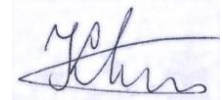


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**КОЖУШКО АНДРІЙ ПАВЛОВИЧ**



УДК 629.4.075

**ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОЛІСНИХ  
ТРАКТОРІВ З БЕЗСТУПІНЧАСТИМИ ТРАНСМІСІЯМИ  
РАЦІОНАЛЬНОЮ ЗМІНОЮ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЮВАННЯ  
ГІДРОМАШИН В ПРОЦЕСІ РОЗГОНУ**

Спеціальність 05.22.02 – Автомобілі та трактори

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автомобіле- і тракторобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Бондаренко Анатолій Ігорович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,  
докторант кафедри автомобіле- і тракторобудування

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Ніконов Олег Якович,**  
Харківський національний автомобільно-  
дорожній університет, м. Харків,  
професор кафедри інформаційних технологій і  
мехатроніки

доктор технічних наук, професор  
**Таран Ігор Олександрович,**  
Держаний вищий навчальний заклад «Національний  
гірничий університет», м. Дніпропетровськ,  
завідувач кафедри управління на транспорті

Захист відбудеться «19» травня 2016 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.13 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 15 квітня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ребров О.Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з шляхів розвитку агропромислового комплексу є створення та ефективне використання тракторів з сучасними навісними пристроями. На сьогоднішній день фермерські господарства переважно використовують колісні трактори, які оснащені ступінчастими трансмісіями, проте з кожним роком зростає використання тракторів, оснащених безступінчастими трансмісіями, зокрема, з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями (ГОМТ). Така тенденція пояснюється безсумнівними перевагами ГОМТ в порівнянні зі ступінчастими трансмісіями, у зв'язку з забезпеченням плавності руху, підвищенням ергономічних властивостей під час виконання технологічних операцій, автоматизації управління та ін.

Одним з важливих факторів для машинно-тракторних агрегатів (МТА) з ГОМТ є дослідження процесу розгону при виконанні технологічних операцій. Оскільки на етапі виходу МТА на технологічну швидкість відбувається збільшення збуджувальних факторів, що призводить до суттєвих змін техніко-економічних показників: зростанню витрати палива, зменшенню коефіцієнту корисної дії (ККД) і продуктивності МТА та силових, кінематичних та енергетичних параметрів ГОМТ (збільшенню перепаду робочого тиску в ГОП, кутових швидкостей елементів ГОМТ, необхідної потужності двигуна, тощо).

Для МТА доцільне комплексне врахування зміни техніко-економічних показників в процесі заглиблення знаряддя при «оранці», систематизація різноманіття схемного виконання сучасних ГОМТ. Тому визначення впливу законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП на силові, кінематичні та енергетичні параметри ГОМТ, встановлення впливу зміни часу розгону МТА на техніко-економічні показники, пошук раціонального закону зміни параметрів регулювання гідромашин в процесі розгону є актуальною науково-прикладною задачею, вирішення якої дозволить зменшити витрату палива, підвищити продуктивність МТА та залишитись в межах допустимого значення перепаду робочого тиску в ГОП.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХПІ» у рамках завдань держбюджетної НДР МОН України «Розробка методів підвищення енергоефективності і ресурсозбереження підйомно-транспортних споруд, машинно-тракторних агрегатів та гібридних транспортних засобів» (ДР № 0113U000427), а також госпдоговору «Технічний аудит і модернізація систем та вузлів тракторів виробництва ПАТ «Харківський тракторний завод» (АТ «ХТЗ», м. Харків), де здобувач брав участь як виконавець окремих етапів.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення економічності та ефективності машинно-тракторних агрегатів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями при виконанні технологічної операції «оранка» – за рахунок формування раціональних законів зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі в процесі виходу на технологічний режим.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- виконати порівняльний аналіз трансмісій сучасних тракторів, визначити тенденції та перспективи їх розвитку та проаналізувати методи, що застосовуються в процесі дослідження динаміки розгону МТА;
- скласти математичну модель роботи ГОМТ та встановити її адекватність в процесі розгону шляхом експериментальних стендових досліджень перехідних процесів при різних законах зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП та режимах навантаження;
- визначити закономірності впливу робочого об'єму гідромотору при різних законах зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП на динаміку розгону МТА, а також на його основні техніко-економічні показники;
- встановити вплив зміни часу розгону МТА при різних законах зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП на основі чисельного моделювання виконання операції «оранка»;
- визначити раціональні закони зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, які б забезпечували підвищення техніко-економічних показників МТА з ГОМТ.

*Об'єкт дослідження* – процес розгону машинно-тракторного агрегату з гідрооб'ємно-механічною трансмісією при виконанні операції «оранка».

*Предмет дослідження* – взаємозв'язки параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі, сили тяги на гаку та динаміки розгону і основних техніко-економічних показників машинно-тракторних агрегатів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями.

**Методи дослідження:** диференційне та інтегральне обчислення для розрахунку динамічних процесів в процесі руху колісного трактора з ГОМТ, статистичний аналіз для визначення похибки при зіставленні теоретичних і експериментальних результатів, теорія оптимізації для знаходження раціональних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП в процесі розгону.

Реалізація чисельних розрахунків виконувалась на базі пакета прикладних програм MATLAB.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше встановлено взаємозв'язки між конструктивними параметрами, законами зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП та зміною силових, кінематичних та енергетичних параметрів ГОМТ в процесі виходу на технологічний режим, а саме між робочим об'ємом гідромоторів та перепадом тиску в ГОП, потужністю двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та ККД трансмісії;
- вперше встановлено взаємозв'язок між законами зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП та техніко-економічними показниками МТА з ГОМТ в процесі виходу на технологічний режим, а саме між застосуванням законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, які змінюються за раціональним законом, та показниками економічності та ефективності МТА;
- отримала подальший розвиток математична модель процесу розгону МТА, яка відрізняється від існуючих врахуванням особливостей процесу заглиблення плуга при виконанні операції «оранка», можливістю варіювання за-

кону зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, а також описом взаємодії коліс з опорною поверхнею.

**Практична значимість отриманих результатів** для тракторобудування полягає у визначенні рекомендацій щодо вибору раціонального закону зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП для колісних тракторів потужністю 160 – 175 кВт сімейства ХТЗ, що підтверджено актами впровадження з АТ «ХТЗ» (м. Харків).

Розроблені рекомендації відносно вибору раціонального закону зміни параметрів регулювання гідромашин, які можуть бути використані фермерськими господарствами для підвищення техніко-економічних показників тракторів.

Сформовані підходи, які можуть бути використані підприємствами при аналізі перспективних ГОМТ, як на етапі проектування, так і при експериментальному дослідженні ГОМТ у складі колісного трактора в процесі розгону.

Результати дослідження використовуються в навчальному процесі НТУ «ХП» для студентів спеціальності «Автомобілі та автомобільне господарство» та для студентів спеціальності «Колісні та гусеничні транспортні засоби».

**Особистий вклад здобувача.** Положення і результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз наукової та патентної літератури; участь у плануванні та проведенні теоретичних та експериментальних досліджень; аналіз та інтерпретація отриманих результатів; встановлення закономірності впливу робочого об'єму гідромотору на динаміку розгону МТА та на основні техніко-економічні показники; встановлення впливу зміни часу розгону МТА при різних законах зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП; визначення раціональних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, які б забезпечували підвищення техніко-економічних показників МТА з ГОМТ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні засади сталого розвитку національного господарства» (м. Кам'янець-Подільський 2014 р.); IX International research and practice conference «European Science and Technology» (Германія, Мюнхен 2014 р.); Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej Konferencji «Inżynieria i technologia. Projekty naukowe» (Польща, Варшава 2015 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 15 наукових працях, серед них: 10 статей в наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному періодичному фаховому виданні, 3 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 190 сторінок серед них: 72 рисунка по тексту, 23 рисунка на 23 окремих сторінках, 7 таблиць по тексту, 4 таблиці на 4 сторінках, список використаних науково-технічних джерел 153 найменувань на 19 сторінках, 4 додатки на 27 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи; обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи; сформульовано мету, задачу, об'єкт та предмет дослідження; наведено застосовані методи дослідження та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; викладені положення, що визначають наукову новизну та практичне значення роботи; надано інформацію про апробацію та публікацію результатів дисертаційних досліджень.

У **першому розділі** проаналізовані тенденції застосування сучасних трансмісій в автомобіле- та тракторобудуванні, висвітлено тенденції та перспективи їх розвитку.

