

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

МІТЦЕЛЬ МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 631.372

**ВПЛИВ ОСОБЛИВИХ ЗОН РОБОТИ ГІДРОПЕРЕДАЧІ НА ТЕХНІКО-
ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ З
БЕЗСТУПНЧАСТИМИ ГІДРООБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНИМИ
ТРАНСМІСІЯМИ**

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:

доктор технічних наук, професор
Самородов Вадим Борисович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри автомобіле- і тракторобудування

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Артюмов Микола Прокопович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. П. Василенка, м. Харків,
професор кафедри тракторів і автомобілів

кандидат технічних наук, доцент
Тімков Олексій Миколайович,
Національний транспортний університет, м. Київ,
доцент кафедри автомобілів

Захист відбудеться «30» серпня 2016 р. о 11-00 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 «___» _____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ребров О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Загальносвітові тенденції щодо оснащення тракторів безступінчастими двопотоковими гідрооб'ємно-механічними трансмісіями (ГОМТ) спрямовані на поліпшення умов праці механіка-водія та підвищення техніко-економічних показників (ТЕП) машинно-тракторного агрегату (МТА) при виконанні основних сільськогосподарських операцій та в транспортному режимі. Зважаючи на те, що в Україні почалися активні роботи з розробки та впровадження ГОМТ на колісні трактори, існує нагальна потреба в удосконаленні методів розрахунку робочих процесів цих трансмісій.

На відміну від тракторів зі ступінчастими механічними коробками передач, ККД ГОМТ не є постійною величиною і змінюється по всій довжині регулювальної характеристики (РХ) трансмісії. Задля досягнення високих ТЕП трактор повинен працювати в зонах максимального ККД з рекомендованою агротехнічною швидкістю. Для ГОМТ типу з диференціалом "на виході" зони найвищого ККД знаходяться в районі нульових значень відносного параметра регулювання гідрооб'ємної передачі (ГОП), так званих особливих зон (ОЗ), в яких обидві гідромашини працюють в насосному режимі на компенсацію власних механічних та об'ємних втрат.

Дослідження процесів, що протікають в ОЗ роботи ГОП в складі ГОМТ, визначення причин входу та виходу в ОЗ, її ширини залежно від навантаження, а також розробка математичного апарату для комплексного аналізу роботи МТА в ОЗ в процесі розгону та сталого руху є актуальною науково-практичною задачею. Розміщення швидкостей основних енергоємних агротехнічних операцій (оранки, культивування, дискування та ін.) в зонах найвищого ККД ще на етапі обґрунтування кінематичної схеми дозволить суттєво покращити ТЕП трактора з ГОМТ з диференціалом "на виході", що й обумовило напрямок дослідження дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі автомобіле- і тракторобудування НТУ "ХП" у рамках держбюджетних НДР МОН України: "Концептуальні основи підвищення тягово-енергетичних і техніко-економічних показників сільськогосподарських тракторів на основі просторово-топологічних уявлень" (ДР № 0110U001239); "Наукове обґрунтування конструкції трансмісії перспективного трактора з потужністю двигуна 250 кВт" (ДР № 0111U002264); "Створення наукових засад перспективних енерго- і ресурсозберігаючих конструкцій та технологічних процесів підіймально-транспортних систем та машинно-тракторних агрегатів (ДР № 0112U000401); "Розробка методів підвищення енергоефективності і ресурсозбереження підіймно-транспортних споруд, машинно-тракторних агрегатів та гібридних транспортних засобів" (ДР № 0113U000427) та госпдоговору "Технічний аудит і модернізація систем та вузлів тракторів виробництва ПАТ "Харківський тракторний завод" (АТ "ХТЗ", м. Харків), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення техніко-економічних показників колісних тракторів, оснащених гідрооб'ємно-

механічними трансмісіями з диференціалом "на виході", за рахунок розміщення агротехнічних швидкостей в особливих зонах роботи гідрооб'ємної передачі.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

1. Дослідити підходи з визначення напрямку потоків потужності по гідравлічній та механічній гілках ГОМТ з диференціалом "на виході" в районі нульового значення параметру регулювання ГОП;
2. Розвинути математичну модель особливих зон роботи ГОП та на основі теоретичних досліджень встановити закономірності зміни об'ємних, механічних та загальних втрат в ГОП на різних режимах навантаження вихідного валу ГОМТ;
3. Сформувати рекомендації щодо перспективних схем ГОМТ з диференціалом "на виході", що дають змогу досягати максимального ККД трансмісії та продуктивності МТА в межах швидкостей основних агротехнічних операцій;
4. Шляхом експериментальних досліджень підтвердити адекватність математичної моделі об'ємних та механічних втрат для ГОП як в моноблочному виконанні та з роздільними гідромашинами;
5. Експериментально встановити достовірність розробленої математичної моделі ОЗ на різних навантажувальних режимах, при різній тривалості зміни відносного параметра регулювання ГОП в умовах лабораторного стенду ГОМТ та на колісному тракторі ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С;
6. Підтвердити експериментальними дослідженнями розроблені теоретичні положення щодо перспективних схем ГОМТ з диференціалом "на виході".

Об'єкт дослідження – робочі процеси гідрооб'ємно-механічних трансмісій машинно-тракторних агрегатів на базі колісних тракторів.

Предмет дослідження – вплив режимів навантаження та конструктивних параметрів гідрооб'ємно-механічних трансмісій на процес утворення особливих зон та техніко-економічні показники машино-тракторного агрегату.

Методи дослідження: дисертаційне дослідження базується на методах математичного аналізу, що дозволяють сформулювати взаємозв'язки кінематичних і силових параметрів ГОМТ та оцінити основні ТЕП трактора в агрегаті з сільськогосподарським знаряддям; диференційне та інтегральне обчислення для моделювання динамічних процесів в процесі руху колісного трактора з ГОМТ; трансмісійний матричний аналіз; методи експериментальних досліджень із залученням високоточних датчиків та сучасної електронної реєструючої апаратури.

Розрахункові дослідження та обробку експериментальних даних реалізовано в програмному комплексі MathCad та MATLAB Simulink.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше встановлені закономірності зміни об'ємних, механічних та загальних втрат в ГОП на різних режимах навантаження ГОМТ з диференціалом "на виході" з урахуванням особливостей роботи ГОП в ОЗ, що дає можливість визначення зон найвищого ККД трансмісії;

– вперше запропоновано підхід для проектування перспективних ГОМТ з диференціалом "на виході", який дає змогу досягти максимального ККД трансмісії та продуктивності МТА шляхом формування ОЗ роботи ГОП в межах швидкостей основних агротехнічних операцій;

– отримала подальший розвиток математична модель ГОП, яка відрізняється від існуючих визначенням меж особливої зони та дозволяє досліджувати робочі процеси безпосередньо в ній.

Практичне значення отриманих результатів для тракторобудування полягає в розробці математичного апарату для комплексного аналізу процесів в ОЗ та визначення зон найвищого ККД ГОМТ. Визначено, що для ГОМТ типу з диференціалом на "виході" доцільне розміщення максимальної експлуатаційної потужності ДВЗ в ОЗ, а самі ОЗ повинні знаходитись в діапазоні агротехнічних швидкостей виконання енергоємних сільськогосподарських робіт з урахуванням реального буксування, що дозволить забезпечити найвищий ККД ГОМТ. Запропоновано схемне рішення трансмісії, яка перевищує першу вітчизняну двопотокову ГОМТ-1С за всіма техніко-економічними показниками. Розроблено методику експериментальних досліджень ГОП та доведено достовірність математичної моделі втрат в об'ємних гідромашинах К. І. Городецького та Polymod, що може бути використано в практиці підприємств, які спеціалізуються на розробці і виробництві ГОП. Розроблено методику експериментальних досліджень ГОМТ з урахуванням особливостей роботи ГОП в ОЗ, що знайшло застосування в практиці стендових і натурних випробувань ведучих підприємств галузі тракторобудування.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в практику дослідно-конструкторських робіт АТ "ХТЗ", компоненти вимірювального комплексу стенду ГОМТ використовуються УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого (м. Київ), а також в навчальному процесі та наукових дослідженнях кафедри автомобіле- і тракторобудування НТУ "ХП".

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційного дослідження отримані здобувачем особисто. Серед них: обґрунтування доцільності розгляду ОЗ роботи ГОП, як окремого режиму циркуляції потужності в замкнутому контурі ГОМТ; встановлення причин входу та виходу в ОЗ та впливу експлуатаційних режимів навантаження на її ширину; встановлення залежності зміни ККД ГОМТ та ОЗ від робочого об'єму гідромотору та обертів ДВЗ; розробка та підтвердження рекомендацій для схемних рішень ГОМТ з диференціалом "на виході", що дозволяють підвищити основні ТЕП МТА за рахунок розміщення агротехнічних швидкостей в зонах максимального ККД ГОМТ; організація і проведення комплексних багатоетапних стендових та натурних досліджень робочих процесів в ГОП і ГОМТ; інтерпретація отриманих результатів відповідно до вимог стандартів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-практичних конференціях: "Інноваційні засади сталого розвитку національного господарства" (м. Кам'янець-Подільський, 2014); IX international research and practice conference "European Science and Technology" (Німеччина, м. Мюнхен, 2014); "Інноваційні технології в АПК" (м. Луцьк, 2015); "Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия" (Россия, г. Новосибирск, 2015); "Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования" (Россия, г. Воронеж, 2015).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 14 наукових працях, серед них: 7 статей у наукових фахових виданнях України (2 – у наукометричних базах), 2 статті у закордонних періодичних фахових виданнях, 5 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 198 сторінок, з них: 85 рисунків по тексту, 18 рисунків на 16 окремих сторінках, 16 таблиць по тексту, 3 таблиці на 3 сторінках, список використаних джерел зі 149 найменувань на 19 сторінках, 8 додатків на 32 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження; сформульовано мету, задачу, об'єкт та предмет дослідження; наведено методи дослідження, та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; викладені положення, які визначають наукову новизну та практичне значення роботи; надано інформацію щодо апробації результатів та публікацій за темою дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** досліджено схемні рішення двопотокових безступінчастих ГОМТ, як існуючих так і перспективних. Виявлено, що схеми ГОМТ з диференціалом "на виході" є більш поширеними і впроваджуються переважно на колісних тракторах сільськогосподарського призначення. Механічна частина сучасних ГОМТ стає все більш складною, оскільки перехід від одно- до багатодіапазонних трансмісії супроводжується підвищенням ККД.

