

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ГАЛЬМУВАННЯМ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ З БЕЗСТУПІНЧАСТИМИ ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНИМИ ТРАНСМІСІЯМИ

**Бондаренко А.І.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Виконано комплексний аналіз гідрооб'ємно-механічних трансмісій колісних тракторів в процесі гальмування та досліджена динаміка процесу гальмування тракторів в цілому. Визначено для службового та екстреного гальмування оптимальні закони керування процесом гальмування. Оптимізація виконана по узагальненому критерію, який складається з наступних часткових критеріїв: конструктивна надійність гідрооб'ємно-механічних трансмісій, ефективність гальмування, тракторна керованість. Крім того, введені штрафні функції, які знижують значення узагальненого критерію при виході варійованого параметра за межі допустимих значень. Сформульовані рекомендації відносно альтернативних способів реалізації процесу гальмування тракторів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями. Визначено з точки зору динаміки процесу гальмування оптимальні місця розташування зчеплення в гідрооб'ємно-механічних трансмісіях як з диференціалом на вході, так і диференціалом на виході.

**Ключові слова:** гідрооб'ємно-механічна трансмісія, оптимізація, гальмування, керованість, гальмівна ефективність.

**Постановка проблеми.** Останніми роками спостерігається тенденція збільшення не тільки кількості колісних тракторів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями (ГОМТ), а також суттєвого розширення швидкісних діапазонів при виконанні ними транспортних робіт. Сучасний трактор з ГОМТ має максимальну швидкість руху вже 50-60 км/год. Проте і досі залишається відкритим питання стосовно вибору способів реалізації службового та екстреного гальмування, знаходження оптимальних законів зміни відносного параметра регулювання гідрооб'ємної передачі (ГОП).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню динаміки гальмування колісних тракторів з механічними ступінчастими трансмісіями та ГОМТ присвячені праці Богдана М.В., Гуськова В.В., Грібка Г.П., Жесткова В.А., Жуковського Ю.М., Кутькова О.Ю., Подригала М.А., Рашидова М.Р., Саркіяна Е.В., Скрябіна В.В., Скуртула О.І., Ступи Н.Д., Парфенова О.П., Ясеневича В.Я., Hung T., Kwan K., Nielsen S.L., Rozycki F.J., Saber Ahmed Ibrahim M., Thinh H., Truong Q. та ін. [1 – 4].

Дослідженню процесу гальмування самохідних сільськогосподарських машин з гідростатичним приводом ведучих коліс, наприклад зернозбиральних комбайнів, та розробці методики визначення гальмівних характеристик даного типу машин присвячені праці вчених Південно-Української філії Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» [3, 4].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Не зважаючи на чисельність праць, пов'язаних з дослідженням динаміки гальмування колісних тракторів з механічними ступінчастими трансмісіями та ГОМТ, на даний момент питання керування гальмуванням колісних тракторів з безступінчастими ГОМТ увага практично не приділяється, тим паче синтезу оптимальних законів керування гальмуванням колісних тракторів з безступінчастими ГОМТ.

**Мета статті.** Визначити та теоретично обґрунтувати для службового та екстреного гальмування оптимальні закони керування процесом гальмування колісних тракторів з ГОМТ.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

– виконати комплексний аналіз ГОМТ колісних тракторів в процесі гальмування та дослідити динаміку процесу гальмування тракторів в цілому;

– визначити для службового та екстреного гальмування оптимальні закони керування процесом гальмування;

– сформулювати рекомендації відносно альтернативних способів реалізації процесу гальмування тракторів з ГОМТ;

– визначити з точки зору динаміки процесу гальмування оптимальні місця розташування зчеплення в ГОМТ як з диференціалом на вході, так і диференціалом на виході.