Дослідженню переваг та недоліків різноманітних типів трансмісій колісних тракторів, їх характеристик та показників, вибору оптимального типу трансмісій для тракторів різноманітних тягових класів, потужності та призначення присвячені чисельні праці: Башти Т.М., Борисюка М.Д., Васильченка В.О., Григорова О.В., Гром-Вознічевський Л.М., Завадського А.М., Каменова О.В., Кісточкіна Є.С., Ключнікова А.В., Комісарика С.Ф., Кононенко В.О., Курмаєва Р.Х., Петрова В.А., Пономаренка Ю.Ф., Пономарьова Є.П., Прокофьева В.М., Прочка Є.І., Самородова В.Б., Суковіна М.В., Філічкіна М.В., Aitzetmuller H., Benford H., Blake A.C., Kress J., Kyle R.W., Leising M., Monika M.I., Rydberg K.-E., Renius K., Resch R., Weber M., та ін.

Виконано порівняльний аналіз математичних моделей процесу розгону автомобілів і колісних тракторів, які були запропоновані в працях: Барського І.Б., Гуськов В.В., Кутькова Г.М., Львова Є.Д., Подригала М.А., Самородова В.Б., Сотнікова А.Л., Чудакова Д.А., Щукіна М.М., Mikeska D., Ivantysynova M., Liscouet J., Casoli P., Kohmäscher T., Markel T., Steindorff K. та ін. Відзначили, що проблема розгону має декілька аспектів. Одними з основних є підбір оптимальної швидкості, динаміка робочого процесу ДВЗ, навантаження на деталі і вузли, тривалість розгону, умови роботи водія і ін.

Систематизовано основні підходи для визначення техніко-економічних показників МТА, які базуються на визначенні продуктивності МТА, що характеризується об'ємом виконаної роботи, та економічності, яка залежить від паливної економічності тягово-енергетичних засобів.

На підставі розгляду тенденцій та перспектив розвитку трансмісій сучасних колісних тракторів; аналізу математичних моделей процесу розгону автомобілів та колісних тракторів, а також визначенню підходів, що забезпечують підвищення техніко-економічних показників, сформульована мета і задачі дослідження.

**Другий розділ** присвячено побудові узагальненої математичної моделі перехідних процесів в МТА з ГОМТ, враховуючи властивості роботи ДВЗ, ГОМТ та взаємодії коліс з опорною поверхнею. Наведено підходи, що дають змогу визначити техніко-економічні показники МТА.

Для визначення динаміки роботи ДВЗ використовується рівняння руху, який відображає зміну прискорення колінчастого вала

$$J \cdot \frac{d\omega_d}{dt} = \left( \mu_{\text{норм}} + \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\omega}{k_x - 1} \right) \cdot M_{\text{ном}} - M_{0a}, \quad (1)$$

де  $J$  – приведений до валу ДВЗ момент інерції махових мас трансмісії;  $\omega_d$  – кутова швидкість колінчастого валу;  $\mu_{\text{норм}}$  – нормований крутний момент ДВЗ (який дорівнює одиниці в номінальному режимі значення крутного моменту та складається з системи рівнянь, що описують коректорну та регуляторну гілки зовнішньої швидкісної характеристики ДВЗ);  $\varepsilon_\omega$  – коефіцієнт завантаження ДВЗ по частоті обертання;  $\varepsilon_r$  – параметр керування подачею палива;  $k_x$  – коефіцієнт, що визначає крутизну регуляторної гілки зовнішньої швидкісної характеристики;  $M_{\text{ном}}$  – номінальний крутний момент ДВЗ;  $M_{0a}$  – момент опору руху.

Для дослідження перехідних процесів в ГОМТ застосовується математична модель, яка враховує зміну параметрів регулювання гідромашин ГОП, об'єм гідромашин, момент втрат у гідромашинах та дозволяє описувати процес розгону елементів трансмісії різного схемного виконання. На прикладі колісного трактора Fendt 936 Vario складена математична модель процесів в ГОМТ на

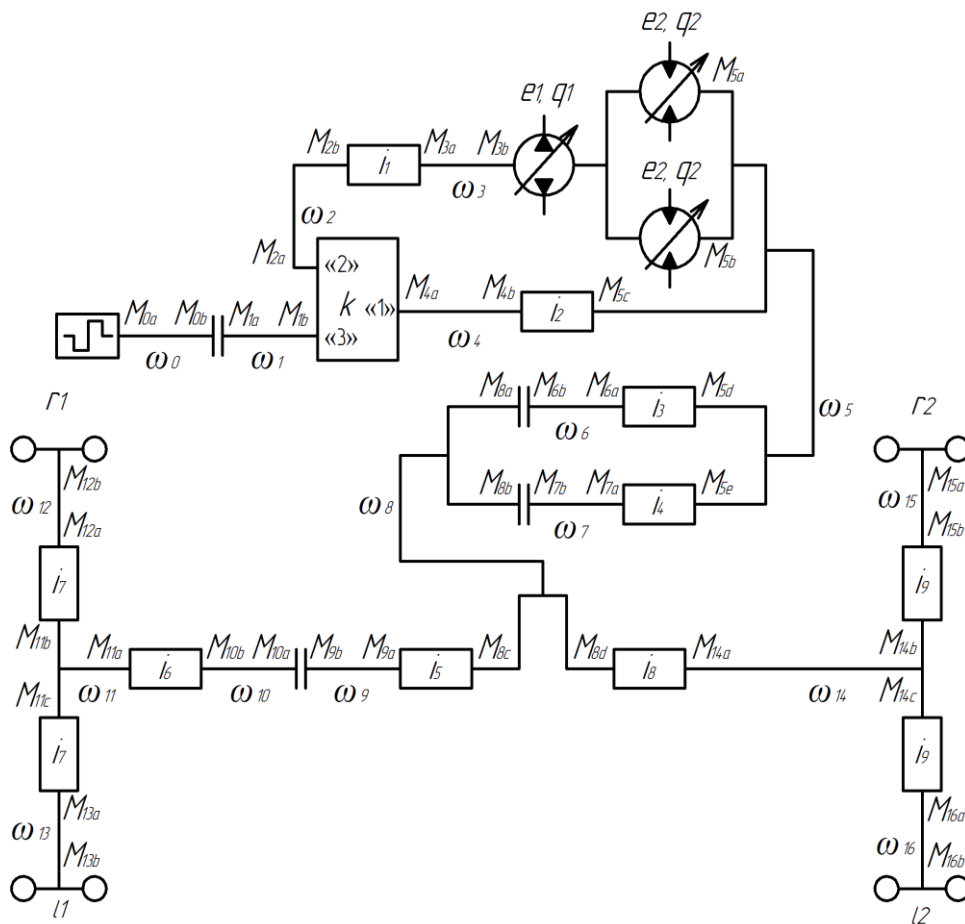


Рисунок 1 – Структурна схема трансмісії трактора Fendt 936 Vario: «1» – сонячна шестерня; «2» – коронна шестерня; «3» – водило

тяговому режимі русі, яка дозволяє описувати зміну кутових прискорень (2) та силових параметрів (3) елементів трансмісії. Модель складена на основі взаємодії кінематичних, силових та енергетичних параметрів ГОМТ, які визначаються шляхом розв'язання рівнянь, що складені на базі математичних моделей Городецького К.І. та рівнянь Вілліса. Структурна схема безступінчас-

тої трансмісії трактора Fendt 936 Vario наведена на рис. 1.

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{d\omega_0}{dt} - \frac{d\omega_d}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_0}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_4}{dt} - k \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + (k-1) \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = 0; \\
S_1 \cdot \frac{d\omega_4}{dt} - S_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} - \frac{d\omega_5}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_2}{dt} \cdot i_1 - \frac{d\omega_3}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_4}{dt} \cdot i_2 - \frac{d\omega_5}{dt} = 0; \\
e_1 \cdot q_1 \cdot \frac{d\omega_3}{dt} + q_1 \cdot \omega_3 \cdot \frac{de_1}{dt} - 2 \cdot e_2 \cdot q_2 \cdot \frac{d\omega_5}{dt} - 2 \cdot q_2 \cdot \omega_5 \cdot \frac{de_2}{dt} = \\
= \left( \frac{K_{1y}}{\mu} \cdot (1 + C_{1y} \cdot |\omega_3|) + 2 \cdot \frac{K_{2y}}{\mu} \cdot (1 + C_{2y} \cdot |\omega_5|) \right) \cdot \frac{d\Delta P}{dt} + \\
+ \left( \frac{K_{1y}}{\mu} \cdot C_{1y} \cdot \frac{d}{dt} |\omega_3| + 2 \cdot \frac{K_{2y}}{\mu} \cdot C_{2y} \cdot \frac{d}{dt} |\omega_5| \right) \cdot \Delta P; \quad \frac{d\omega_5}{dt} \cdot i_3 - \frac{d\omega_6}{dt} = 0; \\
\frac{d\omega_6}{dt} - \frac{d\omega_8}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_8}{dt} \cdot i_5 - \frac{d\omega_9}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_9}{dt} - \frac{d\omega_{10}}{dt} = 0; \\
\frac{d\omega_{10}}{dt} \cdot i_6 + \frac{d\omega_{11}}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_{11}}{dt} \cdot i_7 - \frac{d\omega_{12}}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_{11}}{dt} \cdot i_7 - \frac{d\omega_{13}}{dt} = 0; \\
\frac{d\omega_8}{dt} \cdot i_8 - \frac{d\omega_{14}}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_{14}}{dt} \cdot i_9 - \frac{d\omega_{15}}{dt} = 0; \quad \frac{d\omega_{14}}{dt} \cdot i_9 - \frac{d\omega_{16}}{dt} = 0,
\end{array} \right. \quad (2)$$

