

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ТРАКТОРА ХТЗ-160 ЗАСТОСУВАННЯМ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПОВОРОТОМ

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 маневрених якостей трактора ХТЗ-160 з використанням системи адаптивного керування поворотом.

Вступ. При виконанні технологічних процесів трактор рухається по шляху складної конфігурації, що складається з прямолінійних і криволінійних ділянок. Для руху в заданому напрямі водій впливає на органи керування, що призводить до зміни положення машини на опорній поверхні. Використання принципів системного підходу дозволяє розглядати поворот трактора як систему машина - водій - опорна поверхня (грунт). Однією з головних властивостей машини як ланки в системі являється керованість.

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

Чим менший радіус повороту, більша гранична швидкість зміни кривизни траєкторій характерних точок і менше енергії витрачається на управління, тим краще керованість і обертальність колісної машини.

Аналіз публікацій. Дослідженню питань маневреності колісних машин та проведенню аналізу впливу маневреності 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] і 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 зчпних властивостей автомобільних шин з опорною поверхнею [3, 4]. 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 контактї.

Беручи до уваги узагальнене формулювання поняття маневреності, як властивості машини витримувати задані через рульовий механізм курсовий напрям і траєкторію, слід зазначити, що чисельних оцінок і методу їх визначення, що безпосередньо характеризують точність траєкторії МТА на базі трактора не існує. Це затруднює попереднє прогнозування маневреності на етапах розробки рекомендацій по створенню на базі енергетичного модуля комбінованих МТА.

Мета і постановка задачі. Метою роботи є дослідження проблеми підвищення експлуатаційних показників трактора типу ХТЗ-160 із застосуванням мехатронної системи адаптивного керування поворотом

Вирішення задачі. Вхід в поворот МТА є найвідповідальнішим моментом здійснення маневру. Здатність колісного агрегату входити в поворот, тобто реагувати на управляючу дію, є характеристикою керованості. Керованість колісного агрегату оцінюється, як правило, по величині кутового прискорення в площині дороги, що виникає при повороті керованих коліс [3]. Кутове прискорення виникає у випадку, якщо момент, що повертає, буде більшим моменту опору повороту. Існує поняття коефіцієнта керованості колісної машини, що є відношенням моменту, що повертає, до моменту опору повороту. В початковий момент часу здійснення повороту цей коефіцієнт (якщо він більше одиниці) показує, що колісний агрегат здатний увійти в поворот. Таким чином, виникла необхідність дослідити керованість трактора у складі МТА та запропонувати заходи по її підвищенню.

Перспективним напрямком вирішення вказаної проблеми є використання комбінованого способу управління, що дозволяє поліпшити показники маневреності колісних тракторів. Необхідність в комбінованому способі управління виникає тоді, коли збільшення кута повороту керованих коліс $\bar{\alpha}$ не призводить до зменшення радіусу повороту R_2 (збільшенню кутової швидкості ω повороту). Тому розглянемо модель руху колісної машини на повороті у випадку $\bar{\alpha} = const$ і проведемо оцінку повороткості і керованості при кінематичному і комбінованому способах управління.

Розглянемо схему повороту чотириколісного повнопривідного трактора (типу ХТЗ-160) з переднім керованим мостом та сили, що діють в контактї коліс з опорною поверхнею. Враховуючи, що шини, що встановлюються на колісних тракторах мають досить високу жорсткість, при рішенні цієї задачі бічним відведенням нехтуємо.

Використовуючи теорему про зміну моменту кількості руху машини відносно центру повороту O_2 , отримаємо:

$$\frac{d}{dt}(J_{z_{O_2}} \cdot \omega) = R''_{K_2} \cdot \left(R_2 + \frac{B}{2}\right) + R'_{K_2} \cdot \left(R_2 - \frac{B}{2}\right) + R''_{K_1} \cdot R_1'' + R'_{K_1} \cdot R_1', \quad (1)$$