**Виклад основного матеріалу.** За результатами комплексного статичного аналізу ГОМТ (в якості початкових даних обрані наступні параметри: максимальна кутова швидкість колінчастого валу двигуна 2250 об/хв; радіус коліс 0,85 м; маса трактора 9000 кг; швидкість, що реалізується на тяговому діапазоні при коефіцієнті опору руху 0,5 – від 0,02 до 10 км/год; робочий об'єм гідронасоса – 130 см<sup>3</sup>, робочий об'єм гідромотора – 130-250 см<sup>3</sup>) було виявлено ряд кінематичних схем перспективних трансмісій, ідентифіковано їх основні конструктивні параметри, типорозміри гідромашин ГОП, визначено їх кінематичні, силові та енергетичні параметри [5]. Саме базуючись на результатах роботи [5] виконано комплексний аналіз ГОМТ колісних тракторів в процесі гальмування та досліджена динаміка процесу гальмування тракторів. В результаті було встановлено:

– для службового гальмування за рахунок зміни відносного параметра регулювання ГОП  $e$  при збереженні кінематичного зв'язку з двигуном оптимальний закон керування процесом гальмування  $e(t)$  не знаходиться, так як зниження інтенсивності зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП однозначно, навіть без вирішення задачі оптимізації, призводить до зменшення перепаду робочого тиску в ГОП, зниження кутових швидкостей ланок ГОМТ, а також підвищення гальмівного шляху, крім того відсутні обмеження по допустимій величині гальмівного шляху;

– за результатами дослідження екстреного гальмування колісного трактора з різноманітними схемами ГОМТ, яке може реалізовуватися лише при кінематичному відриві двигуна від ведучих коліс, було встановлено, що за для визначення оптимального закону зміни  $e(t)$  необхідно вирішити задачу оптимізації, де були б враховані наступні часткові критерії: конструктивна надійність ГОМТ, ефективність гальмування, тракторна керованість, крім того, обов'язково введені штрафні функції, які б знижува-

ли значення узагальненого критерію при виході варіюваного параметра за межі допустимих значень.

Для оцінки гальмівної ефективності зручно використовувати в якості показника гальмівний шлях. Траєкторну керованість можна оцінювати за величиною відхилення трактора від заданої траєкторії. Для оцінки конструктивної надійності ГОМТ зручно використовувати в якості показників її силові (перепад робочого тиску в ГОП) та кінематичні (кутова швидкість сателітів, кутова швидкість валу гідронасоса та гідромотора, а також розбіжність між значеннями кутових швидкостей ведучого та веденого валів зчеплення) параметри.

З урахуванням вище наведених побажань, при гальмуванні трактора на кривій ділянці дороги узагальнений критерій має вигляд [6-8]:

$$K_{\Sigma}(e(t)) = Z_1 \cdot \left(1 - \frac{S_g(e(t))}{S_g^*}\right) + Z_2 \cdot \left(1 - \frac{\Delta_{\max}(e(t))}{\Delta^*}\right) + Z_3 \cdot \left(5 - \frac{|\Delta P|_{\max}(e(t)) + P_p}{P^*} - \frac{|\omega_1|_{\max}(e(t))}{\omega_1^*} - \frac{|\omega_2|_{\max}(e(t))}{\omega_2^*} - \frac{|\omega_s|_{\max}(e(t))}{\omega_s^*} - \frac{|\Delta\omega|_{\max}(e(t))}{\Delta\omega^*}\right) + Z_{\Delta\omega} \cdot P_{\Delta\omega}(\Delta\omega) + Z_{\Delta V} \cdot P_{\Delta V}(\Delta V)$$

де  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_{\Delta\omega}, Z_{\Delta V}$  – вагові коефіцієнти;

$S_g(e(t))$  – дійсна величина гальмівного шляху;

$S_g^*$  – допустима величина гальмівного шляху;

$\Delta_{\max}(e(t))$  – величина максимального відхилення трактора від заданої траєкторії після повного гальмування;

$\Delta^*$  – граничне значення відхилення трактора;

$|\Delta P|_{\max}(e(t))$  – максимальне значення дійсної величини перепаду робочого тиску в ГОП;

$P_p$  – тиск усмоктування, рівний за значенням тиску, що створюється насосом підпитки;

$P^*$  – граничне значення перепаду робочого тиску в ГОП;

$|\omega_1|_{\max}(e(t))$  – максимальне значення дійсної величини кутової швидкості валу гідронасоса;