Досвід в області обґрунтування структурних схем, методів розрахунку, конструювання та випробування ГОП і ГОМТ узагальнено в роботах Аврамова В.П., Александрова Є.Є., Бабаєва О.М., Бондаренко А.І., Вашеца А.Д., Городецького К. І., Кісточкіна Є.С., Коденко М.М., Красенькова В.І., Лебедева А.Т., Петрова В.А., Самородова В.Б. Aitzetmuller H., Bavendiek R., Ivantysynova M., Kress J., Kugi A., Molari G., Pettersson K., Renius K., Resch R., та ін. В роботах відзначається, що існують режими з циркуляцією потужності по гідравлічній та механічній гілках замкнутого контуру ГОМТ, які істотно впливають на ККД трансмісії. Тому доцільно виділення особливої зони роботи ГОП в складі ГОМТ з диференціалом "на виході" (двонасосного режиму) в окремий режим, та його всебічне теоретичне і експериментальне дослідження.

Дослідження впливу ОЗ роботи ГОП на основні ТЕП колісних тракторів, пошук зони найвищого ККД ГОМТ, встановлення причин, що її обумовлюють та розробка рекомендацій для структурних схем ГОМТ з диференціалом "на виході" визначили мету та задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** показано особливості існуючої математичної моделі ОЗ роботи ГОП, яка використовується для визначення точок входу та виходу з ОЗ, проте не дозволяє встановити ККД окремих гідромашин, що необхідно для повного розуміння процесів та їх систематизації. Розвиток математичної моделі ОЗ

виконано на прикладі схеми ГОМТ з диференціалом "на виході" (рис.1 а, б) з променеподібною регульовальною характеристикою.

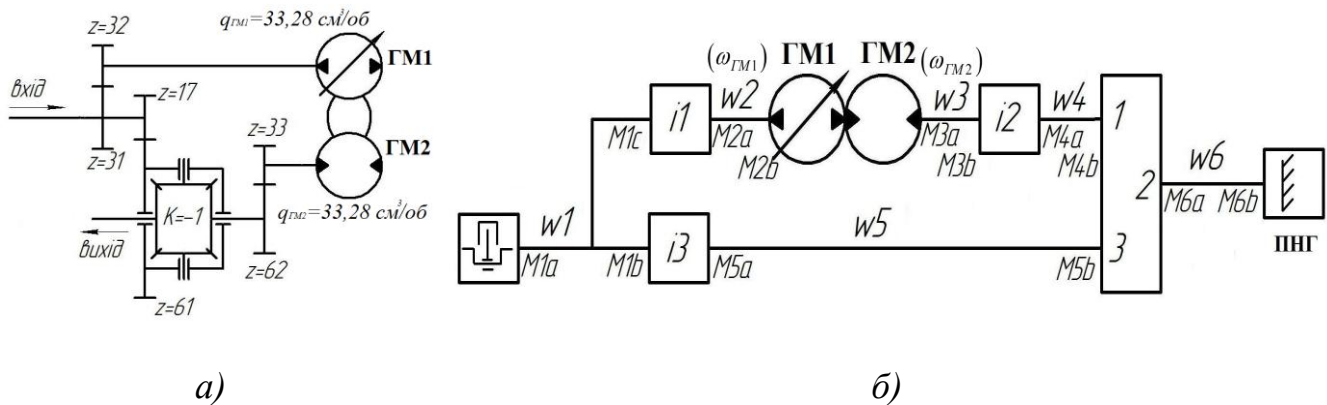


Рисунок 1 – Кінематична (а) та структурна (б) схеми ГОМТ

Вперше на явище неодноразової зміни кінематичних та силових параметрів ГОМТ в районі нульових значень відносного параметра регулювання ГОП звернув увагу Кісточкін Є.С., проте ґрунтовних досліджень задля встановлення причинно-слідчих зв'язків проведено не було. В основу уточненої математичної моделі ОЗ покладено аксіоматику та рівняння запропоновані Аврамовим В.П. та Самородовим В.Б., згідно яких крутний момент на валах гідромашин ГМ1 та ГМ2 визначається за співвідношеннями:

$$M_{ГМ1} = M_{2b} = M_{T1} \mp \Delta M_1, \quad M_{ГМ2} = M_{3a} = M_{T2} \pm \Delta M_2, \quad (1)$$

де M_{T1}, M_{T2} – теоретичні моменти на валах гідромашин; $\Delta M_1, \Delta M_2$ – втрати крутного моменту за рахунок механічних і гідродинамічних втрат в гідромашинах.

В залежності від напрямку потоку потужності ΔM_1 та ΔM_2 можуть виступати або як втрати моментів, або як їх прирощення. Тому в формулі (1) верхні знаки беруться для розрахунку зворотного потоку потужності через ГОП, нижні – для прямого. Теоретичні крутні моменти на валах гідромашин дорівнюють:

$$M_{T1} = \Delta p \cdot q_1 \cdot e_1, \quad M_{T2} = \Delta p \cdot q_2 \cdot e_2, \quad (2)$$

де Δp – перепад тиску на гідромашинах; $q_{1,2}$ – теоретична подача гідромашини; $e_{1,2}$ – параметри регулювання гідромашин (для нерегульованої ГМ, як правило, $e=e_{max}$).

Кінематичні параметри роботи ГОП в складі ГОМТ описуються рівнянням нерозривності потоку робочої рідини. Для схеми з регульованою ГМ1, та нерегульованою ГМ2 відносний параметр регулювання ГОП $e=e_1$

$$-Q_{T1} + Q_{T2} = \Sigma \Delta Q, \quad -e \cdot q_1 \cdot \omega_{ГМ1} + q_2 \cdot \omega_{ГМ2} = \Sigma \Delta Q, \quad (3)$$

де Q_{T1}, Q_{T2} – теоретична витрата гідромашини; $\omega_{ГМ1}, \omega_{ГМ2}$ – кутові швидкості валів гідромашин; $\Sigma \Delta Q$ – сумарні об'ємні втрати в гідромашинах, що складаються з витоків, внутрішніх перетоків в гідромашинах і втрат на стиснення.

Циркуляційні режими в ГОМТ мають місце, коли виконується умова

$$\text{sign}(V \cdot e \cdot de / dV) < 0, \quad (4)$$

і відсутні за умови

$$\text{sign}(V \cdot e \cdot de / dV) > 0, \quad (5)$$

де V – швидкість трактора, км/год.

При русі трактора вперед $V > 0$, для руху заднім ходом приймають $V < 0$.

Вхід в ОЗ на висхідній та низхідній регулювальних характеристиках ГОМТ обумовлений зміною знаку крутного моменту на валу регульованої ГМ1, що в зворотному потоці потужності через ГОП працює як регульований гідромотор, а вихід з неї – зміною знаку кутової швидкості вала нерегульованої ГМ2 (рис. 2).

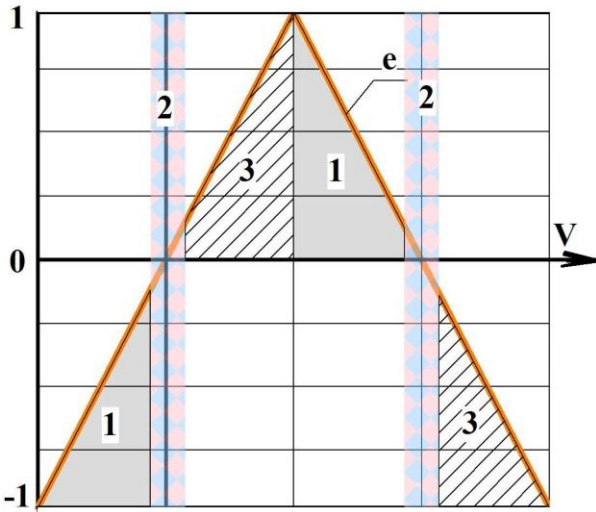


Рисунок 2 – Пілоподібна нереверсивна РХ ГОМТ: 1 – зворотний потік через ГОП; 2 – особлива зона; 3 – паралельні потоки потужності

Крутний момент на валу ГМ2 однозначно визначається моментом опору на вихідному валу ГОМТ. В точці $M_{T1} + \Delta M_1 = 0$ ГМ1 переходить в насосний режим роботи і, відповідно, для $M_{ГМ1}$ повинно виконуватись рівняння

$$\frac{M_{ГМ2} \cdot e}{M_{ГМ1}} = \frac{M_{T1}}{M_{T1} + \Delta M_1} \cdot \frac{M_{T2} - \Delta M_2}{M_{T2}}, \text{ тому } M_{ГМ1} = \frac{M_{ГМ2} \cdot (M_{T2} - \Delta M_2)}{(M_{T1} + \Delta M_1)}. \quad (9)$$

Таким чином крутний момент на валах гідромашин в зворотному та прямому потоці потужності, відповідно, буде дорівнювати:

$$M_{ГМ2} = \begin{cases} M_{T2} + \Delta M_2, & \text{якщо } \omega_{ГМ2} \geq 0 \\ M_{T2} - \Delta M_2, & \text{якщо } \omega_{ГМ2} < 0 \end{cases}, \quad M_{ГМ1} = \begin{cases} M_{T1} + \Delta M_1, & \text{якщо } M_{T1} + \Delta M_1 < 0 \\ \frac{M_{ГМ2} \cdot (M_{T2} - \Delta M_2)}{(M_{T1} + \Delta M_1)}, & \text{якщо } M_{T1} + \Delta M_1 \geq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Об'ємний ККД гідромашин та ГОП в цілому визначається з урахуванням потоку потужності на основі співвідношень:

$$Q_{T1} = q_1 \cdot |e| \cdot |\omega_{ГМ1}|, \quad Q_{T2} = q_1 \cdot |e| \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_1, \quad (11)$$

$$\eta_{o_ГМ1} = \begin{cases} \frac{Q_{T1}}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_2}, & \text{якщо } e < 0 \\ \frac{Q_{T1} - \Delta Q_1}{Q_{T1}}, & \text{якщо } e \geq 0 \end{cases}, \quad \eta_{o_ГМ2} = \begin{cases} \frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}| - \Delta Q_2}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|}, & \text{якщо } \omega_{ГМ2} > 0 \\ \frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|}{Q_{T1} - \Delta Q_1}, & \text{якщо } \omega_{ГМ2} < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

$$\eta_{o_ГОП} = \eta_{o_ГМ1} \cdot \eta_{o_ГМ2}. \quad (13)$$

Для теоретичних досліджень ОЗ механічні $\Delta M_{1,2}$ та об'ємні $\Delta Q_{1,2}$ втрати в ГОП визначаються за математичною моделлю Городецького К.І., яку використовують в своїх роботах Самородов В.Б., Таран І.А., Бондаренко А.І. та ін.