де  $\frac{d\omega_i}{dt}$  – кутові прискорення ланки;  
 $\frac{d\omega_d}{dt}$  – кутові прискорення ланки колінчастого вала ДВЗ;  
 $k$  – внутрішнє передавальне відношення планетарного ряду;  
 $S_1$  – характерний параметр сателітів;  
 $\frac{d\omega_s}{dt}$  – кутові прискорення сателіта;

$i_j$  – передавальне відношення редуктора;  $e_1, e_2$  – закони зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП;  $q_1, q_2$  – максимальна продуктивність гідромашин;  $\Delta P$  – перепад робочого тиску в ГОП;  $K_{iy}, C_{iy}$  – коефіцієнти втрат для гідронасоса ( $i=1$ ) і для гідромотора ( $i=2$ );  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $\omega_3, \omega_5$  – кутова швидкість вала гідронасоса та гідромотора;  $M_{nm}$  – моменти на ланках ГОМТ;  $m$  – індекс-число співпадає з номером кутової швидкості ланки;  $n$  – індекси-букви відповідають моментам на кінцях ланок;  $\eta_j$  – ККД редуктора;  $\Theta$  – коефіцієнт урахування втрат в зубчастих зачепленнях);  $\omega_i$  – кутова швидкість ланки;  $\eta_{13}, \eta_{23}$  – ККД в зубчастих зачепленнях сонце-сателіт та епіцикл-сателіт;

$N_{nm}$  – потужність, що передається ланками ГОМТ (добуток кутових швидкостей на відповідні моменти з урахуванням знаку дають величину і напрям потоків потужності на конкретних ланках і елементах ГОМТ);  $\Delta M_1, \Delta M_2$  – втрати моменту в гідромашинах.

$$\left\{ \begin{array}{l}
M_{4a} \cdot \eta_{13}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{4a})} + M_{2a} \cdot \eta_{23}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{2a})} + M_{1b} = 0; \quad M_{2b} \cdot \eta_1^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{2b})} + i_1 \cdot M_{3a} = 0; \\
M_{4a} \cdot k \cdot \eta_{13}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{4a})} + M_{2a} \cdot \eta_{23}^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{2a})} = 0; \quad M_{4b} \cdot \eta_2^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{4b})} + i_2 \cdot M_{5c} = 0; \\
M_{3b} - e_1 \cdot q_1 \cdot \Delta P = -\Delta M_1 \cdot \text{sign}(\omega_3); \quad M_{5a} + e_2 \cdot q_2 \cdot \Delta P = -\Delta M_2 \cdot \text{sign}(\omega_5); \\
M_{5b} + e_2 \cdot q_2 \cdot \Delta P = -\Delta M_2 \cdot \text{sign}(\omega_5); \quad M_{5d} \cdot \eta_3^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{5d})} + i_3 \cdot M_{6a} = 0; \\
M_{6b} + M_{8a} = 0; \quad M_{6b} = 0, \quad M_{5e} \cdot \eta_4^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{5e})} + i_4 \cdot M_{7a} = 0; \\
M_{7b} = 0, \quad M_{8b} = 0, \quad M_{8c} \cdot \eta_5^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{8c})} + i_5 \cdot M_{9a} = 0; \quad M_{9b} + M_{10a} = 0; \\
M_{10b} \cdot \eta_9^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{10b})} - i_6 \cdot M_{11a} = 0; \quad M_{11c} \cdot \eta_6^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{16c})} + i_7 \cdot M_{13a} = 0; \\
M_{8d} \cdot \eta_7^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{8d})} + i_8 \cdot M_{14a} = 0; \quad M_{14b} \cdot \eta_8^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{13b})} + i_9 \cdot M_{15a} = 0; \\
M_{14c} \cdot \eta_8^{\Theta \cdot \text{sign}(N_{13c})} + i_9 \cdot M_{16a} = 0; \quad M_{0a} + M_{0b} = 0; \quad M_{1a} + M_{0b} = 0; \\
M_{1a} + M_{1b} = 0; \quad M_{2a} + M_{2b} = 0; \quad M_{3a} + M_{3b} = 0; \quad M_{4a} + M_{4b} = 0; \\
M_{5a} + M_{5b} + M_{5c} + M_{5d} + M_{5e} = 0; \quad M_{6a} + M_{6b} = 0; \\
M_{8a} + M_{8b} + M_{8c} + M_{8d} = 0; \quad M_{9a} + M_{9b} = 0; \quad M_{10a} + M_{10b} = 0; \\
M_{11a} + M_{11b} + M_{11c} = 0; \quad M_{12a} + M_{12b} = 0; \quad M_{13a} + M_{13b} = 0; \\
M_{14a} + M_{14b} + M_{14c} = 0; \quad M_{15a} + M_{15b} = 0; \quad M_{16a} + M_{16b} = 0.
\end{array} \right. \quad (3)$$



Для опису взаємодії коліс з ґрунтом в функції конструктивних параметрів шин та фізико-механічних властивостей опорної поверхні використовується математична модель динаміки одиночного ведучого колеса в процесі розгону у вигляді

$$J_{\Sigma ij} \cdot \frac{d\omega_{ij}}{dt} = M_{kij}(F_{kp}) - M_{xij}(F_{kp}) - M_{fij}(F_{kp}), \quad (4)$$

де  $J_{\Sigma ij}$  – момент інерції пов'язаний з колесом мас, що обертаються;  $i$  – правий ( $i=r$ ) або лівий борт ( $i=l$ );  $j$  – передня ( $j=1$ ) або задня вісь ( $j=2$ );  $\omega_{ij}$  – кутова швидкість колеса ( $\omega_{ij} = \frac{V}{(1-\delta_{ij}) \cdot r_{dij}}$ );  $V$  – швидкість руху МТА;  $\delta_{ij}$  – буксування коліс;  $r_{dij}$  – динамічний радіус коліс;  $M_{kij}$  – крутний момент, що підведений до піввісі;  $F_{kp}$  – сила тяги на гаку;  $M_{xij}$  – момент, що створюється реакцією в подовжній площині колеса;  $M_{fij}$  – момент опору кочення колеса.

При математичному описі сили тяги на гаку  $F_{kp}$  при виконанні технологічної операції «оранка» – вводився коефіцієнт  $h_p(t)$ , який характеризує зміну глибини обробки ґрунту в процесі заглиблення плуга в ґрунт,

$$F_{kp} = f_{nl} \cdot G_{nl} + B_p \cdot h_{II} \cdot h_p(t) \cdot k_k \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon \cdot V^2}{k_k}\right), \quad (5)$$

де  $f_{nl}$  – коефіцієнт, що характеризує втрати на рух плуга;  $G_{nl}$  – вага плуга;  $B_p$  – ширина захвату плуга;  $h_{II}$  – глибина оранки;  $h_p(t)$  – коефіцієнт, який характеризує процес заглиблення плуга в ґрунт;  $k_k, \varepsilon$  – коефіцієнти, що характеризують опір пласта деформування (питомий опір ґрунту), форму робочої поверхні корпусу плуга та технологічні властивості ґрунту.

Продуктивність МТА  $S$  визначається з рівняння

$$S = C_w \cdot B_p \cdot V \cdot \tau, \quad (6)$$

де  $\tau$  – ступінь використання часу зміни.

При визначенні витрати палива за зміну  $Q_{T,CM}$  в ході польових робіт використовується залежність

$$Q_{T,CM} = Q_p \cdot T_p + Q_x \cdot T_x + Q_o \cdot T_{TEX}, \quad (7)$$

де  $Q_p, Q_x, Q_o$  – годинна витрата палива в ході робочого, холостого ходу та при зупинці МТА з працюючим ДВЗ;  $T_p, T_x, T_{TEX}$  – зміни витрати часу на відповідних режимах.

