

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

**БУРЛИГА МИХАЙЛО БОРИСОВИЧ**



УДК 621.225:51.001.57

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ТА ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ**  
**СХЕМ ДВОПОТОКОВИХ БЕЗСТУПІНЧАСТИХ ГІДРООБ'ЄМНО-**  
**МЕХАНІЧНИХ ТРАНСМІСІЙ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2018

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», завідувач кафедри автомобіле-  
і тракторобудування

Офіційні опоненти : Заслужений діяч науки і техніки України  
доктор технічних наук, професор  
**Лебедєв Анатолій Тихонович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства ім. Петра Василенка,  
завідувач кафедри тракторів і автомобілів;

кандидат технічних наук  
**Дунь Сергій Вікторович**,  
ПрАТ «АвтоКрАЗ», заступник технічного директора  
з нової техніки

Захист відбудеться « 10 » травня 2018 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.13 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Автореферат розісланий « 27 » березня 2018 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



В. В. Дущенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Світові тенденції розвитку тракторів вказують на збільшення випуску тракторів з безступінчастими гід्रोоб'ємно-механічними трансмісіями (ГОМТ), які забезпечують ряд переваг у порівнянні зі ступінчастими механічними трансмісіями (СМТ): безступінчасте регулювання швидкості та тяглового зусилля трактора, зручність управління і високу ергономічність, можливості вибору оптимальних технологічних швидкостей трактора і роботи на малих «повзучих» швидкостях, найекономічніший режим роботи двигуна, режим роботи з найвищою продуктивністю або з мінімальними фінансовими втратами на обробку 1 гектару ґрунту тощо.

Трактори провідних світових фірм-виробників, таких як «Fendt», «Claas», «Case IH/Steyr», «Deutz-Fahr» (ФРН), «Caterpillar», «MasseyFerguson» (США), оснащені двопотоковими безступінчастими ГОМТ на базі гід्रोоб'ємних передач (ГОП) аксіально-поршневого типу. Стратегія розвитку світового тракторобудування у найближчі 15–20 років полягає у використанні саме безступінчастих ГОМТ для колісних і гусеничних тракторів.

Розробка і розвиток ефективних розрахунково-теоретичних методик, універсалізація математичних моделей ГОП, ГОМТ і СМТ дозволяє проводити аналіз різних альтернативних схем трансмісій, обґрунтовувати і визначати найкращі схемні рішення та знайти найраціональніші конструктивні параметри перспективних трансмісій. Потрібне уточнення методів визначення об'ємного, гідромеханічного та загального коефіцієнта корисної дії (ККД) аксіально-поршневих гідромашин на підставі сучасних експериментальних даних, що дозволить точніше оцінювати втрати в ГОП, що впливають на роботу ГОМТ і загалом на техніко-економічні показники машинно-тракторного агрегату (МТА).

Необхідність глибокого дослідження робочих процесів, коректний математичний опис роботи ГОП у прямому і зворотному потоках потужності при її циркуляції в двопотокових безступінчастих ГОМТ, обґрунтування раціональних схем таких ГОМТ та їх конструктивних параметрів, прогнозування основних техніко-економічних характеристик МТА з ГОМТ з урахуванням буксування – все це потребує розвитку комплексу розрахунково-теоретичних методів і являє собою актуальну науково-практичну задачу, вирішення якої забезпечує конкурентоспроможність вітчизняних тракторів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХПІ» в рамках держбюджетних НДР МОН України: «Розробка наукових основ синтезу трансмісій і адаптивних гальмівних систем транспортних машин в агропромисловому комплексі України» (№ 0104U003359), «Наукове обґрунтування конструкції трансмісії перспективного трактора з потужністю двигуна 250 кВт» (№ 0111U002264); господарських договорів № 26950 «Структурний і параметричний синтез раціональної схеми ГОМТ для лісогосподарського трактора» – замовник ДП «Завод ім. Малишева» і № 26066 «Розробка безступінчастої ГОМТ для тракторів АТ «ХТЗ» потужністю