Системи рівнянь, що описують кінематичні та силові параметри ГОМТ (рис.1) з урахуванням особливої зони роботи ГОП, мають вид:

Наведена на рис. 1 ГОМТ однодіапазонна, проте цілком підходить для дослідження процесів в ОЗ.

Механічний ККД ГМ1,2 та ГОП визначається як:

$$\eta_{m_ГМ1} = \begin{cases} \frac{M_{T1} + \Delta M_1}{M_{T1}}, & \text{якщо } M_{T1} + \Delta M_1 < 0 \\ \frac{M_{T1}}{M_{T1} + \Delta M_1}, & \text{якщо } M_{T1} + \Delta M_1 \geq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\eta_{m_ГМ2} = \begin{cases} \frac{M_{T2}}{M_{T2} + \Delta M_2}, & \text{якщо } \omega_{ГМ2} \geq 0 \\ \frac{M_{T2} - \Delta M_2}{M_{T2}}, & \text{якщо } \omega_{ГМ2} < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\eta_{m_ГОП} = \eta_{m_ГМ1} \cdot \eta_{m_ГМ2}. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{дв} = \omega_1; \\ \omega_1 + i_1 \cdot \omega_2 = 0; \\ \omega_3 + i_2 \cdot \omega_4 = 0; \\ \omega_1 + i_3 \cdot \omega_5 = 0; \\ \omega_4 - k \cdot \omega_6 + (k-1) \cdot \omega_5 = 0; \\ -e_1 \cdot q_1 \cdot \omega_2 + q_2 \cdot \omega_3 = \\ = (\Delta Q_1 + \Delta Q_2) \cdot \Delta p; \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} M_{4B} \cdot \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{4B}\omega_4)} + M_{6A} \cdot \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{6A}\omega_{6A})} + M_{5B} = 0; \\ k \cdot M_{4B} \cdot \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{4B}\omega_4)} + M_{6A} \cdot \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{6A}\omega_{6A})} = 0; \\ M_{1B} \cdot \eta_3^{\Theta \text{sign}(M_{1B}\omega_1)} + i_3 \cdot M_{5A} = 0; M_{3B} \cdot \eta_2^{\Theta \text{sign}(M_{3B}\omega_3)} + i_2 \cdot M_{4A} = 0; \\ M_{1C} \cdot \eta_1^{\Theta \text{sign}(M_{1C}\omega_1)} + i_1 \cdot M_{2A} = 0; \\ M_{2B} = \begin{cases} \Delta p \cdot q_1 \cdot e + \Delta M_1, \text{ якщо } \Delta p \cdot q_1 \cdot e + \Delta M_1 < 0 \\ \frac{M_{3A} \cdot (\Delta p \cdot q_2 - \Delta M_2)}{(\Delta p \cdot q_1 \cdot e + \Delta M_1)} \end{cases} \\ M_{5A} + q_2 \cdot \Delta p = -\Delta M_2 \text{sign}(\omega_3); \\ M_{1A} + M_{1B} + M_{1C} = 0; M_{2A} + M_{2B} = 0; M_{3A} + M_{3B} = 0; \\ M_{4A} + M_{4B} = 0; M_{5A} + M_{5B} = 0; M_{6A} + M_{6B} = 0; M_{6B} = M_{ПНГ}, \end{array} \right. \quad (14)$$

де ω_i – кутова швидкість ланки; k – внутрішнє передавальне число триланкового планетарного механізму (ТПМ); i_j – передавальне відношення редукторів; Δp – перепад робочого тиску в ГОП; M_i – крутні моменти на вході та виході з редукторів; η_i – ККД редуктора; η_{13} , η_{23} – ККД в зубчастих зачепленнях сонце-сателіт і епіцикл-сателіт при зупиненому водилі, що визначають втрати моментів; Θ – коефіцієнт втрат в зубчастих зачепленнях ($\Theta=0$ – без урахування втрат, $\Theta=-1$ – з урахуванням втрат в зубчастих зачепленнях).

Для встановлення впливу величини навантаження на вихідному валу ГОМТ задано чотири значення моменту опору, кутову швидкість вхідного валу рівною $\omega_{дв}=148,6$ рад/с, діапазон зміни відносного параметра регулювання ГОП $e \in [-1; 1]$. Криві "1", "2", "3", "4" на графіках (рис. 3-4) відповідають навантаженню $M_{ПНГ}=20; 60; 100; 150$ Нм, що створюється порошковим навантажувальним гальмом (ПНГ) на вихідному валу ГОМТ.

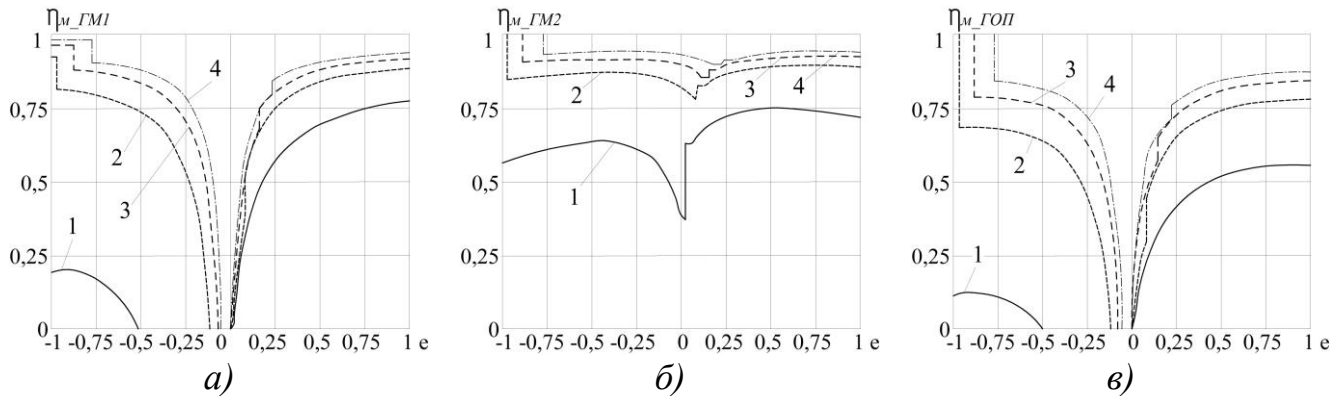


Рисунок 3 – Вплив величини навантаження ГОМТ на механічний ККД ГМ1 (а), ГМ2 (б) та ГОП (в)

Зміна знаку відносного параметра регулювання ГОП закінчує зону нульового механічного ККД ГМ1. Механічний ККД ГМ2 збільшується з ростом навантаження, а точка мінімуму $\eta_{м_ГМ2}$ відповідає $\omega_{ГМ2}=0$ та зміщується в сторону більших значень e .

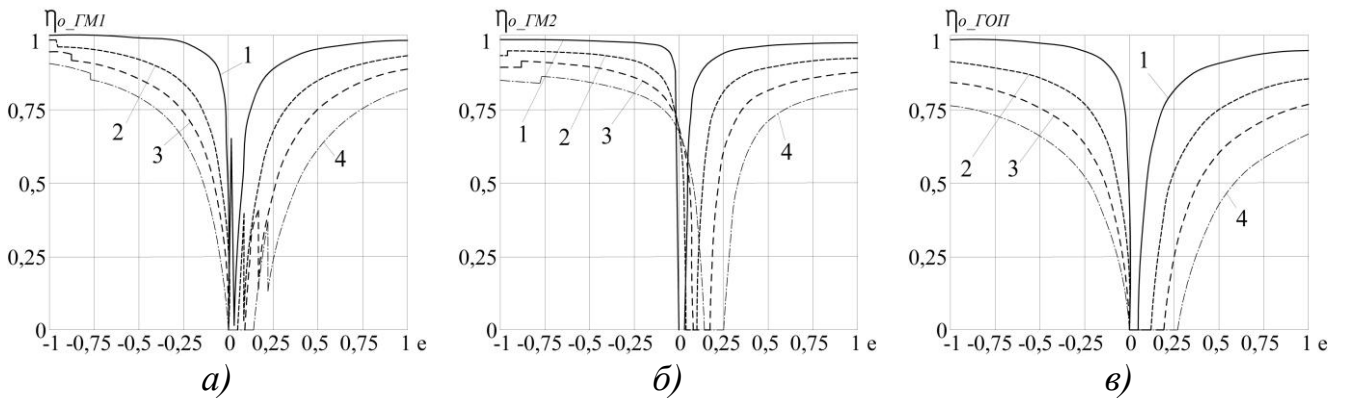


Рисунок 4 – Вплив величини навантаження ГОМТ на об'ємний ККД ГМ1 (а), ГМ2 (б) та ГОП (в)

Об'ємні втрати $\Delta Q_{1,2}$ в гідромашинах є функцією Δp і зростають по мірі збільшення $M_{ПНГ}$. Для навантаження $M_{ПНГ}=20$ Нм зона $\eta_{м_ГМ1}=0$ при $e \in [0; 0,03]$, а для $M_{ПНГ}=150$ Нм вже складає $e \in [0; 0,12]$ та має сталу тенденцію до розширення в бік більших значень параметра e . В зоні $\eta_{м_ГМ2}=0$ кутова швидкість валу ГМ2 $\omega_{ГМ2}=0$, $Q_{Г2} \leq \Delta Q_2$, що не дозволяє зрушити вал ГМ2.