ККД МТА  $\eta_{MTA}$  розраховується на основі побудови балансу потужностей та має остаточний вигляд

$$\eta_{MTA} = \eta_T \cdot \eta_\delta \cdot \eta_f \cdot \eta_{f_{пл}} \cdot \eta_\mu \cdot \quad (8)$$

де  $\eta_T$  – ККД трансмісії трактора;  $\eta_\delta$  – ККД, що враховує втрати при буксуванні трактора;  $\eta_f$  – ККД, що враховує втрати при опорі коченню трактора;  $\eta_{FPL}$  – ККД, що враховує втрати при переміщенні плуга;  $\eta_\mu$  – ККД, що враховує швидкісні втрати.

Таким чином, у відповідності до задач дослідження складена узагальнена математична модель перехідних процесів в МТА з ГОМТ (1 – 4) при виконанні технологічної операції «оранка», яка враховує процес заглиблення знаряддя в ґрунт, дає змогу варіювати законом зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, а також описує взаємодію коліс з опорною поверхнею.

**Третій розділ** присвячено експериментальному дослідженню визначення впливу законів зміни параметру регулювання гідромашин ГОП на основні кінематичні, силові та енергетичні параметри ГОМТ з «диференціалом на вході» та «диференціалом на виході» при різноманітних навантаженнях в процесі розгону.

В якості об'єкту експериментальних стендових досліджень процесу розгону виступає стенд з ГОМТ, який розроблено кафедрою автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХПІ». Стенд працює по схемам «диференціал на виході»



Рисунок 2 – Розроблений стенд з ГОМТ з «диференціалом на виході»

(рис. 2) та «диференціал на вході» та складається з трьохфазного асинхронного двигуна змінного струму, циліндричних редукторів; порошковий гальмівний механізм (ПГМ), ГОМТ, масляного баку з фільтром та радіатора з вентилятором.

Вимірювальний комплекс складається з вимірювального модуля, датчиків надлишкового тиску, крокового двигуна, датчиків крутних моментів та індуктивних датчиків.

Експериментальне дослідження процесу розгону проводиться на стенді з ГОМТ, в два етапи:

1. На першому етапі збирається ГОМТ з «диференціалом на виході», кінематична схема стенду зображена на рис. 3,а. Процес розгону виконується

наступним чином: асинхронний двигун досягає максимальної кутової швидкості та відбувається лише зміна параметру регулювання гідронасосу по лінійному закону  $e_1(t)$ , а потім, водночас, ГОМТ розганяється зі створенням навантаження за рахунок зміни гальмівного моменту  $M_T$  (при різних законах  $M_T(t)$ ).

2. На другому етапі відбувається переобладнання стенду відповідно до кінематичної схеми ГОМТ з «диференціалом на вході» (рис. 3,б) та реалізується ті ж самі варіанти процесу розгону, що і на першому етапі.

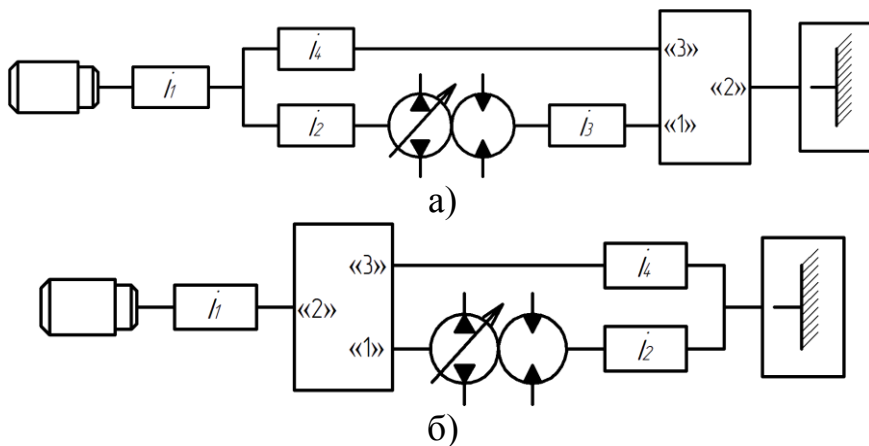


Рисунок 3 – Структурні схеми ГОМТ:  
а – «диференціал на виході»; б – «диференціал на вході»

Час, за який відбувається процес розгону, безпосередньо пов'язаний з часом зміни параметру регулювання гідронасоса  $e_1(t)$ . Тому час, за який змінюється параметр  $e_1(t)$  від положення, що відповідає мінімальній кутовій швидкості вала в ГОМТ з «диференціалом на

виході» або нульовій швидкості в ГОМТ з «диференціалом на вході», до положення, що характеризується максимальною кутовою швидкістю вала ПГМ, приймаємо 10 та 20 секунд, залежність  $e_1(t)$  носить лінійний характер.

В процесі теоретичного дослідження ГОМТ значення гальмівного моменту  $M_T$ , кутової швидкості на валу асинхронного двигуна  $\omega_d$  та параметру регулювання гідронасоса  $e_1$  бралися з експериментальних результатів, при цьому характер зміни закону  $M_T(t)$ , як при теоретичному, так і при експериментальному дослідженні, були максимально наближені один до одного.

Аналізуючи отримані дані теоретичного та експериментального дослідження ГОМТ, відзначається, що не залежно від схеми ГОМТ з «диференціалом на вході» або «диференціалом на виході», найбільша похибка не перевищує 8,9% при визначенні максимального перепаду робочого тиску в ГОП  $|\Delta P|_{\max}$ , 9,0% – для крутного моменту на валу трифазного асинхронного двигуна  $|M_d|_{\max}$ , 7,7% – для кутової швидкості вала гідронасоса  $|\omega_2|_{\max}$ , 2,8% – для кутової швидкості вала гідромотора  $|\omega_3|_{\max}$ , 5,6% – для кутової швидкості вала ПГМ  $|\omega_T|_{\max}$ .

На основі проведеного аналізу теоретичних та експериментальних даних, доведена доцільність використання математичної моделі роботи ГОМТ при дослідженні колісних тракторів в процесі розгону. Застосування даної математичної моделі обумовлено описом динамічних процесів, а також вираховуванням зміни кінематичних, силових та енергетичних параметрів ГОМТ в процесі розгону.

У четвертому розділі доведено адекватність застосування підходів для визначення техніко-економічних показників МТА. Проведено теоретичне дослідження впливу різного робочого об'єму гідромоторів в процесі розгону (від 160 до 350 см<sup>3</sup>) при різних законах зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП.

Перевірка доцільності застосування підходів, що дають змогу визначити техніко-економічних показників МТА, здійснювалась у польових умовах, де в

ході експериментального дослідження МТА (до складу якого входить колісний трактор Fendt 936 Vario з плугом) технологічної операції «оранка». Фіксувались такі показники, як: витрата палива та продуктивність МТА, а саме швидкість та час роботи при виконанні технологічної операції «оранка».

При визначенні техніко-економічних показників МТА виміри проводяться на відносно горизонтальній ділянці поля з агрофоном стерня кукурудзи на важких суглинках, при цьому ґрунт був в стані фізичної стиглості. Для визначення витрати палива МТА застосовується проточний датчик витрати палива, який встановлюється безпосередньо заводом виробником. Отримані значення витрати палива, швидкості та часу роботи відображаються на панелі приладів та на терміналі Vario колісного трактора Fendt 936 Vario.

В процесі чисельного експерименту, МТА розділено на три системи: «ДВЗ», «ГОМТ» та «Колесо». В першій системі «ДВЗ», представлено рівняння руху колінчастого вала ДВЗ з законом зміни параметру керування подачею палива  $\varepsilon_r$ . Дана система задає прискорення колінчастого вала з діючим на нього крутним моментом навантаження з трансмісії. В другій системі «ГОМТ», наведено математичну модель ГОМТ з законами зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП (гідронасоса  $e_1$  та гідромотора  $e_2$ ). Ця система задає прискорення коліс та крутний момент навантаження на ДВЗ, також на неї діє прискорення колінчастого вала та крутний момент навантаження з коліс. В третій системі «Колесо», представлена математична модель взаємодії коліс з опорною поверхнею, в яку, як підсистема, входило рівняння опису сили тяги на гаку, з законом зміни глибини обробки ґрунту. Максимальне значення сили тяги на гаку досягається за рахунок зміни значення глибини обробки ґрунту  $h_{II}$  плугом. Ця система задає крутний момент навантаження на трансмісію та враховує дію прискорення коліс, зчіпні властивості ґрунту та опору кочення коліс, вертикальне навантаження та тяговий опір.