$\omega_1^*, \omega_2^*, \omega_s^*, \Delta\omega^*$  – граничне значення кутової швидкості вала гідронасоса, вала гідромотора, сателітів та розбіжності між кутовими швидкостями ведучого та веденого валів зчеплення відповідно;

$|\omega_2|_{\max}(e(t))$  – максимальне значення дійсної величини кутової швидкості валу гідромотора;

$|\omega_s|_{\max}(e(t))$  – максимальне значення дійсної величини кутової швидкості сателітів;

$|\Delta\omega|_{\max}(e(t))$  – максимальне значення дійсної величини розбіжності між кутовими швидкостями ведучого та веденого валів зчеплення;

$P_{\Delta\omega}(\Delta\omega)$  – штрафна функція, які знижує значення узагальненого критерію при обертанні ведучого та веденого валів зчеплення в різних напрямках;

$P_{\Delta V}(\Delta V)$  – штрафна функція, які знижує значення узагальненого критерію при появі невідповідності більше допустимого значення між дійсною швидкістю трактора  $V$  і теоретичною швидкістю  $V_e$ , яка повинна бути в даний момент виходячи зі значення  $e$ , якщо б трактор в заданих умовах експлуатації виконував рівномірний рух або ж розгін з мінімальним прискоренням.

Закон зміни  $e(t)$  в процесі екстреного гальмування найкращий при максимальному значенні  $K_{\Sigma}(e(t))$ .

Суттєво на закон  $e(t)$  та значення узагальненого критерію впливає величина вагових коефіцієнтів. В зв'язку з тим, що часткові критерії та штрафні функції змінюються практично в однакових діапазонах і рівнозначні між собою, значення усіх вагових коефіцієнтів приймаються рівними 1, доцільність такого вибору була підтверджена і теоретичними дослідженнями.

В роботі при пошуку оптимального закону використовувався метод Хука – Джівса, тому що даний метод є досить ефективним і завжди, як правило,

приводить до знаходження максимуму або мінімуму функції. Пошук складається з послідовних кроків дослідницького пошуку навколо базисної точки, за якими, в разі успіху, слідує пошук по зразку [6-8].

Похибка при знаходженні  $e$  складає 0,01 (в процесі гальмування шаг моделювання завдавався 0,005 секунди, в кожен момент часу відбувався пошук оптимального значення  $e$ , а на наступному кроці його коректування).

За результатами досліджень сформульовані висновки.

### Висновки і пропозиції.

1. За результатами комплексного дослідження процесу гальмування колісних тракторів з ГОМТ різних структур було встановлено, що не існує єдиного оптимального способу та закону керування процесом гальмування як при службовому, так і екстреному гальмуванні:

- найбільш прийнятним службовим способом гальмування, з точки зору навантаження на оператора-водія, є гальмування за рахунок зміни відносного параметра регулювання ГОП при збереженні кінематичного зв'язку з двигуном, проте він має один суттєвий недолік: чим вище інтенсивність зміни параметрів регулювання гідромашин, тим більше значення перепаду робочого тиску в ГОП, здійснювати автоматичне регулювання перепаду тиску в ГОП за допомогою дроселюючого пристрою, що сполучає магістралі високого та низького тиску не допустимо, – це супроводжується суттєвим зниженням гальмівної ефективності, як вихід, необхідно для кожної схеми ГОМТ ще в процесі розробки системи керування обмежувати інтенсивність зміни параметрів регулювання гідромашин на певному рівні, щоб оператор-водій не мав можливості даний спосіб гальмування використовувати замість екстреного;

- за результатами дослідження екстреного гальмування колісного трактора з різноманітними схемами ГОМТ, яке може реалізовуватися лише при кінематичному відриві двигуна від ведучих коліс, було встановлено:

- єдиного універсального оптимального закону зміни відносного параметра регулювання ГОП для всіх схем ГОМТ не існує. Це пов'язано в першу чергу з тим, що мінімальні значення перепаду робочого тиску в ГОП, кутової швидкості сателітів, кутової швидкості валу гідронасоса та гідромотора не завжди відповідають мінімальному значенню розбіжності між значеннями кутових швидкостей ведучого та веденого валів зчеплення. У деяких випадках швидкість трактора зменшувалась повільніше, ніж еквівалентні їй параметри регулювання гідромашин ГОП за для зниження занадто високого значення розбіжності між значеннями кутових швидкостей ведучого та веденого валів зчеплення, а іноді швидше – в цьому випадку значення перепаду робочого тиску в ГОП, кутової швидкості сателітів, кутової швидкості валу гідронасоса та гідромотора встановлювалися мінімальні з можливих;

- використання закону зміни відносного параметра регулювання ГОП в процесі гальмування колісних тракторів з безступінчастими ГОМТ при кінематичному відриві двигуна від ведучих коліс, при якому значення параметрів регулювання гідромашин ГОП відповідають зміні дійсної швидкості трактора, прийнятне для всіх варіантів схем ГОМТ, що підтверджено і теоретичними дослідженнями. Розбіжність значень узагальнених критеріїв, які отримані при моделюванні процесу гальмування, коли параметри регулювання гідромашин ГОП, змінюються не повільніше, ні швидше ніж еквівалентна їм швидкість трактора, а одно-

часно з нею, в порівнянні зі значеннями оптимальних узагальнених критеріїв не перевищує 6,87%. Значення всіх параметрів, крім відхилення від заданої траєкторії (із-за максимальної швидкості руху трактора 60 км/год), знаходяться в межах допустимих значень;

- трансмісія зберігає працездатність та всі параметри знаходяться в рекомендованих межах лише за відсутності блокування коліс трактора;

- даний спосіб можна використовувати і при службовому гальмуванні: кінематичний відрив двигуна від ведучих коліс зберігається, закон натиснення на педаль гальма може мати будь-який вигляд без обмежень в часовому діапазоні, проте оператор-водій буде відчувати на собі додаткові навантаження, що не сприятиме його інтенсивній та довгостроковій працездатності, як-правило, саме тому цей спосіб в якості службового в сучасних тракторах з ГОМТ не застосовується.

2. Не залежно від схем ГОМТ, що розглядалися, варіанту розміщення зчеплення та умов експлуатації, при гальмуванні з антиблокувальною системою, в порівнянні з екстремим гальмуванням за рахунок гальмівної системи при кінематичному відриві двигуна від ведучих коліс, спостерігається підвищення гальмівної ефективності та зниження відхилення від заданої траєкторії (при збереженні силових та кінематичних параметрів трансмісії в межах допустимих значень).

3. У разі технічної неможливості реалізації при екстремому гальмуванні при кінематичному відриві двигуна від ведучих коліс зміни значення параметрів регулювання гідромашин ГОП відповідно зміні дійсної швидкості трактора (це пов'язано із суттєвим ускладненням системи керування трансмісією) обов'язкові до виконання наступні вимоги: гальмування трактора відбувається до повної зупинки; параметри регулювання гідромашин ГОП протягом гальмування залишаються незмінними і відповідають тому значенню, яке вони мали в момент початку гальмування; в момент повної зупинки трактора система керування ГОМТ повинна забезпечити в автоматичному режимі зміну параметрів регулювання гідромашин ГОП до тих значень, що відповідають нульовій швидкості руху трактора.

4. В результаті вирішення задачі оптимізації встановлено, що з точки зору динаміки процесу гальмування та значень узагальненого критерію, зчеплення в ГОМТ з диференціалом на вході рекомендується розміщувати за двигуном або ж в гідравлічній гілці замкнутого контуру ГОМТ перед ГОП (явної переваги жоден із варіантів не має); в ГОМТ з диференціалом на виході перевага надається розміщенню зчеплення в гідравлічній гілці замкнутого контуру ГОМТ за ГОП, на другому місці – в механічній гілці замкнутого контуру ГОМТ, в разі неможливості виконання даних вимог (з конструктивних міркувань) – за двигуном.