Для ГОП ККД визначається, як добуток ККД окремих гідромашин:

$$\eta_{ГОП} = \eta_{м_ГМ1} \cdot \eta_{м_ГМ2} \cdot \eta_{о_ГМ1} \cdot \eta_{о_ГМ2} \cdot \quad (15)$$

На рис. 5 показано точки входу та виходу з ОЗ та процес її утворення для режиму навантаження $M_{ПНГ}=100$ Нм. На ділянці АВ ГОП працює в зворотному потоці потужності. В розгорнутому вигляді рівняння (15) має вид

$$\eta_{ГОП}^{AB} = \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \omega_{ГМ1}}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}| - \Delta Q_2} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}| - \Delta Q_2}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|} \right) \times \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \Delta p + \Delta M_1}{e \cdot q_1 \cdot \Delta p} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot \Delta p - \Delta M_2}{q_2 \cdot \Delta p} \right) \quad (16)$$

В точці В крутний момент на валу ГМ1 $M_{ГМ1}=0$ оскільки $|e \cdot q_1 \cdot \Delta p| = |\Delta M_1|$. Гідромашина ГМ1 починає працювати як регульований гідронасос в прямому потоці потужності, що враховується при розрахунку $\eta_{м_ГМ1}$. Фактично на ділянці ВС $\eta_{м_ГМ1} \rightarrow -\infty$ оскільки безкінечно мала величина параметру регулювання e стоїть у знаменнику. В точці С, яка відповідає $e=0$ $\eta_{м_ГМ1} = +\infty$. Для ділянки ВС $\eta_{ГОП}^{BC}$ розраховується:

$$\eta_{ГОП}^{BC} = \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \omega_{ГМ1}}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}| - \Delta Q_2} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}| - \Delta Q_2}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|} \right) \times \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \Delta p}{e \cdot q_1 \cdot \Delta p + \Delta M_1} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot \Delta p - \Delta M_2}{q_2 \cdot \Delta p} \right) \quad (17)$$

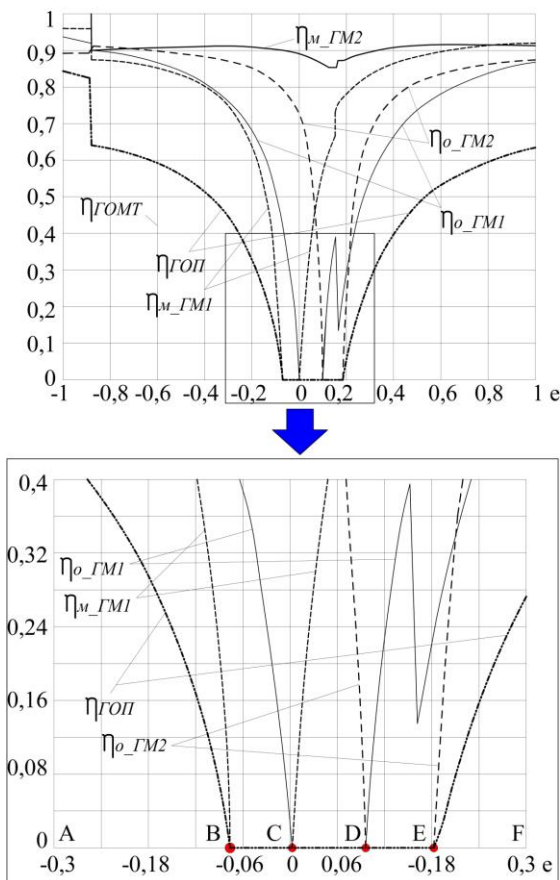


Рисунок 5 – Утворення особливої зони роботи ГОП в складі ГОМТ

$$\eta_{ГОП}^{BC} = 0 \text{ оскільки } \frac{e \cdot q_1 \cdot \Delta p + \Delta M_1}{e \cdot q_1 \cdot \Delta p} = \frac{e \cdot q_1 \cdot \Delta p + \Delta M_1}{e \cdot q_1 \cdot \Delta p} \rightarrow -\infty.$$

В точці C ($e=0$) ділянки CD $\eta_{о_ГМ1}=0$, а рівняння (15) приймає вид:

$$\eta_{ГОП}^{CD} = \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \omega_{ГМ1}}{q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_1} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}| - \Delta Q_2}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|} \right) \cdot \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \Delta p}{e \cdot q_1 \cdot \Delta p + \Delta M_1} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot \Delta p - \Delta M_2}{q_2 \cdot \Delta p} \right), \quad (18)$$

$$\eta_{ГОП}^{CD} = 0 \text{ оскільки } \frac{e \cdot q_1 \cdot \omega_{ГМ1}}{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}| - \Delta Q_2} \rightarrow -\infty.$$

На ділянці DE ГМ2 продовжує працювати в насосному режимі, адже знаки при $\omega_{ГМ2}$, $M_{ГМ2}$ не змінилися:

$$\eta_{ГОП}^{DE} = \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_1}{e \cdot q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}|} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|}{e \cdot q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_1} \right) \cdot \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \Delta p}{e \cdot q_1 \cdot \Delta p + \Delta M_1} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot \Delta p - \Delta M_2}{q_2 \cdot \Delta p} \right). \quad (19)$$

$$\eta_{ГОП}^{DE} = 0 \text{ оскільки } \frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|}{e \cdot q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_1} \rightarrow -\infty.$$

В точці E кутова швидкість валу ГМ2 $\omega_{ГМ2}$ змінює свій знак на протилежний, змінюється знак при потужності $N_{ГМ2}$, ГМ2 переходить в моторний режим. ГОП починає працювати в прямому потоці потужності. Формули (15) для участку EF приймає вид

$$\eta_{ГОП}^{EF} = \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_1}{e \cdot q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}|} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot |\omega_{ГМ2}|}{e \cdot q_1 \cdot |\omega_{ГМ1}| - \Delta Q_1} \right) \cdot \left(\frac{e \cdot q_1 \cdot \Delta p}{e \cdot q_1 \cdot \Delta p + \Delta M_1} \right) \cdot \left(\frac{q_2 \cdot \Delta p}{q_2 \cdot \Delta p + \Delta M_2} \right). \quad (20)$$

Вибором навантаження на вихідному валу можна досягти розширення, звуження та зміщення ОЗ в сторону більших значень параметра e (для висхідної РХ) чи менших значень e (для низхідної РХ). ККД ГОМТ збільшується по мірі зростання навантаження до $\eta_{ГОМТ}^{\max} = 0,84$, а надалі зменшується під впливом $\eta_{о_ГОП}$ (рис. 6). За результатами математичного моделювання були виявлені наступні особливості: максимальний ККД ГОМТ досягається в ОЗ на відрізку $\eta_{о_ГМ2}=0$ (рис. 7); сумарна потужність втрат $\Sigma N_{втр}$ в ГОП мінімальна в зоні $\eta_{о_ГМ2}=0$ для всіх навантажувальних режимів (рис. 8); в ОЗ спостерігається стрибкоподібна зміна перепаду робочого тиску Δp в ГОП (рис. 9).

Сплеск тиску при зміні напрямку обертання ГМ2 визначає закінчення ОЗ як для висхідної так і для низхідної РХ. Даний процес обумовлений зміною знаку потужності в зубчастих зачепленнях ТМП та редукторів, що розміщені між ТПМ та ГМ2. Величина сплеску χ (МПа) визначалась як різниця робочого тиску Δp при $\omega_{ГМ2}=0,1$ рад/с та $\omega_{ГМ2}=-0,1$ рад/с. Для розглянутих навантажувальних режимів $\chi = 2,59; 3,49; 4,27; 5,28$ МПа.

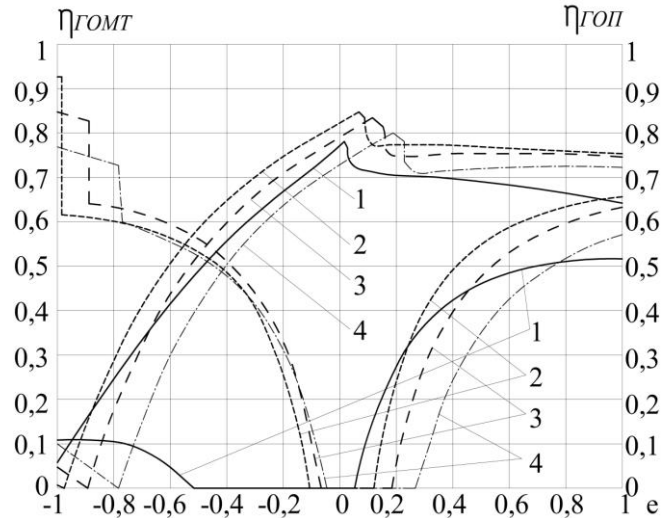


Рисунок 6 – Вплив величини навантаження вихідного валу ГОМТ на загальний ККД трансмісії та ширину ОЗ