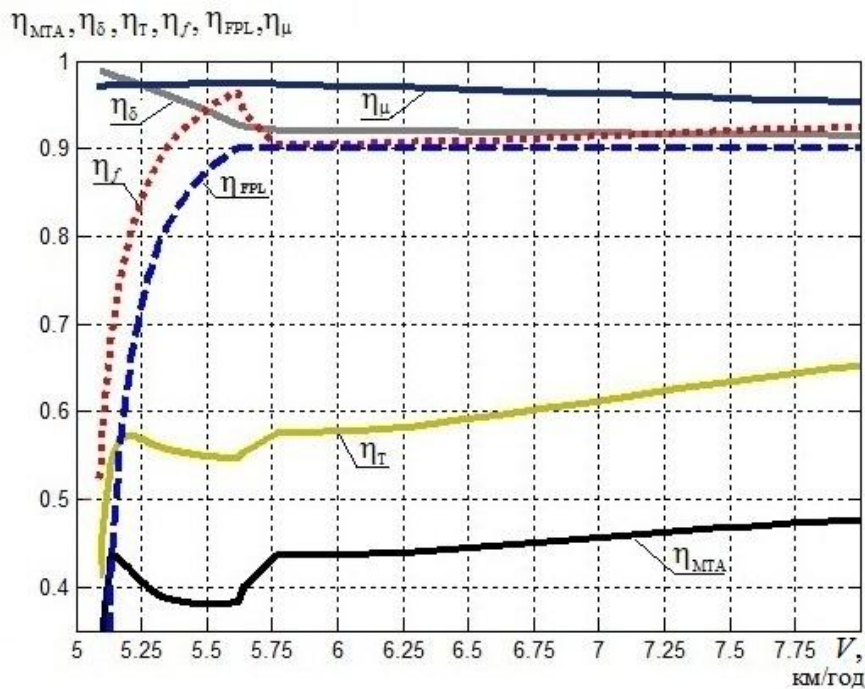


Рисунок 4 – Графік залежності складових ККД МТА від швидкості розгона в процесі заглиблення плуга

корення коліс, зчіпні властивості ґрунту та опору кочення коліс, вертикальне навантаження та тяговий опір.

За результатами чисельного експерименту динаміки МТА (1 – 4) на рис. 4 наведено залежності складових ККД від швидкості розгона в процесі заглиблення плуга. Відзначено, що порівнюючи результати теоретичного дослідження з

експериментальним з'ясовано, що годинна продуктивність та годинна витрата палива МТА більше на 8,0 % та на 4,0 %, відповідно.

В зв'язку з тим, що в ході експериментального дослідження виконання операції «оранка» завантаження двигуна по частоті обертання – максимальне, то, відповідно, в процесі теоретичного дослідження – закон зміни параметру керування подачею палива  $\varepsilon_r(t)$ , не змінюється, тобто  $\varepsilon_r = 1$ . Закон зміни параметру керування подачею палива  $\varepsilon_r(t)$  характеризує зміну кількості палива, яку паливний насос високого тиску подає в циліндри. Параметри  $e_1(t)$  та  $e_2(t)$  в ГОП характеризують зміну кута нахилу блоку циліндрів гідромашин. В ході дослідження закони зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, змінюються за лінійним законом в межах  $e_1 \in [0;1]$  та  $e_2 \in [1;0]$  для I варіанту за період більший 50 с, для IV варіанту за період 10 с, для II та III варіанту – проміжні між I та IV варіантом.

Коефіцієнт  $h_p(t)$ , який характеризує процес заглиблення плуга в ґрунт та, відповідно, закон зміни сили тяги на гаку, змінюється за лінійним законом в межах  $h_p \in [0;1]$  для I варіанту за період більший 10 с, для IV варіанту за період 5 с, для II та III варіанту – проміжні між I та IV варіантом.

Таким чином, в результаті моделювання процесу розгону МТА з'ясовано, що в залежності від законів зміни параметрів  $\varepsilon_r(t)$ ,  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  та коефіцієнту  $h_p(t)$  відбувається наступне:

- при використанні регульованих гідромоторів максимальним об'ємом 350 см<sup>3</sup> замість 160 см<sup>3</sup> для I – IV варіантів процесу розгону спостерігається: зниження перепаду робочого тиску в ГОП  $\Delta P$ ; зниження необхідної потужності ДВЗ  $N_d$ ; підвищення ККД ГОМТ  $\eta_{TP}$ ; підвищення буксування передніх  $\delta_{i1}$  та задніх коліс  $\delta_{i2}$ ;

- при використанні IV варіанту замість I варіанту процесу розгону для гідромоторів з робочим об'ємом 160 – 350 см<sup>3</sup>, спостерігається: підвищення перепаду робочого тиску в ГОП  $\Delta P$ ; підвищення необхідної потужності ДВЗ  $N_d$ ; зниження ККД ГОМТ  $\eta_{TP}$ ; підвищення буксування передніх  $\delta_{i1}$  та задніх коліс  $\delta_{i2}$ .

**У п'ятому розділі** проаналізовано основні закономірності розподілу параметрів МТА в процесі розгону, оснащених ГОМТ з «диференціалом на вході» (рис. 5) та з «диференціалом на виході» (рис. 6), проведено теоретичне дослідження впливу лінійних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП ( $e_1(t)$  та  $e_2(t)$ ), окрім того, сформовано раціональні закони зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, при використанні яких підвищуються техніко-економічні показники МТА.

В процесі чисельного дослідження, в системі MATLAB, впливу варіювання часу розгону (а саме зменшення часу розгону за допомогою лінійних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП) з'ясовано зміна основних техніко-економічних показників МТА, а саме збільшення перепаду робочо-

го тиску в ГОП та витрати палива МТА, а також зменшення ККД трансмісії та ККД МТА. Таким чином, з'ясовано, що при зменшенні часу розгону МТА з ГОМТ спостерігається перевантаження елементів ГОМТ.

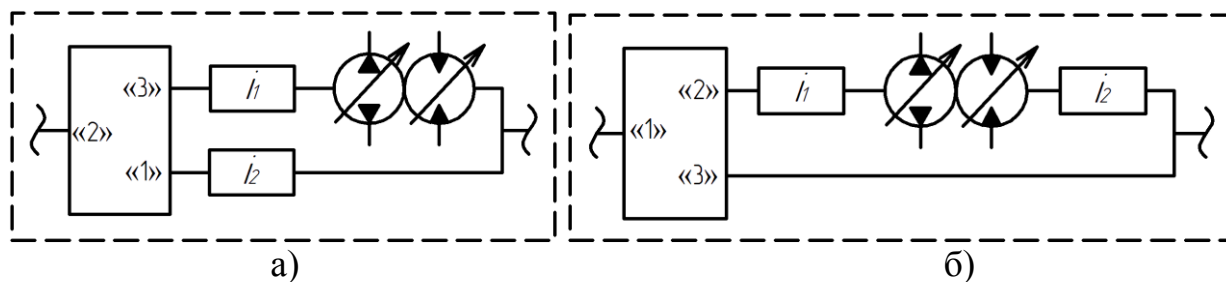


Рисунок 5 – Структурна схема ГОМТ з «диференціалом на вході»: а – схема ГОМТ з входом потужності на корону шестерню; б – схема ГОМТ з входом потужності на сонячну шестерню

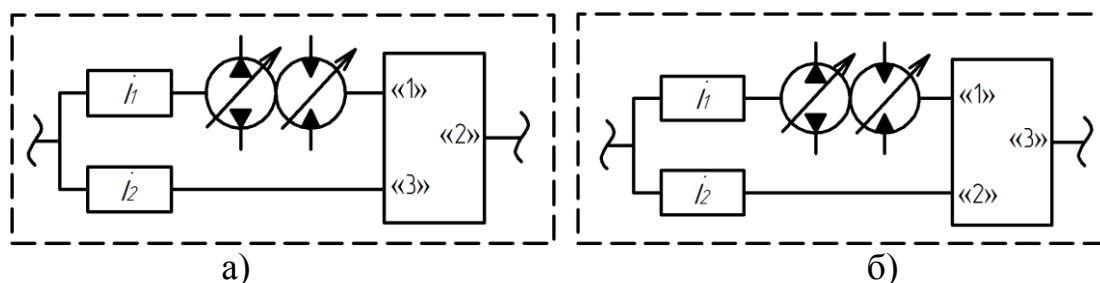


Рисунок 6 – Структурна схема ГОМТ з «диференціалом на виході»: а – схема ГОМТ з виходом потужності через корону шестерню; б – схема ГОМТ з виходом потужності через водило

Для формування раціональних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП введемо узагальнений критерій ( $K_{\Sigma}$ ) (який характеризує частковими критеріями ефективність та економічність МТА при виконанні технологічної операції «оранка» та повинен мати максимальне значення)

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Z_i \cdot K_i + \sum_{j=1}^m Z_j \cdot P_j, \quad (9)$$

де  $Z_i, Z_j$  – вагові коефіцієнти;  $K_i$  – часткові критерії;  $P_j$  – штрафна функція, яка знижує значення узагальненого критерію при виході варійованого параметра за межі допустимих значень.