де R_1, R_2 – радіуси повороту точок середин передньої і задньої осей

$$R_2 = L \cdot ctg \bar{\alpha}; \quad (2)$$

де R_1'' , R_1' - радіуси повороту осей передніх зовнішнього і внутрішнього коліс, які можна приблизно прийняти

$$R_1' \approx R_1 - \frac{B}{2}, \quad (3)$$

Підставляючи отримані розрахунки і враховуючи $\frac{d\bar{\alpha}}{dt} = 0$, отримаємо:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{tg\bar{\alpha}}{1 + \frac{b^2 + i_z^2}{L^2} \cdot tg^2\bar{\alpha}} \times \left[\frac{1}{mL} \left(\frac{M_{k1}}{r_{\partial 1}} \sec\bar{\alpha} + \frac{M_{k2}}{r_{\partial 2}} \right) - \frac{f \cdot g}{L} + f \frac{h}{L^3} \cdot tg^2\bar{\alpha} \left(V_{X1}^2 + b \frac{dV_{X1}}{dt} \right) \right]. \quad (4)$$

Кутове прискорення є величиною, що характеризує керованість колісної машини. Співвідношення (3.7) дозволяє визначити кутове прискорення $\frac{d\omega}{dt}$ при рівному розподілі крутних моментів між колесами однієї осі. При $\bar{\alpha} = const$ кутове прискорення виникає за рахунок $\frac{dV_{X1}}{dt}$, а останнє за рахунок перевищення дотичними реакціями на ведучих колесах сил опору руху. Зі збільшенням $\bar{\alpha}$, а також $V_{X1} \frac{dV_{X1}}{dt}$ відбувається збільшення вертикальних реакцій на колесах зовнішнього борту і зменшення вертикальних реакцій на колесах внутрішнього борту. Відповідно збільшується сила опору коченню на колесах зовнішнього борту і зменшується – на колесах внутрішнього. Це призводить до збільшення дотичних реакцій на колесах внутрішнього борту (R_{k1}' , R_{k2}') і зменшенню дотичних реакцій на колесах зовнішнього борту (R_{k1}'' , R_{k2}''). Відповідно це призводить до зменшення $\frac{d\omega}{dt}$. Визначимо граничний кут повороту керованих коліс $\bar{\alpha}^*$ при якому $\frac{d\omega}{dt}$ стане рівним нулю. Прирівнюючи праву частину (4) до нуля, отримаємо (допускаючи, що $\sec\bar{\alpha} \approx 1$)

$$\alpha^* = \arctg \left[\frac{L}{\sqrt{V_{X1}^2 + b \frac{dV_{X1}}{dt}}} \sqrt{\left(\frac{M_{k1}}{r_{\partial 1}} + \frac{M_{k2}}{r_{\partial 2}} \right) - \frac{g}{h}} \right]. \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = k \frac{dV_{X1}}{dt} + V_{X1} \mu_1 \frac{d\bar{\alpha}}{dt}. \quad (6)$$

Аналіз залежності (6) показує, що керованість машини 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 μ_l .

На рисунку 1 приведені графіки відповідних залежностей для трактора ХТЗ-16131 від швидкості руху для комбінованого і кінематичного способів повороту. Аналіз приведених графіків показує, що застосування комбінованого способу управління дозволяє зменшити радіус повороту в порівнянні з кінематичним способом. На полі, підготовленому під посів комбінований спосіб управління забезпечує більш високе значення ω_{max} (менше R_{2min}) в порівнянні з кінематичним.