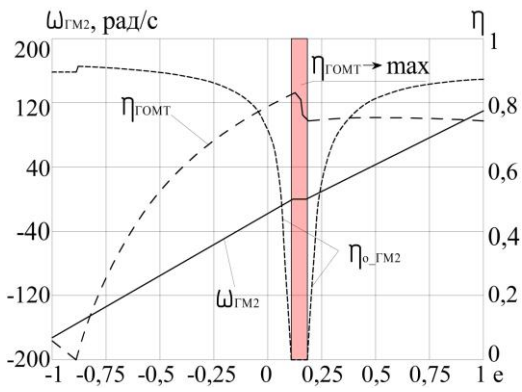


Рисунок 7 – Визначення зон найвищого ККД ГОМТ

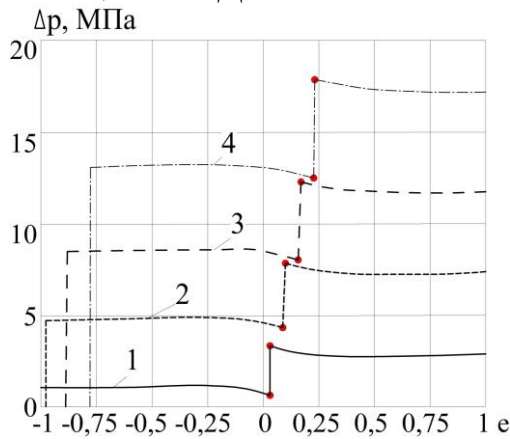


Рисунок 9 – Явище сплеску тиску в ГОП при виході з ОЗ

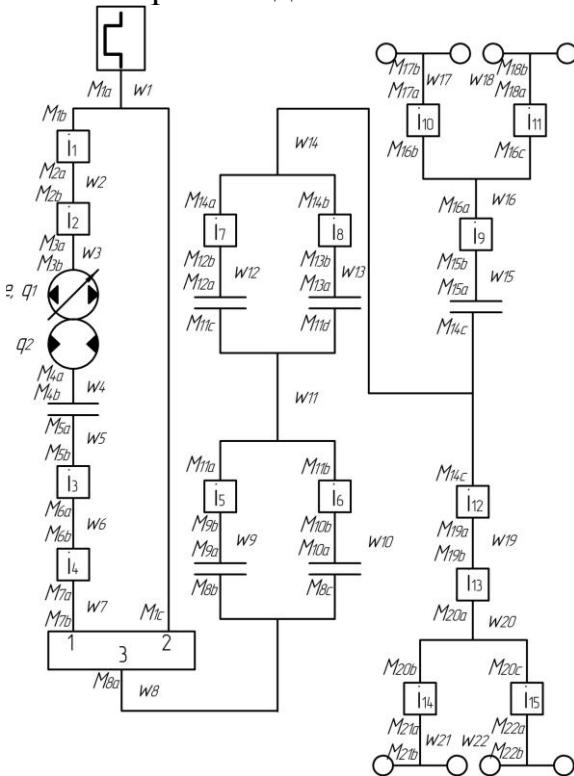


Рисунок 10 – Структурна схема ГОМТ-1С колісного трактору ХТЗ-21021

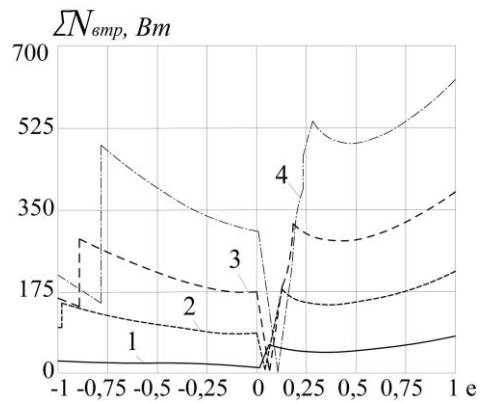


Рисунок 8 – Сумарна потужність втрат в ГОП

Зважаючи на сталу тенденцію до зростання χ для квазістатичної моделі, дане явище доцільно змоделювати в динаміці. Задача дослідження полягає в виявленні критичних інтенсивностей розгону, в яких буде привичено допустимий перепад робочого тиску $[\Delta p]$ при проходженні ОЗ. Особливого інтересу набуває проходження ОЗ одиночним трактором з ГОМТ, коли немає обмежень щодо тривалості закону керування ГОП. На прикладі колісного трактора ХТЗ-21021 з першою вітчизняною ГОМТ-1С (рис. 10) з диференціалом "на виході" проведено дослідження явища сплеску тиску в ОЗ з урахуванням взаємодії коліс з опорною поверхнею та зовнішньої характеристики дизельного ДВЗ. Результати досліджень (табл. 1) показали, що для трактора ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С в процесі розгону, небажаний сплеск χ робочого тиску при виході з ОЗ спостерігається на III (12,24 МПа) та IV (23,38 МПа) діапазонах при розгоні за 5 сек. до 24 – 40 км/год. Практично такий розгін не може бути реалізований, а отже робота ГОМТ в ОЗ не несе небезпеки для елементів її конструкції і зокрема гідросистеми.

Таблиця 1 – Результати математичного моделювання стрибку χ робочого тиску в ГОП при виході з ОЗ

№ діапазону	Час розгону, сек		
	5	20	50
I діапазон	5,29 МПа	4,60 МПа	4,40 МПа
II діапазон	7,42 МПа	5,03 МПа	4,45 МПа
III діапазон	12,24 МПа	6,26 МПа	4,49 МПа
IV діапазон	23,38 МПа	9,21 МПа	4,81 МПа

Результати досліджень показали, що ОЗ роботи ГОП в складі ГОМТ з диференціалом "на виході" мають наступні переваги:

1. В зоні $\eta_{o_ГМ2}=0$ знаходяться точки максимального ККД ГОМТ.
2. Завдяки мінімуму сумарної потужності втрат в ГОП $\Sigma N_{втр}$ тепловіддача в робочу рідину мінімальна, а отже в ОЗ трактор здатний працювати за високої температури навколишнього середовища без перегріву гідросистеми.
3. Ширина ОЗ не є постійною величиною і може корегуватись за рахунок величини навантаження вихідного валу трансмісії.

До недоліків ОЗ відносяться їх незначна ширина, а для тракторів з гідromeханічним керуванням ГОП утримання режиму з $\omega_{ГМ2} \approx 0$ рад/с вимагає додаткової уваги механіка-водія. Тому в повній мірі переваги ОЗ можуть бути реалізовані в ГОМТ з електропропорційним керуванням ГОП зі зворотнім зв'язком.

Розміщення ОЗ в інтервалі рекомендованих швидкостей основних енергоємних сільськогосподарських операцій дозволить підвищити технічний рівень і ефективність тракторів з ГОМТ. Зважаючи на це на етапі обґрунтування кінематичної схеми мають бути враховані наступні основні вимоги:

1. ОЗ на тягових діапазонах необхідно розміщати в інтервалі рекомендованих агротехнічних швидкостей для тракторів даного класу з урахуванням максимально допустимого буксування δ .
2. Максимальна експлуатаційна потужність ДВЗ N повинна розвиватись, не в кінці РХ, як це було прийнято досі, а в ОЗ.
3. Схемне рішення повинно забезпечувати достатньо високий ККД ГОМТ при роботі поза межами ОЗ.

У відповідності з вказаними вимогами запропонована кінематична схема трьохдіапазонної ГОМТ-СМ з диференціалом "на виході" (рис. 11). Трансмісія має пиліподібну реверсивну на першому піддіапазоні кожного діапазону РХ, що зручно при розворотах трактора в кінці гону. Переваги схемного рішення ГОМТ-СМ перед ГОМТ-1С визначено за допомогою оптимізаційного алгоритму, що встановлює взаємозв'язки між буксуванням колісного трактора δ , ефективним крюковим навантаженням $F_{КР}$, теоретичною V_T і дійсною V швидкостями руху трактора, перепадом робочого тиску в ГОП Δp , об'ємними втратами ΔQ , загальними втратами $\Delta N_{ГОП}$ в ГОП, ефективним крюковим ККД $\eta_{КР}$, загальним ККД ГОП $\eta_{ГОП}$ і ГОМТ $\eta_{ГОМТ}$, продуктивністю S , питомою q і погектарною Q витратами палива.

Безрозмірний квадратичний функціонал $\Phi(e, \delta, B)$, як функція трьох основних параметрів e, δ, B в розгорнутому вигляді має вид:

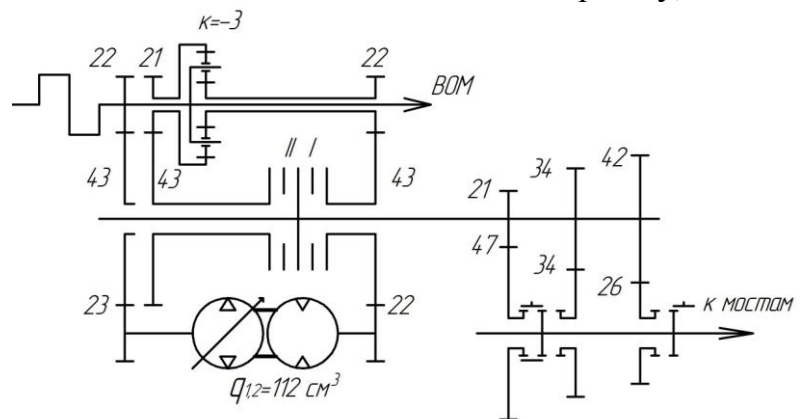


Рисунок 11 – Кінематична схема ГОМТ-СМ

$$\Phi(e, \delta, B) = \left(1 - \frac{m \cdot g \cdot f^* \cdot V(B, e) + \left[f_{\text{пл}} \cdot G_{\text{пл}} + B \cdot h \cdot k \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon \cdot V(B, e)^2}{k} \right) \right] \cdot V(B, e)}{((M_{\text{дв}} \cdot \omega_{\text{дв}} - \Delta N_{\text{ГОП}}(B, e) - \Delta N_{\text{ГОП}}(B, e)) \cdot (1 - \delta(B, e)))} \right)^2 + \left(1 - \frac{m \cdot g \cdot (\alpha - \beta \cdot e^{-\lambda \delta})}{f_{\text{пл}} \cdot G_{\text{пл}} + B \cdot h \cdot k \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon \cdot V(B, e)^2}{k} \right)} \right)^2 + \left(1 - \frac{N}{M_{\text{дв}} \cdot \omega_{\text{дв}}} \right)^2, \quad (21)$$

де m – маса трактора; g – прискорення вільного падіння; f^* – коефіцієнт опору кочення; $f_{\text{пл}}$ – коефіцієнт, що характеризує втрати на переміщення плуга; $G_{\text{пл}}$ – вага плуга; B – ширина захвату плуга; h – глибина оранки; $\Delta N_{\text{ГОП}}$ – сумарна потужність втрат в ГОП; k, ε – коефіцієнти, що характеризують опір пласта деформуванню (питомий опір ґрунту, форму робочої поверхні корпусу плуга та фізико-механічні властивості ґрунту); α, β, λ – емпірично визначені коефіцієнти для колісних тракторів ХТЗ серії 210; N – номінальна потужність двигуна; $M_{\text{дв}}, \omega_{\text{дв}}$ – поточний крутний момент та кутова швидкість колінчастого вала.

Задачу умовної оптимізації $\Phi(e, \delta, B) \rightarrow \min$ вирішено при обмеженнях: $e \in [-1; 1], \delta \in [0; 0,35], B \in [0; 2,6]$.

На рис. 12 наведено квазістатичну РХ першого тягового діапазону ГОМТ-СМ без врахування буксування. Порівняння результатів розрахунку техніко-економічних показників тракторів з ГОМТ-1С та ГОМТ-СМ у складі трактора ХТЗ-21021 в агрегаті з плугом проведено при однакових вихідних даних.