Економічність МТА оцінюється по величині витрати палива ( $K_1(e_1, e_2)$ ), для оцінки ефективності МТА при виконанні технологічної операції «оранка» використовуються показники ККД МТА ( $K_2(e_1, e_2)$ ), а також значення часу розгону МТА ( $K_3(e_1, e_2)$ ):

$$K_1(e_1, e_2) = 1 - \frac{Q_p^*(e_1, e_2)}{Q_{p \max}}; \quad K_2(e_1, e_2) = \frac{\eta_{MTA}^*(e_1, e_2)}{\eta_{\max MTA}(e_1, e_2)}; \quad K_3(e_1, e_2) = 1 - \frac{t^*(e_1, e_2)}{t_{\max}}, \quad (10)$$

де  $Q_p^*(e_1, e_2)$  – поточне значення витрати палива;  $Q_{p \max}$  – максимальне значення витрати палива;  $\eta_{MTA}^*(e_1, e_2)$  – поточне значення ККД МТА;  $\eta_{\max MTA}(e_1, e_2)$  – макси-

мальне значення ККД МТА;  $t^*(e_1, e_2)$  – поточне значення часу розгону МТА;  $t_{\max}$  – максимальне значення часу розгону МТА, яке знаходиться при застосуванні лінійного закону зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП.

Змінюючи характер поведінки параметрів  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$ , збільшуються або зменшуються показники, що впливають на процес розгону МТА, а саме: перепад робочого тиску в ГОП ( $\Delta P$ ), кутова швидкість на валу гідронасоса ( $\omega_{e1^*}$ ), гідромотора ( $\omega_{e2^*}$ ) та сателіта в планетарному механізмі ( $\omega_S$ ). При виході за межі допустимих значень відбувається вихід із строю ГОМТ і отримання недостовірних результатів. В зв'язку з цим вводяться штрафні функції ( $P_j$ ), які виявляють перетин граничнодопустимих значень в процесі оптимізації.

$$P_{\Delta P}(|\Delta P|) = \begin{cases} 1 - \frac{|\Delta P^*|}{\Delta P_{\max}}, & \text{якщо } |\Delta P^*| > \Delta P_{\max}; \\ 0, & \text{якщо } |\Delta P^*| \leq \Delta P_{\max}; \end{cases} \quad P_{\omega_S}(|\omega_S|) = \begin{cases} 1 - \frac{|\omega_S^*|}{\omega_{S\max}}, & \text{якщо } |\omega_S^*| > \omega_{S\max}; \\ 0, & \text{якщо } |\omega_S^*| \leq \omega_{S\max}; \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{\omega_{e1^*}}(|\omega_{e1^*}|) = \begin{cases} 1 - \frac{|\omega_{e1^*}^*|}{\omega_{e1^*\max}}, & \text{якщо } |\omega_{e1^*}^*| > \omega_{e1^*\max}; \\ 0, & \text{якщо } |\omega_{e1^*}^*| \leq \omega_{e1^*\max}; \end{cases} \quad P_{\omega_{e2^*}}(|\omega_{e2^*}|) = \begin{cases} 1 - \frac{|\omega_{e2^*}^*|}{\omega_{e2^*\max}}, & \text{якщо } |\omega_{e2^*}^*| > \omega_{e2^*\max}; \\ 0, & \text{якщо } |\omega_{e2^*}^*| \leq \omega_{e2^*\max}; \end{cases}$$

де  $\Delta P^*$  – поточне значення перепаду робочого тиску в ГОП;  $\Delta P_{\max}$  – максимальне значення перепаду тиску в ГОП;  $\omega_S^*$  – поточне значення кутової швидкості сателіта;  $\omega_{S\max}$  – максимальне значення кутової швидкості сателіта;  $\omega_{e1^*}^*$ ,  $\omega_{e2^*}^*$  – поточні значення кутових швидкостей на валах гідронасоса та гідромотора;  $\omega_{e1^*\max}$ ,  $\omega_{e2^*\max}$  – максимальні значення кутових швидкостей на валах гідронасоса та гідромотора.

При виборі величин вагових коефіцієнтів для часткових критеріїв враховується, що сума вагових коефіцієнтів  $Z_i$  повинна дорівнювати 1. Обираючи величини вагових коефіцієнтів  $Z_j$  для штрафних функцій враховується, що при досяганні штрафною функцією значення, який виходить за межі діапазону зміни, ГОМТ стає непрацездатним. Таким чином, задача пошуку раціонального закону зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП полягає у застосуванні одного з методів теорії оптимізації, а саме методу прямого пошуку. Пошук якого складається з послідовних кроків дослідницького пошуку навколо базисної точки, за якою, в разі успіху, слідує пошук по зразку.

В процесі розгону МТА при виконанні технологічної операції «оранка» узагальнений критерій, який характеризує техніко-економічні показники в функції параметрів регулювання гідромашин ГОП, має наступний вигляд

$$K_{\Sigma}(e_1, e_2) = Z_1 \cdot \left(1 - \frac{Q_P^*(e_1, e_2)}{Q_{P\max}}\right) + Z_2 \cdot \frac{\eta_{MTA}^*(e_1, e_2)}{\eta_{MTA\max}} + Z_3 \cdot \left(1 - \frac{t^*(e_1, e_2)}{t_{\max}}\right) + \\ + Z_{\Delta P} \cdot P_{\Delta P}(|\Delta P|) + Z_{\omega_S} \cdot P_{\omega_S}(|\omega_S|) + Z_{\omega_{e1^*}} \cdot P_{\omega_{e1^*}}(|\omega_{e1^*}|) + Z_{\omega_{e2^*}} \cdot P_{\omega_{e2^*}}(|\omega_{e2^*}|). \quad (12)$$

В ході процесу оптимізації сформовано раціональні закони зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП для агрофону – стерня зернових колосових на легких, середніх та важких суглинках, які наведено на рис. 7.