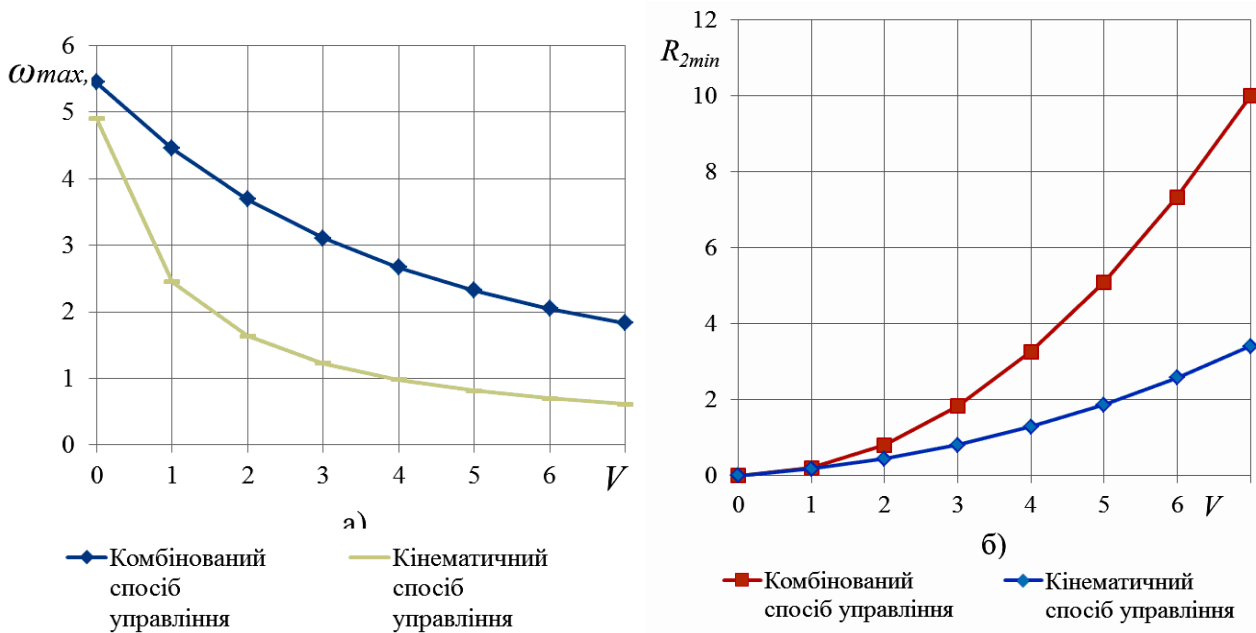


Рис. 1 – Залежність показників повороткості від швидкості руху: а) максимальна кутова швидкість повороту; б) мінімальний радіус повороту

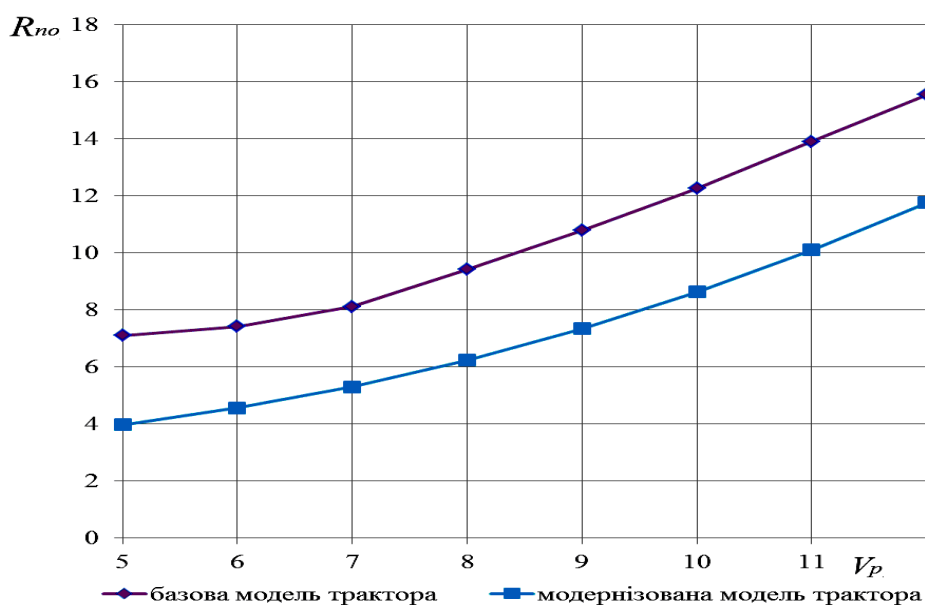


Рис. 2 – Залежність радіусу повороту від швидкості руху по полю для базового та модернізованого трактора.

Запропонована модель повороту трактора при комбінованому способі управління передбачає узгодження кутів повороту керованих коліс і різниці дотичних реакцій на колесах так, щоб не викликати бічного ковзання коліс.

Питання узгодження роботи гальмівного і рульового управління полягають у визначенні гальмівного моменту на внутрішньому задньому колесі машини, необхідний при повороті керованих коліс на кут $\bar{\alpha}$ для запобігання їх бічного ковзання

$$M'_{T2} = \frac{mfr_{k2}}{2b\left(1 + \frac{b^2}{L^2} \operatorname{tg}^2 \bar{\alpha}\right)} V_{X1}^2 \left[\frac{h}{B} \left(1 + \frac{b}{L} \operatorname{tg} \frac{\bar{\alpha}}{2} \operatorname{tg} \bar{\alpha} \right) + \frac{2I_{k2}}{mBr_k^2} \right] \cdot \sin 2\bar{\alpha}, \quad (7)$$

де I_{k2} - момент інерції заднього колеса.