220–240 к. с.» – замовник АТ «ХТЗ». Здобувач брав участь у виконанні зазначених робіт як виконавець.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є розвиток розрахунково-теоретичних методів з аналізу робочих параметрів безступінчастих ГОМТ та їх основних елементів ГОП, прогнозування техніко-економічних показників МТА для визначення раціональних схем ГОМТ і їх конструктивних параметрів для підвищення конкурентоспроможності вітчизняних тракторів.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались такі наукові задачі:

- проаналізувати сучасний стан безступінчастих тракторних ГОМТ та методів розрахунку щодо їх аналізу і вибору раціональних схем;

- удосконалити математичну модель втрат в об'ємних аксіально-поршневих гідромашинах шляхом ідентифікації коефіцієнтів втрат з урахуванням експериментальних даних щодо втрат і ККД гідромашин;

- розробити алгоритм і обчислювальну процедуру щодо встановлення взаємно однозначної відповідності між робочими параметрами, втратами і ККД ГОП в прямому і зворотному потоках потужності під час роботи в складі двопотокових тракторних ГОМТ;

- розвинути і універсалізувати розрахунково-теоретичну методику для визначення та аналізу кінематичних, силових і енергетичних характеристик двопотокових ГОМТ з урахуванням циркуляції потужності та втрат в ГОП;

- розробити метод математичного моделювання та його програмну реалізацію щодо визначення параметрів ГОП, ГОМТ і основних техніко-економічних показників МТА з урахуванням циркуляції потужності, втрат в ГОП, ГОМТ і буксування колісного трактора;

- сформулювати та розв'язати задачу побудови універсальних характеристик тракторів з ГОМТ і візуалізації кінематичних, силових і енергетичних параметрів ГОМТ у всьому діапазоні експлуатаційних режимів трактора для вибору найраціональнішого схемного рішення ГОМТ;

- встановити достовірність розроблених математичних моделей ГОМТ на лабораторному стенді шляхом експериментальних досліджень і для тракторів з СМТ в польових умовах.

*Об'єкт дослідження* – робочі процеси двопотокових ГОМТ на базі ГОП колісних тракторів з урахуванням втрат потужності в ГОП, ГОМТ і на буксування трактора.

*Предмет дослідження* – закономірності змін кінематичних, силових та енергетичних параметрів ГОП, ГОМТ і їх вплив на техніко-економічні показники МТА.

**Методи дослідження:** дисертаційне дослідження базувалося на положеннях теорії гідроприводу, синтезу планетарних механізмів, теорії трактора для моделювання робочих процесів у ГОП, ГОМТ і МТА в цілому. При розробці математичних моделей ГОП і при розв'язанні математичної моделі системи ДВЗ – ГОМТ – МТА використовувались методи оптимізації. В експериментальних стендових дослідженнях ГОМТ і польових випробуваннях тракторів з СМТ – статистичний метод при визначенні похибки при зіставленні теоретичних і експериментальних результатів.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

– вперше розроблено метод та його програмну реалізацію з визначення параметрів ГОП, ГОМТ і основних техніко-економічних показників МТА з урахуванням режимів циркуляції потужності, втрат в ГОП, ГОМТ і буксування колісного трактора для аналізу і прогнозування характеристик альтернативних тракторних ГОМТ та наукового обґрунтування найраціональнішої схеми трансмісії і її конструктивних параметрів для конкретного трактора;

– вперше розроблено математичну модель, алгоритм і його програмну реалізацію для встановлення взаємнооднозначної відповідності між робочими параметрами, втратами, ККД ГОП та виявлено суттєві розбіжності в універсальних характеристиках ГОП, які працюють у прямому і зворотному потоках потужності у складі двопотокових тракторних ГОМТ;

– вперше поставлено і розв’язано задачу побудови універсальних характеристик параметрів колісних тракторів з ГОМТ, що є важливим критерієм раціональності щодо ККД для вибору тракторних ГОМТ;

– удосконалено математичну модель об’ємних аксіально-поршневих гідромашин, як головних елементів ГОМТ, на підставі ідентифікації коефіцієнтів втрат з урахуванням експериментальних даних щодо втрат і ККД, що дозволяє більш обґрунтовано моделювати втрати в ГОП, ГОМТ і техніко-економічні показники тракторів з безступінчастими ГОМТ загалом.