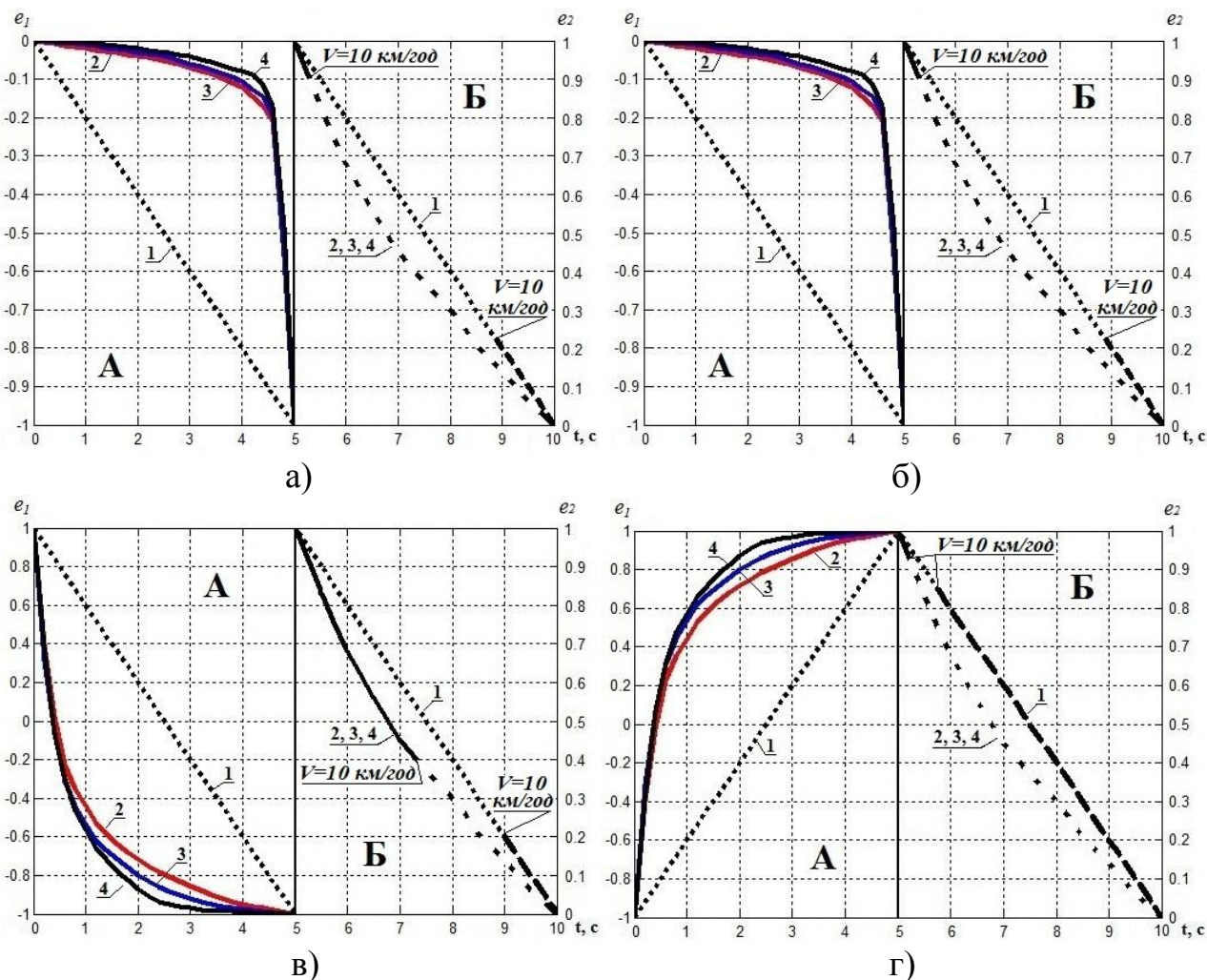


Рисунок 7 – Закони зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП ( $e_1(t)$  та  $e_2(t)$ ) (залежність параметрів регулювання гідромашин ГОП  $e_1$ ,  $e_2$  від часу  $t$ ): а – для ГОМТ, що наведено на рис. 5,а; б – для ГОМТ, що наведено на рис. 5,б; в – для ГОМТ, що наведено на рис. 6,а; г – для ГОМТ, що наведено на рис. 6,б;

А – зона регулювання гідронасоса; Б – зона регулювання гідромотора;  
 1 – прямолінійний закон зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП ( $e_1(t)$  та  $e_2(t)$ ); 2 – раціональний закон зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП ( $e_1(t)$  та  $e_2(t)$ ) для агрофону на легких суглинках; 3 – раціональний закон зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП ( $e_1(t)$  та  $e_2(t)$ ) для агрофону на середніх суглинках; 4 – раціональний закон зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП ( $e_1(t)$  та  $e_2(t)$ ) для агрофону на важких суглинках

Таким чином, порівнюючи результати при застосуванні лінійних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП з отриманими, в ході оптимізації, раціональними законами встановлено наступні зміни: зменшення витрати



палива, часу розгону МТА, перепаду робочого тиску в ГОП та збільшення ККД МТА.

Аналізуючи чисельні розрахунки динаміки розгону МТА з ГОМТ (рис. 5 – 6) рекомендовано використання конструкції ГОМТ з «диференціалом на вході» та з «диференціалом на виході», наведених, відповідно, на рис. 5,б та на рис. 6,б, застосування яких призводить до зниження перепаду тиску в ГОП, витрати палива та збільшення ККД МТА, в порівнянні з ГОМТ наведеними на рис. 5,а та на рис. 6,а. Також слід зазначити, що при використанні ГОМТ, наведених на рис. 5,б та на рис. 6,б, призводить до зменшення покриття діапазону регулювання гідромашин ГОП, що характеризується зменшенням часу розгону до максимальної швидкості МТА та до збільшення ефективності МТА.

Досліджуючи на умовній ділянці поля, значення продуктивності та витрати палива МТА за зміну, застосовуються лінійні та раціональні закони зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП ( $e_1(t)$  та  $e_2(t)$ ) в процесі розгону.

Порівнюючи отриманні результати, при визначенні техніко-економічних показників МТА за зміну, при застосуванні раціональних замість лінійних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП в процесі розгону, виявлено наступне:

– збільшення продуктивності МТА за зміну на 0,03 % (для ГОМТ наведеної на рис. 5,б) та на 0,13 % (для ГОМТ, наведеної на рис. 6,б);

– зменшення витрати палива МТА за зміну на 1,16 % (для ГОМТ наведеної на рис. 5,б) та на 1,26 % (для ГОМТ, наведеної на рис. 6,б).

## ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційного дослідження здійснено теоретичне узагальнення та вирішення науково-практичної задачі – підвищення економічності та ефективності МТА з ГОМТ за рахунок формування раціональних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП в процесі виходу при виконання технологічної операції «оранка», що виявляється в таких основних наукових результатах:

1. В процесі аналізу сучасної науково-технічної літератури, встановлено, що перспективним напрямком удосконалення керування МТА з безступінчастими ГОМТ в процесі розгону є визначення законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, при яких показники економічності та ефективності були б екстремальними.

2. Розроблена узагальнена математична модель динаміки ГОМТ, яка враховує зміну параметрів регулювання гідромашин ГОП, об'єм гідромашин, момент втрат у гідромашинах в процесі розгону, та доведена її адекватність шляхом порівняльного аналізу з експериментальними стендовими дослідженнями. Максимальна розбіжність між результатами теоретичного та експериментального стендового дослідження не перевищує 9,0%.

3. Визначено, що не залежно від часу варіювання законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, використовуючи гідромотор з робочим

об'ємом  $350 \text{ см}^3$  замість  $160 \text{ см}^3$  спостерігається максимальне зменшення на 4,9 % значень перепаду робочого тиску в ГОП та на 3,3 % необхідної потужності двигуна внутрішнього згорання, а також підвищення на 6,0 % ККД трансмісії, на 6,0 % буксування передніх коліс та на 4,7 % задніх коліс.

4. Встановлено, що зменшуючи час розгону МТА, оснащених ГОМТ, що працюють за схемами «диференціал на вході» та «диференціал на виході», за допомогою варіювання законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, призводить до збільшення перепаду робочого тиску в ГОП витрати палива, а також зменшення ККД трансмісії та ККД МТА – за рахунок збільшення прискорення, що супроводжується перевантаженням елементів ГОМТ.

5. Визначено, що при застосуванні раціональних законів зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП в процесі розгону МТА з ГОМТ за схемами «диференціал на виході» та «диференціал на вході»: зменшується витрата палива на 0,7 – 36,2%; збільшується ККД МТА на 0,5 – 29,7%; зменшується час розгону МТА на 8,8 – 79,7%; зменшується перепад робочого тиску на 2,2 – 48,7% – в порівнянні з використанням лінійного закону зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП.

6. Розроблені рекомендації, щодо вибору раціонального закону зміни параметрів регулювання гідромашин ГОП, використовуються в розрахункову практику ПАТ «Харківський тракторний завод» та в навчальний процес кафедри автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кожушко А.П. Разработка и анализ бесступенчатой двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии по критерию наибольшего КПД, автомобиля для ремонта нефтегазовых скважин / В.Б. Самородов, А.О. Островерх, А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2012. – №60 (966). – С. 105 – 111. *Здобувачем отримано результати математичного моделювання процесу розгону безступінчастої двопоточної ГОМТ на транспортному режимі роботи автомобіля для ремонту нафтогазових свердловин*

2. Кожушко А.П. Анализ технологического режима работы бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссии с использованием отечественных гидроагрегатов автомобиля для ремонта нефтегазовых скважин / В.Б. Самородов, А.О. Островерх, А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2013. – №30 (1003). – С. 23 – 31. *Здобувачем отримано результати математичного моделювання процесу розгону безступінчастої двопоточної ГОМТ на транспортному режимі роботи автомобіля для ремонту нафтогазових свердловин*

3. Кожушко А.П. Порівняльний аналіз математичних моделей процесу розгону самохідних машин / В.Б. Самородов, А.І. Бондаренко, А.П. Кожушко // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2014. – № 37. – С. 108 –

115. *Здобувачем виконано порівняльний аналіз математичних моделей процесу розгону самохідних машин*

4. Кожушко А.П. Експериментальне дослідження процесу розгону колісного трактора Fendt 936 Vario / Самородов В.Б., Бондаренко А.І., Кожушко А.П., Мітцель М.О. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 9 (1052). – С. 3 – 10. *Здобувачем отримано та проаналізовано результати експериментального дослідження процесу розгону колісного трактора*

5. Кожушко А.П. Перспективні трансмісії колісних тракторів / В.Б. Самородов, А.І. Бондаренко, А.П. Кожушко, Є.С. Пелипенко, М.О. Мітцель // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 10 (1053). – С. 3 – 10. *Здобувачем проаналізовані сучасні ступінчасті та безступінчасті трансмісії колісних тракторів*

6. Кожушко А.П. Методика експериментального дослідження процесу розгону трактора Fendt 936 Vario при виконанні польових та транспортних робіт / А.І. Бондаренко, А.П. Кожушко, М.О. Мітцель, В.Б. Самородов // Вісник Житомирського державного технічного університету. – Житомир: ЖДТУ, 2014. – № 2 (69). – С. 48 – 55. *Здобувачем отримано результати експериментального дослідження процесу розгону колісного трактора*

7. Кожушко А.П. Визначення оптимального закону зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі в процесі розгону колісних тракторів з гідрооб'ємно-механічною трансмісією / Вісник Сумського національного аграрного університету. – Суми: СНАУ, 2014. – №11 (26). – С. 108 – 114.