#### Список літератури:

1. Подригало М. А. Торможение трактора с одноосным прицепом без блокирования колес / М. А. Подригало, М. П. Холодов // Механіка та машинобудування. – 2012. – № 2. – С. 144-152.
2. Бондаренко А. І. Современные тормозные системы колесных тракторов // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования», 20-21 марта 2014 г., Воронеж / ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия». – Воронеж: «Воронежская государственная лесотехническая академия», 2014. – Т. 2. – С. 22-27.
3. Митрофанов О. Випробування гальмівних систем сучасних зернозбиральних комбайнів за новою методикою / О. Митрофанов, І. Лілевман, О. Лілевман, З. Терещук // Техніка і технології АПК. – 2010. – № 9(12). – С. 16-19.
4. Митрофанов О. Дослідження характеристик та особливостей взаємодії гальмівних систем самохідних сільгоспмашин з гідростатичним приводом ведучих коліс // Збірник наук. праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. – 2008. – № 11(25). – С. 25-31.
5. Samorodov V. B. Synthesis of hydrostatic mechanical transmission of wheeled tractors for agricultural purposes / V. B. Samorodov, A.I. Bondarenko // Eastern European Scientific Journal: Dьsseldorf (Germany): Auris Verlag. – 2014. – № 6. – P. 280-284.
6. Бондаренко А. І. Удосконалення процесів модуляції тиску в пневматичному гальмівному приводі автомобілів: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.02 «Автомобілі та трактори» / Бондаренко Анатолій Ігорович. – Харків, 2010. – 203 с.
7. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: [пер. с англ. О.В. Шихеевой]; под ред. В. А. Вольнского. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
8. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2 т. / Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.; пер. с англ. О. В. Шихеевой. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 2005. – 332 с.

**Бондаренко А.И.**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

## **СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТОРМОЖЕНИЕМ КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ С БЕССТУПЕНЧАТЫМИ ГИДРООБЪЕМНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ТРАНСМИССИЯМИ**

### **Аннотация**

Выполнен комплексный анализ гидрообъемно-механических трансмиссий колесных тракторов в процессе торможения и исследована динамика процесса торможения тракторов в целом. Определены для служебного и экстренного торможения оптимальные законы управления процессом торможения. Оптимизация выполнена по обобщенному критерию, который состоит из следующих частных критериев: конструктивная надежность гидрообъемно-механических трансмиссий, эффективность торможения, траекторная управляемость. Кроме того, введены штрафные функции, которые снижают значение обобщенного критерия при выходе варьируемого параметра за пределы допустимых значений. Сформулированы рекомендации относительно альтернативных способов реализации процесса торможения тракторов с гидрообъемно-механическими трансмиссиями. Определены с точки зрения динамики процесса торможения оптимальные места расположения сцепления в гидрообъемно-механических трансмиссиях как с дифференциалом на входе, так и дифференциалом на выходе.

**Ключевые слова:** гидрообъемно-механическая трансмиссия, оптимизация, торможение, управляемость, тормозная эффективность.

**Bondarenko A.I.**

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

## **SYNTHESIS OF OPTIMUM LAWS OF MANAGEMENT BY BRAKING OF THE WHEELED TRACTORS WITH HYDROSTATIC-MECHANICAL TRANSMISSIONS**

### **Summary**

The complex analysis of hydrostatic-mechanical transmissions of the wheeled tractors is executed in the process of braking and the dynamics of process of braking of tractors is explored on the whole. The optimum laws of braking process control are certain for the official and urgent braking. Optimization is executed on the generalized criterion which consists of the following private criteria: structural reliability of hydrostatic-mechanical transmissions, braking efficiency, trajectory dirigibility. In addition, fines functions which reduce the value of the generalized criterion on leaving of the varied parameter outside the legitimate values are entered. Recommendations are formulated in relation to the alternative methods of realization of process of braking of tractors with hydrostatic-mechanical transmissions. The optimum places of location of coupling are certain from point of dynamics of braking process in hydrostatic-mechanical transmissions both with a differential on the entrance and by a differential on an output.

**Keywords:** hydrostatic-mechanical transmission, optimization, braking, dirigibility, brake efficiency.