Досліджуємо поворот колісної машини з гальмуванням заднього внутрішнього колеса і бічним ковзанням передніх керованих коліс (рисунок 3).

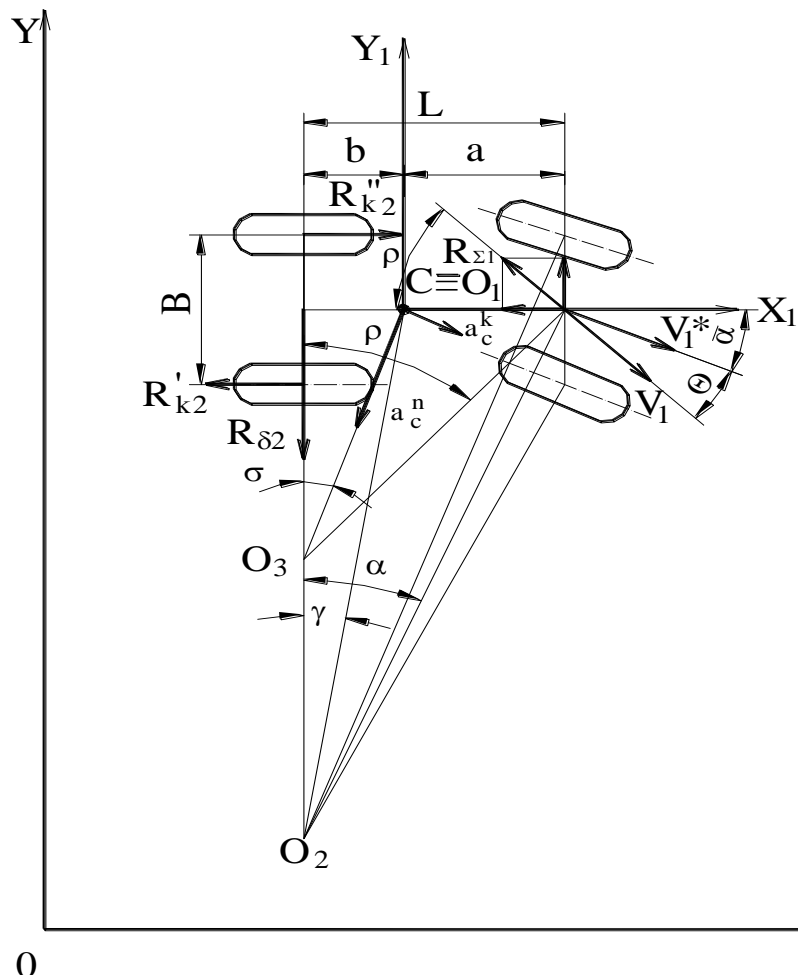


Рис. 3 – Поворот колісного трактора з бічним ковзанням передніх коліс.

Рух машини в цьому випадку описується наступною системою рівнянь:

$$m \frac{d^2 X_1}{dt^2} = R''_{k2} - R'_{k2} - R_{\Sigma 1} \cos \rho; \quad (8)$$

$$m \frac{d^2 Y_1}{dt^2} = R_{\Sigma 1} \sin \rho - R_{\delta 2}; \quad (9)$$

$$I_{ZC} \frac{d\omega}{dt} = (R''_{k2} + R'_{k2}) \frac{B}{2} - R_{\delta 2} b - R_{\Sigma 1} a \sin \rho. \quad (10)$$

Система автоматичного управління поворотом заснована на принципі роботи системи курсової стійкості (ESP), яка в свою чергу використовується в пневматичних гальмівних системах з електронним управлінням (EBS).

Суть розробки ґрунтується на наступному: при виконанні розвороту на поворотних смугах при виконанні технологічних операцій, система автоматичного управління трактора повинна самостійно визначити в який момент, яке колесо необхідно підгальмувати, щоб знизити або запобігти бічному відведенню керованих коліс.