8. Кожушко А.П. Особливості роботи колісних тракторів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями / Сільськогосподарські машини. – 2015. – №31. – С. 70 – 82.

9. Кожушко А.П. Результати теоретичного дослідження процесу розгону колісного трактора з безступінчастою гідрооб'ємно-механічною трансмісією / А.П. Кожушко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2015. – № 156. – С. 355 – 364.

10. Кожушко А.П. Результати моделювання роботи колісного трактора з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями, що працюють по схемі «диференціал на вході» // А.П. Кожушко // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал. – 2015. – №1 (3). – С. 93 – 102.

11. Кожушко А.П. Техничко-економические показатели колесного трактора Fendt 936 Vario при выполнении технологической операции «пахота» // А.П. Кожушко // Приволжский научный вестник. – Ижевск. – 2015. – № 10 (50). – С. 20 – 25.

12. Кожушко А.П. Дорожні випробування колісного трактора з двопотоковою гідрооб'ємно-механічною трансмісією / В.Б. Самородов, А.П. Кожушко, М.О. Мітцель // Первый независимый научный вестник. – Киев, 2015. – №1. – С. 54 – 61. *Здобувачем отримано результати експериментального дослідження показників ГОМТ в процесі розгону*

13. Кожушко А.П. Порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень робочих процесів у безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісіях / Кожушко А.П. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні засади сталого розвитку національного господарства», м. Кам'янець-Подільський, 21-22 листопада 2014 р. / Подільський державний аграрно-технічний університет. – Кам'янець-Подільський, 2014. – Ч.2. – 248 с.

14. Kozhushko A. Laboratory stand for research of the workflow in hydrostatic mechanical transmissions / A. Kozhushko, A. Bondarenko, M. Mittsel // European Science and Technology: materials of the IX international research and practice conference, Munich, December 24 – 25, 2014. – 476 p. *Здобувачем отримано результати експериментального дослідження показників ГОМТ в процесі розгону*

15. Кожушко А.П. Аналіз результатів теоретичного дослідження гідрооб'ємно-механічних трансмісій, що працюють по схемам «диференціал на вході» та «диференціал на виході» в процесі розгону / А.П. Кожушко // Wykonane na materiałach Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej Konferencji „Inżynieria i technologia. Projekty naukowe”, Sopot, 27.02.2015 – 28.02.2015. – Warszawa – Polska, 2015. – 52 str.

## АНОТАЦІЇ

**Кожушко А.П. Підвищення техніко-економічних показників колісних тракторів з безступінчастими трансмісіями раціональною зміною параметрів регулювання гідромашин в процесі розгону.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016 р.

Дисертацію присвячено підвищенню техніко-економічних показників машинно-тракторних агрегатів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями за рахунок використання раціональних законів зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі в процесі розгону.

Складена комплексна математична модель систем машинно-тракторного агрегату, вдосконалено математичний опис зміни сили тяги на гаку шляхом урахування процесу заглиблення плуга в процесі виходу на технологічний режим при виконанні операції «оранка». Встановлено вплив зміни робочого об'єму гідромотору при різних законах зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі на динаміку розгону машинно-тракторного агрегату. Визначено вплив зміни часу розгону машинно-тракторного агрегату при різних законах зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі. Сформовано раціональні закони зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі, при яких підвищуються техніко-економічні показники машинно-тракторного агрегату.

*Ключові слова:* колісний трактор; гідрооб'ємно-механічна трансмісія; динамічні процеси при розгоні; техніко-економічні показники; гідрооб'ємна передача; машинно-тракторний агрегат; регулювання гідромашин.

**Кожушко А.П. Повышение технико-экономических показателей колесных тракторов с бесступенчатыми трансмиссиями рациональным изменением параметров регулирования гидромашин в процессе разгона.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016 г.

Диссертация посвящена повышению технико-экономических показателей машинно-тракторных агрегатов с гидрообъемно-механическими трансмиссиями путем определения рационального изменения параметров регулирования гидромашин в процессе разгона.

В работе проведен анализ современных ступенчатых и бесступенчатых трансмиссий колесных тракторов, рассмотрены подходы, которые применяются в процессе исследования динамики разгона автомобилей и колесных тракторов. Проанализированы подходы для определения основных технико-экономических показателей машинно-тракторных агрегатов.

Выполнено теоретическое и экспериментальное стендовое исследование работы гидрообъемно-механических трансмиссий в процессе разгона, на основе которых установлено, что математическая модель, применяемая в теоретическом исследовании, адекватна и позволяет использовать ее в дальнейшем исследовании.

На основе экспериментального и теоретического исследования работы машинно-тракторного агрегата при выполнении технологической операции «пахота», подтверждено целесообразность использования подходов, которые определяют часовой расход топлива и основные технико-экономические показатели машинно-тракторного агрегата.

Выполнено теоретическое исследование влияния рабочего объема гидромоторов при различных законах изменения параметров регулирования гидромашин гидрообъемной передачи на динамику разгона машинно-тракторного агрегата, а также на его основные технико-экономические показатели.

В процессе теоретического исследования установлено влияние изменения времени разгона машинно-тракторного агрегата (при различных законах изменения параметров регулирования гидромашин гидрообъемной передачи) на основные технико-экономические показатели машинно-тракторного агрегата при выполнении технологической операции «пахота».

Проведено теоретическое исследование, в котором с помощью методов оптимизации, определены рациональные законы изменения параметров регулирования гидромашин гидрообъемной передачи, которые обеспечивают повышение технико-экономических показателей машинно-тракторного агрегата с гидрообъемно-механической трансмиссией при выполнении технологической

операции «пахота», для агрофонов – стерня зерновых на легких, средних и тяжелых суглинках.

В работе теоретически установлено увеличение технико-экономических показателей машинно-тракторных агрегатов с гидрообъемно-механическими трансмиссиями, за счет применения рациональных законов изменения параметров регулирования гидромашин гидрообъемной передачи при выполнении технологической операции «пахота».

На основе полученных в диссертационной работе результатов исследования разработаны рекомендации по выбору рационального закона изменения параметров регулирования гидромашин гидрообъемной передачи.

*Ключевые слова:* колесный трактор; гидрообъемно-механическая трансмиссия; динамические процессы при разгоне; технико-экономические показатели; гидрообъемная передача; машинно-тракторный агрегат; регулирование гидромашин.

**Kozhushko A.P. Improving technical and economic indicators of wheeled tractors with continuously variable transmission by a rational change of regulation hydromachines parameters during acceleration.** – On the rights of a manuscript.

The dissertation for obtaining a scientific degree of Candidate of Science (Technology) on the specialty 05.22.02 – automobiles and tractors. –National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2016.

Dissertation is devoted to improve the technical and economic performance of wheeled tractors with hydrovolumetric mechanical transmission by detecting changes in the parameters of rational regulation of hydromachines during acceleration.

Compiled complex mathematical model of the system tractor units improved the mathematical description of the changes tractive force on the hook by taking into account the process of deepening the plow in entering the technological mode of operation "plowing". The influence of changes in the working volume hydraulic parameters changes various laws regulating hydraulic machines hydrovolumetric transmission to dynamics of dispersal tractor unit. The influence of changes in time acceleration tractor unit under various laws of parameters regulating hydraulic machines hydrovolumetric transmission. Formed rational laws change control parameters of hydrovolumetric gear in which the increase of technical and economic parameters of the machine and tractor unit.

*Key words:* wheeled tractor; hydrovolumetric mechanical transmission; dynamic processes during acceleration; technical and economic indicators; hydrovolumetric gear; tractor units; regulation hydromachines.

Підписано до друку «04» березня 2016 р.  
Формат видання 134x215. Формат паперу 60x90/16. Папір офсет. Цифровий  
друк. Гарнітура Times New Roman. Обсяг авт. арк. 0,9. Наклад 100 прим.  
Замовлення № 125

---

Надруковано у копії-цетрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В. Свідоцтво ВО №022953)  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)