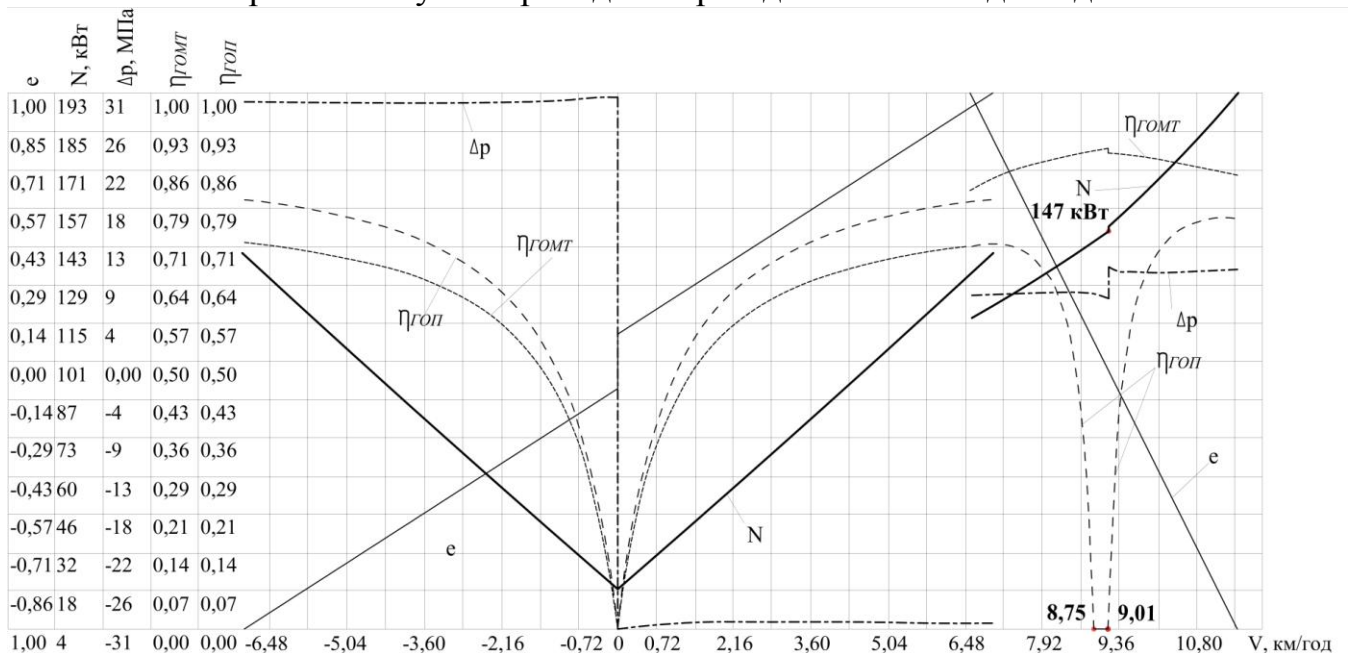


Рисунок 12 – Регульовальна характеристика першого тягового діапазону ГОМТ-СМ колісного трактору ХТЗ-21021

Особливі зони мають досить обмежену довжину по V , тому для ГОМТ-СМ з плугом $B=2$ м максимальна потужність розвивається вже після виходу з ОЗ, трансмісія недовантажена (табл. 2). Робота в ОЗ з $\eta_{\text{ГОП}}=0$ досягається при $B=2,4$ м з буксуванням $\delta=13-14\%$. В даному режимі точка мінімальної погектарної витра-

ти палива $Q_{ГА}=17,20 - 17,34$ кг/га, проте дійсна швидкість $V=7,70 - 7,72$ км/год перевищує рекомендовану швидкість оранки для колісних тракторів ХТЗ.

Таблиця 2 – Результати дослідження техніко-економічних показників МТА з ГОМТ-1С та ГОМТ-СМ

Параметр	Буксування $\delta, \%$							
	ГОМТ-1С		ГОМТ-СМ					
	15 %	16 %	9 %	10 %	13 %	14 %	15 %	16 %
e	0,39		-0,11		-0,03		-0,08	
$B, \text{м}$	2,4		2,0		2,4		2,6	
$\eta_{ГОП}$	0,539	0,540	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
$\eta_{ГОМТ}$	0,799	0,799	0,887	0,887	0,895	0,895	0,891	0,891
$\Delta p, \text{МПа}$	24,49	24,41	6,37	6,38	7,88	7,85	8,55	8,52
$N, \text{кВт}$	148,0	147,5	146,9	147,8	147,1	146,6	147,5	147,0
$\Delta N_{ГОП}, \text{Вт}$	21,3	21,2	4,6	4,6	3,9	3,9	4,8	4,8
$V_T, \text{км/год}$	8,44	8,44	9,15	9,23	8,86	8,98	8,58	8,38
$V, \text{км/год}$	7,17	7,09	8,23	8,21	7,70	7,72	7,30	7,21
$F_{кр}, \text{Н}$	42202	42366	36781	36934	43530	43701	45986	46172
$S, \text{га/год}$	1,72	1,70	1,64	1,64	1,84	1,85	1,89	1,87
$\eta_{кр}$	0,539	0,534	0,525	0,519	0,592	0,588	0,594	0,589
q	125,45	123,84	142,244	140,535	142,348	140,619	139,164	137,441
$Q_{ГА}, \text{кг/га}$	18,92	19,07	17,67	17,81	17,20	17,34	17,35	17,42
Φ	0,0012	0,0005	0,0015	0,0002	0,0017	0,0005	0,0005	0,0014

Визначено, що збільшення коефіцієнту f опору руху МТА за рахунок плуга з $B=2,6$ м призводить до розширення ОЗ. Мінімум функціоналу Φ лежить в точці РХ з $e=-0,08$, трансмісія працює з високим ККД та низькими втратами в ГОП, а швидкість $V=7,30 - 7,21$ км/год відповідає рекомендованим межам.

Таким чином при однакових вихідних даних продуктивність трактора S з ГОМТ-СМ за рахунок експлуатації в ОЗ з максимальною потужністю ДВЗ зростає на 9,1 %, погектарна витрата палива $Q_{ГА}$ зменшилась на 11,3 % (на 1,62 кг/га) за рахунок $\eta_{ГОМТ}$ більшого на 9,2 %, що доводить правильність запропонованого підходу.

У третьому розділі подано детальний опис конструкції лабораторних стендів ГОП кафедри автомобіле- і тракторобудування та АТ "ХТЗ", вимірювального комплексу, крокового електроприводу керування ГОП, методу обробки отриманих сигналів. Проведено порівняння результатів експериментального дослідження механічних та об'ємних втрат для ГОП в моноблочному виконанні ($q_{ГМ1,2}=33,28$ см³/об) та ГОП з роздільними гідромашинами ($q_{ГМ1,2}=112$ см³/об) з теоретичними даними, отриманими за математичною моделлю Городецького К.І. та Polymod. Визначено, що модель Городецького К.І. має розбіжність до 5% на всіх режимах навантаження в діапазоні 41,58 – 247,14 Нм. Для моделі Polymod виявлена розбіжність вище 11,3% в районі нульових значень параметра регулювання ГОП, що не дозволяє її використовувати для аналізу ОЗ, проте існує тенденція до збільшення точності (розбіжність до 7,3 %) з ростом об'єму гідромашин $q_{ГМ1,2}$, рівня навантаження вихідного валу $M_{ПНГ}$ та абсолютного значення параметра регулювання e .

Четвертий розділ присвячено експериментальній перевірці уточненої математичної моделі ОЗ на лабораторному стенді ГОМТ (рис. 13-14), виявленню ОЗ для ГОМТ-1С та дослідженню впливу конструктивних параметрів на ширину ОЗ і максимальний ККД ГОМТ колісного трактора ХТЗ-21021.

Для коректного порівняння результатів вимірювань з теоретичними, в математичну модель вводились реальні криві $M_{ПНГ}(t)$, $\omega_{об}(t)$ та $e(t)$.

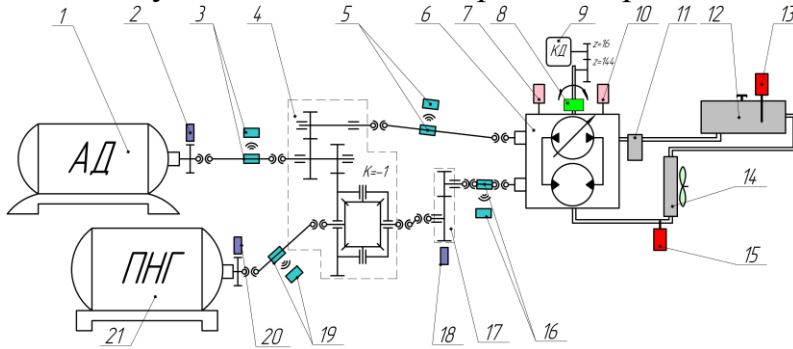


Рисунок 13 – Лабораторний стенд ГОМТ:

1 – асинхронний електродвигун; 2, 18, 20 – датчики частоти обертання; 3, 5, 16, 19 – датчики крутного моменту; 4 – блок редукторів з ТПМ; 6 – ГОП; 7, 10 – датчики надлишкового тиску; 8 – датчик положення важеля курування ГОП (абсолютний енкодер); 9 – кроковий електродвигун; 11 – фільтр тонкої очистки; 12 – бак; 13, 15 – датчики температури; 14 – теплообмінник з вентилятором; 17 – узгоджувальний редуктор; 21 – порошкове навантажувальне гальмо



Рисунок 14 – Зовнішній вид стенду ГОМТ

Встановлено, що для чотирьох навантажувальних режимів, максимальна розбіжність результатів не перевищує 4,76 %, що дорівнює похибці контрольно-вимірювальних приладів. Характер поведінки складових ККД ГОП повністю відтворює теоретичні. Початок ОЗ визначає точка $M_{ГМ1}=0$ Нм, закінчення – точка зрушення валу ГМ2 (знак при $\omega_{ГМ2}$) в якій спостерігається сплеск Δp . Максимальне значення ККД ГОМТ досягається в ОЗ при $\omega_{ГМ2}=0$ рад/с. На рис. 15 в якості прикладу наведені графіки ККД для режиму навантаження $M_{ПНГ}=58$ Нм. Результати, отримані за математичною моделлю – крива "1", експериментальні – крива "2". Компоновка вузлів трактора не дозволяє розмістити на валах гідромашин датчики крутного моменту – головні датчики для ідентифікації початку ОЗ. Тому для одиночного трактору ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С ОЗ ідентифіковано за величинами $\omega_{ГМ1,2}$, e , Δp та

моделлю втрат Городецького К.І. Для I діапазону реалізовано лінійну зміну параметра регулювання $e \in [-1; 1]$ тривалістю $t \in [0; 5]$ с, $t \in [0; 20]$ с та $t \in [0; 50]$ с, для II–IV діапазонів – тривалістю $t \in [0; 20]$ с та $t \in [0; 50]$ с. Встановлено, що інтенсивність розгону несуттєво впливає на ширину ОЗ, звужуючи її максимально на 6,25 % для I діапазону. Для II–IV діапазонів при незначному зміщенні ОЗ спостерігається приріст по компонентам ККД не більше 3,17 %. На кінематичні та силові параметри ГОМТ та ширину ОЗ впливає робочий об'єм ГМ2, як гідромашини, що визначає Δp в системі, та кутова швидкість колінчастого вала ДВЗ.

