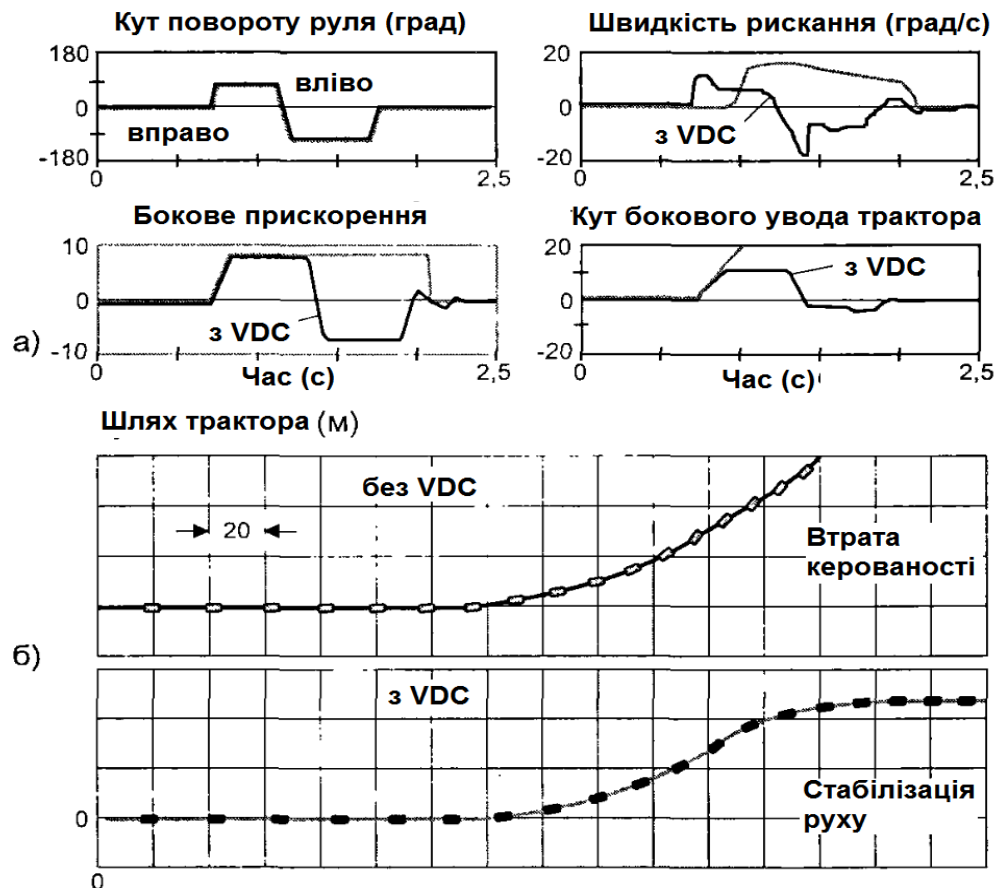


Рис. 3 - Дослідження руху трактора з системою адаптивного керування при різкій зміні напрямку руху

**Висновки.** Традиційне рульове керування, що реалізовує кінематичний спосіб керування поворотом, не забезпечує необхідних показників маневреності колісних тракторів класичної компоновки. Тим самим виникає необхідність використання комбінованого способу повороту, при якому керовану колісну машину і водія слід розглядати як замкнуту систему автоматичного керування з внутрішніми функціональними зв'язками.

Застосування системи адаптивного керування є одним із засобів поліпшення властивостей маневреності 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.

Запропонований спосіб керування поворотом забезпечує більш високі, порівняно з кінематичним способом, показники керованості. Застосування

комбінованого способу керування, у порівнянні з кінематичним, дозволяє значно зменшити радіус повороту (збільшити кутову швидкість) МТА.

### Список використаних джерел

1. 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.
2. Подригало М., Гречко Л., Бобошко О. Підвищення маневреності колісних тракторів // Машинознавство. - 1999. - № 10. - с. 55 - 58.
3. Fuchs L, «Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt», VD1- Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Nr. 184, 2003.
4. Van Zanten A. T., Krauter A. L, «Optimal Control of the Tractor-Semitrailer Truck», Vehicle System Dynamics, 7 (2008), pp. 203—231
5. HeeB G., van Zanten A.T., «System approach To Vehicle Dynamics Control». Fisita 1988, Nr. 885107, Detroit, pp. 2.109-2.121.

### Аннотация

#### **ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ АГРЕГАТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

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

*Приводятся результаты исследований по повышению на маневровых качеств комбинированных сельскохозяйственных агрегатов на базе тракторов использованием интеллектуальной системы адаптивного управления.*

### Abstract

#### **INCREASE MANEVENENCE COMBINED AGRICULTURAL AGGREGATES USING THE INTELLECTUAL ADAPTIVE CONTROL SYSTEM**

N. Makarenko, Y. Kulakov, A. Makarenko

*The results of studies on increasing the maneuverability of combined agricultural units based on tractors using the use of the intellectual system of adaptive control are presented.*