### **Практичне значення одержаних результатів для тракторобудування:**

– розрахунково-теоретична методика для визначення параметрів ГОМТ дозволяє визначити взаємозв’язок втрат в ГОП, ГОМТ із буксуванням трактора та істотно уточнює визначення і прогнозування техніко-економічних характеристик МТА, зокрема характеристики трактора ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С;

– на підставі реалізації методу ідентифікації коефіцієнтів втрат для аксіально-поршневих гідромашин, як основних елементів вітчизняних тракторних ГОМТ, уточнено коефіцієнти з максимальною розбіжністю у порівнянні з експериментальними до 7 %, що суттєво підвищує точність розрахунку та прогнозування характеристик ГОП, ГОМТ і техніко-економічних показників МТА;

– виявлено розбіжності в універсальних характеристиках ГОП, які працюють в прямому і зворотному потоках потужності; універсалізовані співвідношення для об’ємного, механічного і повного ККД для ГОМТ в прямому і зворотному потоках; доведено, що одночасне регулювання насоса і гідромотора в ГОП призводить до істотного зниження повного ККД ГОП і загального звуження областей з відносно високим ККД;

– використання розроблених методів для визначення і аналізу параметрів альтернативних схем ГОМТ і побудови їх універсальних характеристик дає змогу обґрунтовано знайти найкращі схеми ГОМТ, раціональні конструктивні параметри ГОП, ГОМТ і загалом МТА за критерієм найвищого ККД; побудовані для використання характеристики трактора ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С.

Результати і рекомендації дисертаційної роботи використовуються на АТ «ХТЗ» для колісних тракторів з ГОМТ потужністю 175 кВт, а також у навчальному процесі НТУ «ХП» для студентів спеціальності

133 – «Галузеве машинобудування».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проаналізовано сучасні безступінчасті трансмісії тракторів і тенденції їх розвитку; удосконалено та уточнено математичну модель втрат і ККД гідрооб'ємних аксіально-поршневих гідромашин, як головних елементів безступінчастих тракторних ГОМТ; розроблено методи встановлення взаємнооднозначної відповідності між робочими параметрами, втратами і ККД ГОП, які працюють у прямому і зворотному потоках потужності у складі тракторних ГОМТ; універсалізовані співвідношення для об'ємного, механічного і повного ККД для ГОП у прямому і зворотному потоках потужності; удосконалено методи для аналізу робочих параметрів двопотокових тракторних ГОМТ з урахуванням режимів циркуляції потужності, втрат в ГОП, ГОМТ і буксування трактора; розроблено й реалізовано оптимізаційну технологію щодо визначення параметрів ГОП, ГОМТ і основних техніко-економічних показників МТА з безступінчастими ГОМТ; поставлено і розв'язано задачу побудови універсальних характеристик тракторних ГОМТ; встановлено достовірність розроблених математичних моделей ГОМТ на лабораторному стенді шляхом експериментальних досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації, проходили апробацію на: науково-технічному семінарі «Перспективи розвитку автомобіле- і тракторобудування» в НТУ «ХПІ» (м. Харків, 2003, 2005, 2008–2010); XIV, XV Міжнародних науково-технічних конференціях «Автомобільний транспорт: проблеми та перспективи» (м. Севастополь, Севастопольський національний технічний університет, 2011, 2012); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Створення транспортних дорожніх і будівельних машин» у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (м. Кременчук, 2011); X Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові перспективи ХХІ століття. Досягнення і перспективи нового століття» (м. Новосибірськ, 2015); науковому семінарі кафедри автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХПІ» (м. Харків, 2014).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи відображено у 17 наукових публікаціях, з них: 14 – у наукових фахових виданнях України, 3 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, у закордонних періодичних фахових виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків, трьох анотацій трьома мовами. Загальний обсяг дисертації становить 232 сторінок, з них 67 рисунків за текстом, 18 таблиць за текстом, список використаних джерел – 185 найменувань на 23 сторінках, 4 додатка на 25 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність розглянутої теми, сформульовані мета й задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, викладені

наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, наведена інформація про апробацію результатів роботи та публікації основних положень дисертації.