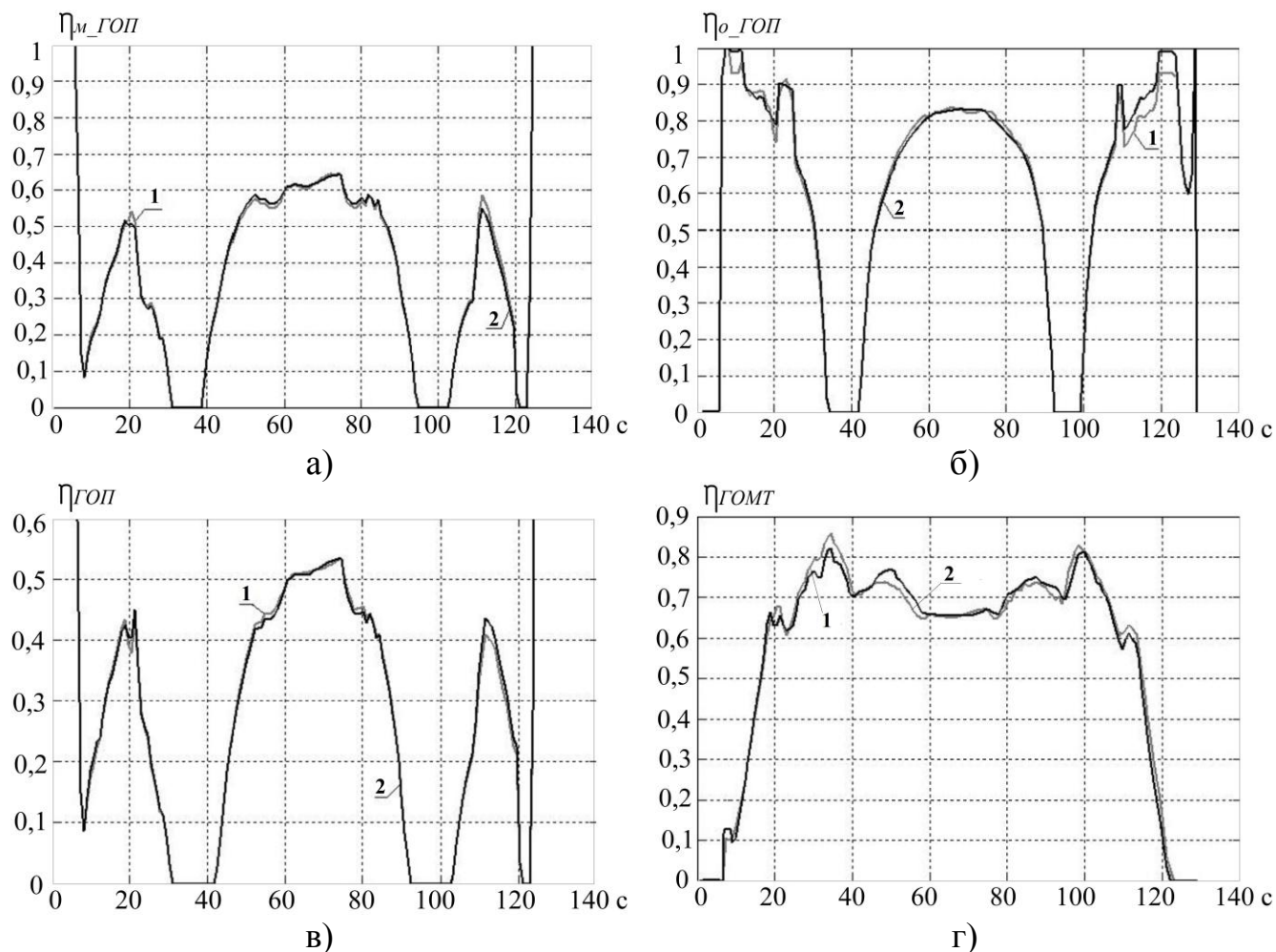


Рисунок 15 – Теоретично (1) та експериментально (2) визначений ККД: механічний (а), об'ємний (б), ГОП (в), ГОМТ (г)

Результати математичного моделювання особливих зон показали, що для схеми ГОМТ-1С заміна ГМ2 з $q_{ГМ2}=112 \text{ см}^3/\text{об}$ на $q_{ГМ2}=90 \text{ см}^3/\text{об}$ призведе до збільшення $\eta_{м_ГОП}$ в середньому на 4,46 % для всіх діапазонів, зниження $\eta_{о_ГОП}$ на 14,65 %, $\eta_{ГОП}$ – на 11,46 % та $\eta_{ГОМТ}$ – на 16,54%. Заміна ГМ2 на гідромашину робочим об'ємом $q_{ГМ2}=125 \text{ см}^3/\text{об}$ навпаки призведе до зниження $\eta_{м_ГОП}$ в середньому на 2,51 % для всіх діапазонів, збільшення $\eta_{о_ГОП}$ на 5,15 %, $\eta_{ГОП}$ – на 3,45 % та $\eta_{ГОМТ}$ – на 7,25 %. Сама ОЗ має сталу тенденцію до звуження з ростом $q_{ГМ2}$, а отже застосування гідромашин більшого об'єму доцільно з позиції підвищення ККД ГОМТ, проте супроводжуватиметься здорожчанням трансмісії.

Зниження кутової швидкості колінчастого вала ДВЗ трактору ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С від 2200 до 1500 об/хв призводить до падіння загального ККД ГОМТ $\eta_{ГОМТ}$ на 2,85%; 4,01%; 6,04% та 7,46% для I, II, III та IV діапазонів відповідно.

Всі експериментальні дослідження проведено відповідно до вимог нормативних документів. Дані отримані на лабораторному стенді ГОМТ підтвердили достовірність запропонованої математичної моделі ОЗ на різних режимах навантаження вихідного вала. Для колісного трактора ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С особлива зона визначена опосередковано за моделлю втрат К.І. Городецького, висока достовірність якої була підтверджена на етапі експериментальних досліджень ГОП.

ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційної роботи здійснено теоретичне узагальнення та вирішення науково-практичної задачі – підвищення техніко-економічних показників МТА з двопотоковими ГОМТ з диференціалом "на виході за рахунок розміщення рекомендованих агротехнічних швидкостей енергоємних сільськогосподарських операцій в особливих зонах, що виявляється в таких основних наукових результатах:

1. В процесі аналізу підходів до визначення розподілення потоків потужності в замкнутому контурі ГОМТ встановлено, що суттєвим чинником, який впливає на техніко-економічні показники колісних тракторів з двопотоковими ГОМТ, є характер утворення особливих зон при роботі ГОП. Перспективним є дослідження можливості розміщення особливої зони в межах швидкостей основних агротехнічних операцій, оскільки при цьому ККД трансмісії максимальний.

2. Встановлені кількісні та якісні закономірності зміни об'ємних, механічних та загальних втрат в ГОП на різних режимах навантаження вихідного валу ГОМТ, що дає можливість досягнення максимальних значень ККД трансмісії за рахунок вибору раціонального режиму навантаження.

3. Сформульовано рекомендації щодо перспективних ГОМТ з диференціалом "на виході" та запропоновано схемне рішення ГОМТ-СМ, що дозволило підвищити продуктивність трактора на 9,1 %, ККД трансмісії – на 8,9% та знизити погектарну витрату палива на 11,3 % при оранці колісним трактором ХТЗ-21021 порівняно з ГОМТ-1С.

4. В процесі експериментальних досліджень об'ємних та механічних втрат в ГОП встановлено, що максимальна розбіжність моделі К.І. Городецького з експериментальними результатами, як для ГОП в моноблочному виконанні так і для ГОП з рознесеними гідромашинами, не перевищує 5 % на всіх режимах навантаження і може використовуватись для дослідження ОЗ.

5. В процесі перевірки достовірності математичної моделі ОЗ на стенді ГОМТ встановлено, що розбіжність між теоретичними та експериментальними результатами при різних навантажувальних режимах, тривалості зміни відносного параметра регулювання ГОП не перевищує 4,3 %, що дає можливість використовувати модель ОЗ на стадії обґрунтування нових ГОМТ.

6. Експериментальним шляхом доведені наступні розроблені теоретичні рекомендації при проектуванні перспективних ГОМТ: максимальний ККД ГОМТ в ОЗ досягається на ділянці, де об'ємний ККД ГМ2 дорівнює нулю; при збільшенні навантаження на вихідному валу ОЗ має тенденцію до розширення в область більших значень відносного параметра регулювання ГОП. Негативних факторів для гідросистеми при роботі ГОМТ в ОЗ в процесі стендових та натурних досліджень на колісному тракторі ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С виявлено не було. Все це дає підстави рекомендувати розміщення агротехнічних швидкостей основних сільськогосподарських операцій в ОЗ задля досягнення найвищої продуктивності МТА.