Використання повітря в контурах управління гальмівних систем обумовлює великий час запізнювання спрацьовування, наявність гістерезису і знижену точність дії. Разом з подібною «неоптимальністю управління» застосування повітря вимагає наявності великої кількості клапанів управління, трубок і фітінгу, що у свою чергу збільшує собівартість системи в цілому і вірогідність виходу її з ладу. Ідея створення систем EBS полягає в усуненні цих недоліків шляхом заміни керівного пневматичного сигналу на електричний. Це вимагає заміни усіх пневматичних клапанів на електропневматичні, причому повітря виконуватиме лише роль робочого тіла безпосередньо в гальмівних механізмах.

Виходячи з цих проблем була реалізована схема гальмівного приводу, приведеного на рисунку 4.

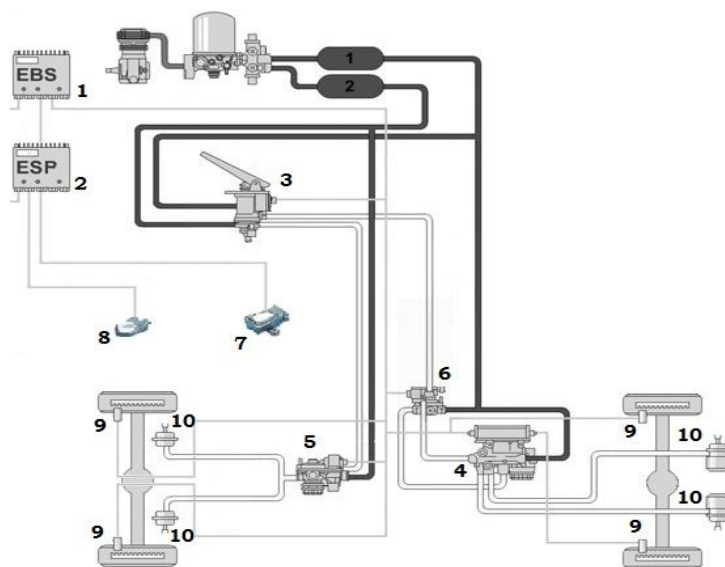


Рис. 4 - Пневматична гальмівна система з електронним управлінням

На рисунку 4 представлено компонування компонентів системи на тракторі. Блок управління EBS (1) аналізує сигнали внутрішніх і зовнішніх датчиків і управляє модулями регулювання тиску (4,5) передньої та задньої осі.

До зовнішніх датчиків відносяться датчики швидкості коліс (9). Внутрішні датчики включають датчики положення гальмівної педалі в підпедальному крані (3), датчики тиску в модулях управління тиском (4,5).

Для зменшення кількості дротів в системі була передбачена схема обміну даними по CAN-шині. Для цієї мети кожен з модулів управління тиском (4,5) і підпедальний гальмівний кран (3) оснащені аналогово-цифровими платами, які перетворюють і передають сигнали датчиків обертання і тиску.

Для адаптації EBS на тракторі вивчаються характеристики підпедального гальмівного крану, гальмівних механізмів, проводиться гальмівний розрахунок для визначення ідеальної характеристики регулятора гальмівних сил. Отримані дані вносяться за допомогою комп'ютера у блок управління EBS і формуються параметри регулювання.

Але мехатронна система автоматичного керування ґрунтується не лише в застосуванні EBS, основна відмінність полягає в наявності інтегрованої системи управління стійкістю, що має на увазі наявність додаткового блоку управління (2), датчиків повороту рульового колеса (8) (рисунк 4), поперечного прискорення і крутного моменту (7).

Основною особливістю системи управління стійкістю є її функціонування не в процесі гальмування, а в процесі криволінійного руху, тобто активний вплив на динаміку руху. Блок управління EBS, 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 управління. Уся ця інформація аналізується модулем управління для розрахунку напрямку руху, заданого рульовим управлінням і розпізнає поведінку трактора.

Датчик бічного прискорення передає інформацію блоку управління про бічний рух трактора, тоді як датчик ризику сигналізує про появу повертального моменту. За даними цих двох датчиків блок управління визначає поточний стан трактора.