У першому розділі досліджено стан проблеми, проведено критичний огляд робіт в області гідрооб'ємно-механічних трансмісій і методів розрахунку їх параметрів, представлена постановка задач дослідження.

Основними роботами у сфері вирішення схемної проблеми ГОМТ, вибору числа швидкісних діапазонів, визначення робочого об'єму гідромашин ГОП, що входять до складу ГОМТ, визначення ряду раціональних конструктивних параметрів для таких трансмісій стосовно, в основному, швидкохідних військових гусеничних машин, є відомі роботи С. Н. Прокоф'єва, А. П. Крюкова, А. С. Антонова, Є. С. Кісточкіна, Ю. І. Ловцова, А. Т. Лебедева, В. П. Петрова, К. І. Городецького, І. Н. Серебрякова, Б. І. Кальченко, В. М. Шарипова. Вперше складна динамічна система «двигун – ГОМТ – машина» у вигляді трьох взаємопов'язаних блоків математичних моделей (двигуна, ГОМТ і власне гусеничної машини) відносно до військових гусеничних машин була представлена в роботах Є. Є. Александрова, В. Б. Самородова, Д. О. Волонцевича і В. О. Кононенка. Останнім часом вагомий внесок у розвиток методів розрахунку ГОМТ і ГОП у складі саме тракторів внесли В. Б. Самородов, І. О. Таран, А. І. Бондаренко, С. А. Лебедев, Г. А. Аврунін, А. В. Рогов, А. П. Кожушко, О. О. Островерх, М. О. Мітцель, Н. Aitzemuller, A. Rossetti, K. Renius.

У розділі проаналізовано низку закордонних конструкцій тракторних безступінчастих ГОМТ а також першу українську безступінчасту трансмісію, розроблену НТУ «ХПІ» і АТ «ХТЗ» для тракторів ХТЗ-21021 і ХТЗ-242К.

Виявлено, що необхідна розробка ефективних методів розрахунку для аналізу параметрів безступінчастих ГОМТ у складі колісних тракторів і методів прогнозування техніко-економічних показників МТА для визначення раціональних схемних рішень ГОМТ і їх конструктивних параметрів ще на етапі проектування.

У другому розділі проведено узагальнення і уточнення математичних моделей втрат і ККД об'ємних гідромашин, що працюють у складі двопотокових безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісій. Принципову схему ГОП у прямому і зворотному потоках потужності подано на рис. 1.

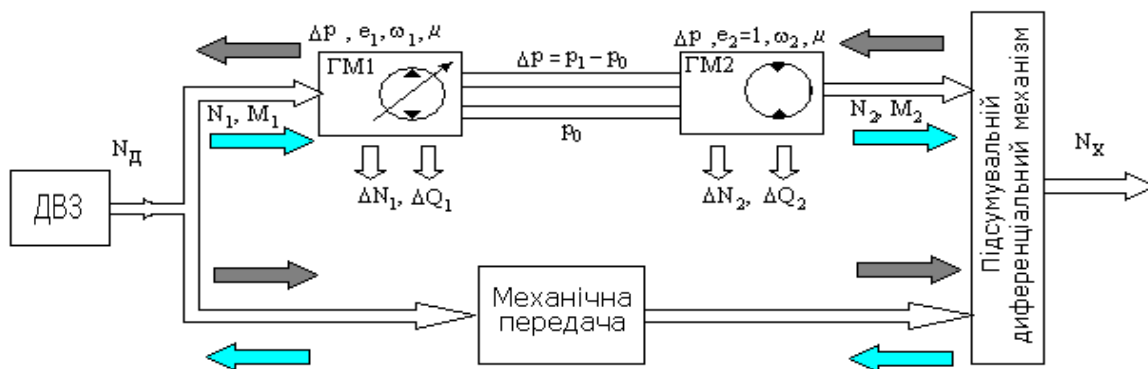


Рисунок 1 – Принципова схема ГОП в прямому і зворотному потоках потужності в ГОМТ:  $N_d$  і  $N_x$  – вхідна і вихідна потужності