7. Розроблені рекомендації щодо проектування перспективних ГОМТ прийняті до використання в розрахунковій практиці АТ "ХТЗ" та в навчальний процес кафедри автомобіле- і тракторобудування НТУ "ХП".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мітцель М.О. Розвиток трансмісійного матричного аналізу в області автомобілебудування / В.Б. Самородов, М.О. Мітцель // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – №19. – С. 42 – 46. *Здобувачем складені базисні матриці синхронних трифазних електродвигунів зі збудженням від постійних магнітів.*
2. Мітцель М.О. Обґрунтування доцільності застосування теорії графів в структурному синтезі ГОМТ / В.Б. Самородов, М.О. Мітцель // Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків: ХНУСГ, 2013. – №135. – С. 151 – 157. *Здобувачем запропоновано спосіб кодування функціональних елементів для вирішення задачі автоматизованого синтезу структурних схем ГОМТ.*
3. Мітцель М.О. Исследование свойств шагового электропривода как системы управления двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссией / В. Б. Самородов, Н. А. Митцель // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 5/7 (70). – С. 52 – 58. *Здобувачем розроблено кроковий електропривод керування ГОП та програмний продукт до нього.*
4. Митцель Н.А. Датчик крутящего момента / Н.А. Митцель // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – №48 (1090). – С. 3 – 9.
5. Мітцель М.О. 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 виконано узагальнення кінематичних схем ГОМТ та визначені напрямки розвитку ГОМТ колісних тракторів сільськогосподарського призначення.*
6. Мітцель М.О. Дослідження явища неодноразової зміни роботи об'ємних гідромашин / М.О. Мітцель // Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ. – 2015. – № 32. – С. 119 – 125.
7. Митцель Н.А. Обоснование применения гидрообъемно-механических трансмиссий на колесных тракторах путем экспериментального определения основных эксплуатационных характеристик гидрообъемной передачи / В.Б. Самородов, О.И. Деркач, С.А. Шуба, В.М. Шевцов, Н.А. Митцель // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – №9 (1118). – С. 3 – 8. *Здобувачем проаналізовано результати експериментального дослідження показників ГОП на різних швидкісних та навантажувальних режимах.*
8. Митцель Н.А. Прибор для измерения крутящего момента на валах автомобилей и тракторов / В.Б. Самородов, А.И. Бондаренко, Н.А. Митцель // Автомобильная промышленность. – М.:2014. – № 12. – С. 31 – 33. *Здобувачем виготовлені комплекти тензометричних датчиків крутного моменту та розроблено програмний продукт для мікроконтролера.*
9. Mittsel N.A. Experimental Appropriateness Verification of K. Gorodetsky's Mathematical Model for Losses Determination in Hydrostatic Transmissions for

Modern Hydraulic Machines / V.B. Samorodov, S.A. Shuba, O.I. Derkach, V.M. Shevtzov, N.A. Mittsel // Eastern European Scientific Journal: Düsseldorf (Germany): Auris Verlag. – 2014. – № 6. – P. 285 – 291. *Здобувачем отримано результати експериментального дослідження показників роботи ГОП на різних експлуатаційних режимах.*

10. Мітцель М.О. Експериментальне дослідження особливості зони роботи двохпоточної гідрооб'ємно-механічної трансмісії / М.О. Мітцель // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Інноваційні засади сталого розвитку національного господарства", 21 – 22 листопада 2014 р., м. Кам'янець-Подільський / Міністерство аграрної політики та продовольства України, Подільський державний аграрно-технічний університет. – Кам'янець-Подільський: Подільський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С. 185 – 188.

11. Bondarenko 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 проаналізовано процес утворення особливої зони роботи ГОП за експериментальними даними.*

12. Мітцель М.О. Спосіб підвищення техніко-економічних показників трактора оснащеного гідрооб'ємно-механічною трансмісією за рахунок вибору оптимальних режимів роботи / М.О. Мітцель // Матеріали V всеукраїнської науково-практичної конференції "Інноваційні технології в АПК", травень 2015 р., Луцький НТУ. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – С. 77 – 79.

13. Митцель Н.А. Экспериментальное исследование гидрообъемно-механической трансмиссии / В.Б. Самородов, М.Б. Бурлыга, Н.А. Митцель // Материалы X Международной научно-практической конференции "Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия", 17–18 апреля 2015, Новосибирск, Россия / Международный научный институт "Educatio". – Новосибирск: Международный научный институт "Educatio", 2015. – III (10). – С. 6 – 10. *Здобувачем проаналізовано експериментальні дані отримані на лабораторному стенді ГОМТ.*

14. Митцель Н.А. Исследование работы гидравлических машин в составе гидрообъемно-механической трансмиссии в нулевых режимах // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции "Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования", 27 – 28 апреля 2015 г., Воронеж / ФГБОУВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова». – Воронеж: «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», 2015. – № 2(1). – С. 121 – 125.

АНОТАЦІЇ

Мітцель М.О. Вплив особливих зон роботи гідропередачі на техніко-економічні показники колісних тракторів з безступінчастими гідрооб'ємно-механічними трансмісіями. – 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 оснащених гідрооб'ємно-механічними трансмісіями з диференціалом "на виході" за рахунок розміщення агротехнічних швидкостей в особливих зонах роботи гідрооб'ємної передачі.

Складена комплексна математична модель особливих зон роботи гідрооб'ємної передачі, що дозволяє досліджувати робочі процеси в межах особливої зони. Розглянуто процес утворення особливої зони на висхідній та низхідній регульовальній характеристиці гідрооб'ємно-механічної трансмісії. Встановлено вплив режимів навантаження та конструктивних параметрів трансмісії на ширину особливої зони та загальний ККД трансмісії. Визначено вплив часу розгону колісного трактору на величину сплеску робочого тиску при виході з особливої зони. Сформульовано рекомендації до проектування перспективних схем трансмісій з диференціалом "на виході", що дозволять досягати максимального ККД трансмісії в межах швидкостей основних енергоємних сільськогосподарських операцій. Експериментальними дослідженнями визначено точність математичної моделі втрат в гідрооб'ємній передачі К.І. Городецького. Експериментально досліджено достовірність математичної моделі особливих зон на лабораторному стенді та колісному тракторі, та підтверджено рекомендації щодо перспективних схем гідрооб'ємно-механічних трансмісій з диференціалом "на виході".

Ключові слова: колісний трактор, гідрооб'ємно-механічна трансмісія, гідрооб'ємна передача, техніко-економічні показники, машинно-тракторний агрегат, експериментальні дослідження.

Митцель Н.А. Влияние особых зон работы гидропередачи на технико-экономические показатели тракторов с бесступенчатыми гидрообъемно-механическими трансмиссиями. – 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 оснащенных гидрообъемно-механическими трансмиссиями с дифференциалом "на выходе" за счет размещения агротехнических скоростей в особых зонах работы гидрообъемной передачи.

В работе проанализированы подходы к определению потоков мощности в замкнутом контуре гидрообъемно-механической трансмиссии с дифференциалом "на выходе". Обоснована целесообразность выделения особой зоны работы гидрообъемной передачи в отдельный режим и всестороннего его изучения.

Разработана математическая модель особых зон работы гидрообъемной передачи, которая позволяет исследовать рабочие процессы внутри особой зоны для определения режимов максимального КПД трансмиссии. Рассмотрен процесс образования особой зоны на восходящей и нисходящей регулировочной характеристике гидрообъемно-механической трансмиссии, определены причины входа и

выхода из нее. Установлено влияние величины нагрузки выходного вала трансмиссии на ширину особой зоны и общий КПД трансмиссии. Рассмотрены преимущества и недостатки особых зон работы гидropередачи и их влияние на эксплуатационные характеристики колесного трактора.

На примере колесного трактора ХТЗ-21021 с первой отечественной ГОМТ-1С проведено исследование явления всплеска рабочего давления в гидрообъемной передаче при выходе из особой зоны с учетом взаимодействия колес с опорной поверхностью и внешней скоростной характеристики дизельного двигателя. Определено влияние времени разгона колесного трактора на величину всплеска рабочего давления. Сформулированы рекомендации для проектирования перспективных схем гидрообъемно-механических трансмиссий с дифференциалом "на выходе" и на их основании предложено альтернативное схемное решение, которое позволило повысить технико-экономические показатели трактора при выполнении технологической операции "пахота".

Теоретически исследовано влияние рабочего объема гидромотора и угловой скорости коленчатого вала двигателя на ширину особой зоны и КПД трансмиссии.

Для проведения экспериментальных исследований разработан лабораторный стенд гидрообъемной передачи и гидрообъемно-механической трансмиссии с дифференциалом "на выходе", а также контрольно-измерительный комплекс с использованием как серийных, так и специально разработанных датчиков.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что математическая модель объемных и механических потерь К.И. Городецкого имеет удовлетворительное расхождение на всех нагрузочных режимах и может использоваться для теоретического исследования особых зон работы гидрообъемной передачи в составе гидрообъемно-механической трансмиссии.

Экспериментально подтверждена достоверность предложенной математической модели особых зон, определены точки входа и выхода из особой зоны, получены зависимости механического, объемного и полного КПД гидрообъемной передачи на различных нагрузочных режимах. Подтверждены разработанные рекомендации относительно размещения агротехнических скоростей основных сельскохозяйственных операций в особой зоне для достижения высокой производительности машинно-тракторного агрегата.

Ключевые слова: колесный трактор, гидрообъемно-механическая трансмиссия, гидрообъемная передача, технико-экономические показатели, машинно-тракторный агрегат, экспериментальные исследования.

Mittsel N.A. Influence of special zones of work hydraulic transmission on the technical and economic parameters of wheeled tractors with continuously variable hydrovolumetric mechanical transmissions. – 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.

The dissertation is devoted to improving technical and economic indicators of machine-tractor units equipped input-coupled power-split hydrovolumetric mechanical

transmissions by placing farming velocity in special areas of work hydrovolumetric transmission.

Compiled complex mathematical model special zones of hydrovolumetric transmission that allows you to explore work processes within the special zone. The process of creation of special zones ascending for and descending regulating characteristics. The influence of the mode load and design parameters of the transmission to the width of the special zones and the overall efficiency of the transmission. The effect of time acceleration wheeled tractor a surge in the value of the operating pressure at the outlet of the special zones. Recommendations for the design of perspective schemes output coupled transmissions that will achieve maximum efficiency transmission speeds within the major energy intensive agricultural operations. Experimental studies determined the accuracy of the mathematical model of hydraulic losses in the transmission by K. Gorodetsky's mathematical model. Experimentally investigated the accuracy of the mathematical model of special zones on the laboratory stand and wheeled tractors, and found the references to perspective schemes input-coupled power-split hydrovolumetric mechanical transmissions.

Keywords: wheeled tractor, hydrovolumetric mechanical transmissions, hydrovolumetric transmission, technical and economical indicators, machine-tractor unit, experimental studies.

Підписано до друку "29" червня 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 № 17

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