Якщо поточний стан відмінний від заданого, то прораховується цикл управління. 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 управління завершується при успішному результаті втручання, і система управління переходить до стеження за поведінкою трактора. Якщо стійкість руху не відновлена, то цикл управління повторюється.

Центральний електронний блок служить для управління і контролю електронно-пневматичною гальмівною системою. Він визначає необхідне номінальне уповільнення тракторного агрегату по сигналу від гальмівного

крану. Сигнал про необхідне уповільнення і сигнали швидкості обертання коліс є вхідними сигналами для управління гальмівною системою. Центральний блок визначає необхідні гальмівні тиски в передній і задній осях. Електронний блок управління курсовою стійкістю, який вбудований в центральний блок, в свою чергу обробляє інформацію, яка надходить від датчика кута повороту рульового колеса, датчиків бокового прискорення і рискання. За отриманою інформацією блок управління розпізнає поведінку трактора і визначає його поточний стан. При виникненні недостатньої повертаємості система ESP запобігає увід трактора за межі заданої траєкторії підгальмовуючі заднє внутрішнє колесо. Якщо вибраний тиск повітря буде надмірним і колесо заблокується, то датчик обертання коліс надсилає сигнал до модулятора і відбувається скидання тиску. Під час прямолінійного руху електронний блок працює в режимі стеження.

Гальмівний кран використовується для формування електричного і пневматичного сигналів, що відповідають необхідному значенню уповільнення, виміряного по зусиллю натиснення педалі гальма.

Модулятором передньої осі сигнал, що надходить від електронного блоку, перетворюється в тиск прискорювального клапана. Тиск на виході модулятора відповідає тиску, управління.

Модулятор задньої осі визначає і реєструє швидкості обертання коліс по сигналу колісних датчиків і надсилає сигнали центральному модулю, який визначає необхідний гальмівний тиск. У разі блокування чи проковзування колеса, модулятор осі змінює відповідним чином гальмівний тиск.

Датчик бічного прискорення визначає сили, що діють на трактор при повороті, які можуть бути передані. За цими даними система оцінює, які переміщення трактора можуть бути виконані за поточних дорожніх умов без ризику втрати керованості.

З точки зору фізичних законів необхідно, щоб цей датчик розташовувався як можна ближче до центру маси трактора. Встановлене положення та орієнтацію датчика категорично забороняється змінювати.

За відсутності даних від датчика бічного прискорення розрахунок фактичного стану тракторного агрегату під час руху стає неможливим. В цьому випадку функція ESP стає непрацездатною.

Датчик рискання визначає, чи діють на трактор поворотні моменти. Даний датчик дозволяє визначити, чи обертається рама трактора довкола однієї з трьох просторових осей (залежно від того, в якому положенні встановлений датчик). Датчик системи дозволяє визначити, чи повертається трактор довкола вертикальної осі. В цьому випадку йдеться про виміри рискання.

Даний датчик необхідно встановлювати близько до центру маси трактора, тому він кріпиться разом з датчиком бічного прискорення.

За відсутності даних від датчика система не може визначити початок обертання трактора. В цьому випадку функція ESP стає непрацездатною.

Датчик кута повороту рульового колеса призначений для передачі на центральний блок управління системи значення кута повороту рульового колеса. Розташовується на рульовій колонці між перемикачем рульової колонки і рульовим колесом. Датчик здатний визначити кут $\pm 720^\circ$, тобто до чотирьох

повних обертів рульового колеса.

За відсутності сигналу від датчика система не зможе виявити зміну у напрямі руху трактора, що задається оператором. В цьому випадку функція ESP стає непрацездатною.

Датчик швидкості колеса постійно вимірює швидкість обертання зубчастого вінця, що обертається разом з колесом, і передає дані електронному блоку, який визначає фактичну швидкість обертання кожного колеса і порівнює їх з граничними значеннями. При виявленні будь-яких відхилень від нормальних умов, система втручається в управління транспортним засобом, впливаючи на гальма