На рис. 1 у прямому потоці потужності регульована гідромашина  $ГМ1$  – насос, а  $ГМ2$  – нерегульований гідромотор, у зворотному потоці потужності регульована гідромашина  $ГМ1$  – регульований гідромотор, а  $ГМ2$  – нерегульований насос;  $N_1, M_1$  і  $N_2, M_2$  – потужності і моменти на валах  $ГМ1$  і  $ГМ2$ ;  $\Delta N_1, \Delta N_2$  – сумарні гідромеханічні втрати на гідромашинах;  $\Delta Q_1, \Delta Q_2$  – сумарні об'ємні втрати;  $\mu$  – середній коефіцієнт динамічної в'язкості робочої рідини. Стрілки вказують три можливих напрями потоків потужності в ГОМТ.

Важлива закономірність, що зв'язує параметр регулювання гідронасоса  $e$  і лінійну швидкість руху машини  $V$  з наявністю або відсутністю циркуляційних режимів потужностей у двопотокових ГОМТ була сформульована у працях професорів В. Б. Самородова, Д. О. Волонцевича і І. О. Тарана у вигляді леми.

**Лема 1.** Циркуляційні режими у двопотокових ГОМТ мають місце, коли виконується нерівність  $\text{sign}(V \cdot e \cdot \frac{de}{dV}) < 0$  та відсутні, коли ця нерівність не виконується, і потужність від двигуна на вихід ГОМТ передається паралельними потоками (швидкість  $V > 0$  під час руху машини вперед і  $V < 0$  – назад).

Пропонується цю лему уточнити наступним чином.

**Лема 2.** Для двопотокових ГОМТ з диференціалом на виході циркуляційні режими роботи, коли ГОП працює у зворотному потоці потужності, мають місце завжди, коли виконується нерівність  $\text{sign}(V \cdot e \cdot \frac{de}{dV}) < 0$  і завжди відсутні, коли ця нерівність не виконується, і потужність від двигуна до ведучих коліс передається паралельними потоками через гідравлічну і механічну гілки трансмісії, а ГОП працює в прямому потоці потужності.

Як приклад регульовальна характеристика трьохдіапазонної безступінчастої ГОМТ важкої гусеничної машини а також характерні початкові і кінцеві точки ( $A, B, B, Г, Д$  і  $E$ ) швидкісних діапазонів представлені на рис. 2.

Циркуляційні режими роботи ГОМТ, коли ГОП працює у зворотному потоці потужності, подано на перших половинах швидкісних діапазонів з початковими точками  $A, B$  і  $Д$  у вигляді затінених трикутників. При цьому виконується умова наведеної нерівності. На других половинах швидкісних діапазонів з кінцевими точками  $B, Г$  і  $E$  (незатінені трикутники) потужність від двигуна до тягових коліс передається паралельними потоками, ГОП працює

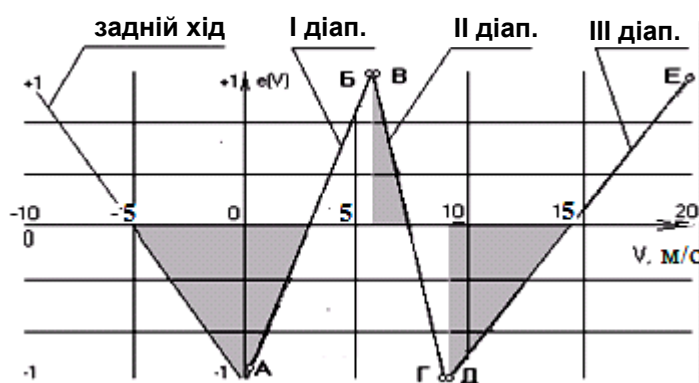


Рисунок 2 – Регульовальна характеристика ГОМТ машини з трьома діапазонами переднього і одним – заднього ходу

в прямому потоці потужності. За цих умов наведена нерівність не виконується. Водночас, **лема 2** точніше показує характер роботи ГОП у складі двопотокових ГОМТ як у прямому, так і зворотному потоках потужності. З урахуванням **леми 2** вирази для об'ємного і механічного ККД об'ємних гідромашин у режимах прямого і зворотного потоків потужності мають вигляд:



$$\eta_{on} = \left[ 1 + \frac{K_{yn}}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{DV|e_n|} \left( \frac{\omega_{\max}}{|\omega_n|} + C_{yn} \right) \left[ (-1)^n \operatorname{sign} \left( e_1 \cdot \frac{de_1}{dV} \right) \right] \right]^{[(-1)^{n+1} \operatorname{sign} \left( e_1 \cdot \frac{de_1}{dV} \right)]}, \quad (1)$$

$$\eta_{mn} = \left[ 1 + \left( \frac{\bar{K}_1 \omega_n}{\Delta p \bar{e}_n} (1 + \bar{K}_2 \bar{e}_n^2) + \frac{\bar{K}_5 (1 + \bar{K}_4 \bar{e}_n)}{\bar{e}_n (1 + \bar{K}_3 \omega_n D)} + \frac{\bar{K}_8 (1 + \bar{K}_7 \bar{e}_n)}{\Delta p \bar{e}_n (1 + \bar{K}_6 \omega_n D)} \right) \cdot \left[ (-1)^n \operatorname{sign} \left( e_1 \cdot \frac{de_1}{dV} \right) \right] \right]^{[(-1)^n \operatorname{sign} \left( e_1 \cdot \frac{de_1}{dV} \right)]}, \quad n = 1, 2, \quad (2)$$

де  $K_{yn}$  і  $C_{yn}$  – коефіцієнти втрат;  $n = 1$  для насоса і  $n = 2$  для гідромотора;  $\omega_{\max}$  – максимальна кутова швидкість гідромашини, рад/с;  $D = \sqrt[3]{2\pi q}$  – характерний розмір ( $q$  – продуктивність гідромашини, м<sup>3</sup>/рад);  $V = \omega_{\max} \cdot D$  – характерна швидкість гідромашини, м/с;  $\bar{K}_i$  ( $i = \overline{1,8}$ ) – коефіцієнти механічних втрат.

У розділі розроблено методику уточнення математичної моделі об'ємного ККД аксіально-поршневих насосів і гідромоторів. На підставі останніх дослідних даних з ККД АТ «Гідросила» уточнені коефіцієнти втрат  $K_{yn}$ ,  $C_{yn}$ , які раніше були запропоновані в математичній моделі К. І. Городецьким.

На першому рівні оптимізації для обох гідромашин були введені масиви квадратичних функціоналів:

$$\Phi_{kj}(K_{yn}[k, j], C_{yn}[k, j]) = \left[ \sum_{i=1}^{i_{\max}} \left( 1 - \frac{\eta_{on}[i, j, k]}{\eta_{on}^{ексн}[i, j, k]} \right)^2 \right]_{\substack{k=\overline{1, k_{\max}} \\ j=\overline{1, j_{\max}}}}, \quad (3)$$

де  $\Phi_{kj}(K_{yn}[k, j], C_{yn}[k, j])$  – сумарне значення безрозмірної квадратичної похибки, що характеризує накопичену різницю між розрахунковим  $\eta_{o1}[i, j, k]$  та експериментальним  $\eta_{on}^{ексн}[i, j, k]$  значеннями об'ємних ККД (для насоса з  $n = 1$  і для гідромотора з  $n = 2$ ) у режимі, який характеризується трійкою індексів  $i, j$  і  $k$  (індекс  $i = \overline{1,7}$  змінюється залежно від кута нахилу диска насоса для  $\gamma_1 = 1^\circ - 18^\circ$ );  $j = \overline{1,6}$  – за значенням робочого тиску для  $\Delta p = 3,5 - 35$  МПа;  $k = \overline{1,6}$  – за значенням  $\omega = 10,467 - 261,67$  рад/с. Для гідромотора ( $n = 2$ ) у фіксованому положенні кута диска  $\gamma_2 = 18^\circ$  ( $e_2 = 1, i = 1$ );