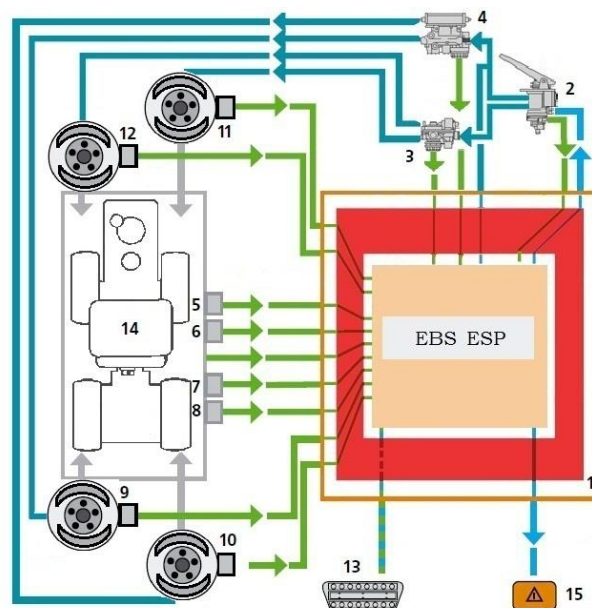


Рис. 5 - Контур управління стійкістю повороту трактора

1 - блок управління EBS та ESP; 2 - гальмівний кран; 3 - модулятор передньої осі; 4 - модулятор задньої осі; 5 - датчик бічного прискорення; 6 - датчик рискання; 7 - датчик кута повороту рульового колеса; 8 - виключення стоп сигналу. 9...12 - датчики частоти обертання коліс; 13 - діагностичний кабель; 14 – сигнали про динаміку тракторного агрегату та поведінку оператора; 15 - електронна лампа на панелі приладів.

Автоматичне узгодження кутів повороту керованих коліс і гальмування заднього внутрішнього колеса трактора є найбільш ефективним варіантом реалізації комбінованого способу керування поворотом, що підтверджено проведеними теоретичними дослідженнями. Результат даних досліджень можливо спостерігати на графіку (рисунок 6), на якому зображено залежності радіусу повороту від швидкості руху трактора на різних агрофонах, з різними значеннями коефіцієнтів зчеплення рушіїв трактора з ґрунтом та коефіцієнту опору кочення.

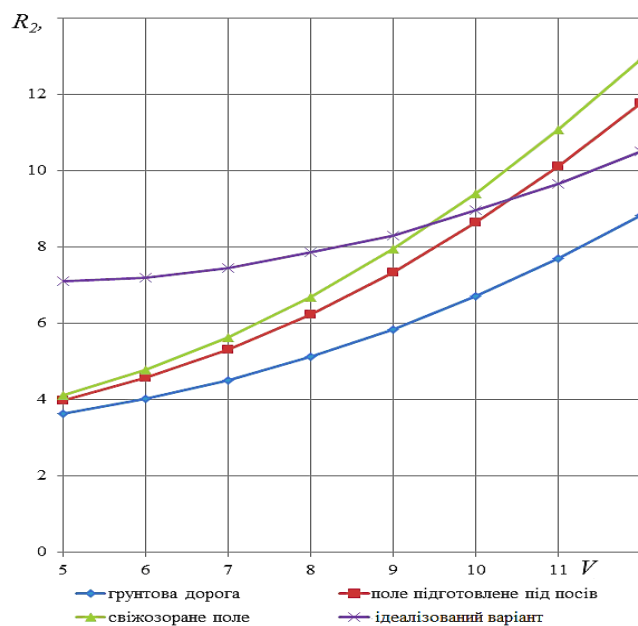


Рис. 6 – Залежність радіусу повороту трактора ХТЗ-16131 від швидкості при заблокованому задньому внутрішньому колесі

Висновки. 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 μ_1 .

Автоматичне узгодження кутів повороту керованих коліс і гальмування заднього внутрішнього колеса трактора є найбільш ефективним варіантом реалізації комбінованого способу керування поворотом, що підтверджено проведеними теоретичними дослідженнями.

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 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАКТОРА ХТЗ-160 ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ

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

Приводятся результаты исследований по повышению маневренных качеств трактора ХТЗ-160 с использованием системы адаптивного управления поворотом.

Abstract

INCREASE OF OPERATING INDEXES OF TRACTOR OF KHTZ-160 BY APPLICATION OF MEKHATRONNOY OF SYSTEM OF ADAPTIVE CONTROL TURN

N. Makarenko, Y. Kulakov, A. Makarenko

Results over of researches are brought on the increase of manoeuvre qualities of tractor of ХТЗ-160 with the use of the system of adaptive control a turn.