$K_{yn}[k, j], C_{yn}[k, j]$  – масиви коефіцієнтів втрат для побудови їх трендів;  $\eta_{o2}[j, k], \eta_{o1}^{ексн}[i, j, k]$  – розрахунковий і експериментальний об'ємні ККД гідромашини на  $j, k$ -тому експериментальному режимі.

Осереднене сумарне значення квадратичної похибки  $\Phi_{kj}(K_{yn}[k, j], C_{yn}[k, j])$  для усіх значень кутових швидкостей дозволили побудувати тренд коефіцієнтів втрат у вигляді поліномів, як функцій перепаду робочого тиску  $\Delta p$ :

$$K_{y1} = a_1 \Delta p^2 + a_2 \Delta p + a_3; \quad C_{y1} = b_1 \Delta p^2 + b_2 \Delta p + b_3 \quad (4)$$

$$K_{y2} = c_1 \Delta p^4 + c_2 \Delta p^3 + c_3 \Delta p^2 + c_4 \Delta p + c_5; \quad C_{y2} = d_1 \Delta p^4 + d_2 \Delta p^3 + d_3 \Delta p^2 + d_4 \Delta p + d_5, \quad (5)$$

де  $c_p$  ( $p = \overline{1,5}$ ) і  $d_p$  ( $p = \overline{1,5}$ ) – коефіцієнти лінії тренда, відповідно для  $K_{y2}$  і  $C_{y2}$ .

Далі, на другому рівні оптимізації, за усім масивом експериментальних і розрахункових даних з ККД для гідронасоса мінімізувався функціонал

$$\Theta(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3) = \sum_i \sum_j \sum_k \left[ 1 - \frac{1 - K_{y1}(a_1, a_2, a_3) \frac{\Delta p(j)}{DVe(i)} \left( \frac{\omega_{max}}{\omega_l(k)} + C_{y1}(b_1, b_2, b_3) \right)}{\eta_{\text{экс}}^{\text{нас}}(i, j, k)} \right]^{22} \rightarrow 0, \quad (6)$$

і за допомогою методу Хука-Дживса знаходилися коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3$  і  $b_1, b_2, b_3$  для визначення  $K_{y1}$  і  $C_{y1}$  та коефіцієнти  $c_1, \dots, c_5$  і  $d_1, d_2, \dots, d_5$  для визначення  $K_{y2}$ , і  $C_{y2}$ , які значно точніше описують об'ємний ККД ГОП аксіально-поршневого типу при їх роботі у складі ГОМТ. Серед методів оптимізації найефективнішим щодо задач подібного класу є метод Хука-Дживса.

Запропонована методика побудови універсальних характеристик ГОП. Рівняння, що пов'язують робочі параметри  $ГМ1$  і  $ГМ2$  в ГОП, яка працює у складі ГОМТ у прямому потоці потужності, мають вигляд (див. рис. 1):

$$N_1 = (p_1 - p_0)q_1e_1\omega_1 + \Delta N_1(p_1, e_1, \omega_1, \mu); \quad (7)$$

$$p_2 = p_1 - \Delta p_{\bar{a}}(e_1, \omega_1, q); \quad (8)$$

$$q_2e_2\omega_2 = q_1e_1\omega_1 - \Delta Q_1(p_1, e_1, \omega_1, \mu) - \Delta Q_2(p_2, e_2, \omega_2, \mu); \quad (9)$$

$$N_2 = (p_2 - p_0)q_2e_2\omega_2 - \Delta N_2(p_2, e_2, \omega_2, \mu); \quad (10)$$

$$\eta_{\text{ГОП}} = N_2/N_1. \quad (11)$$

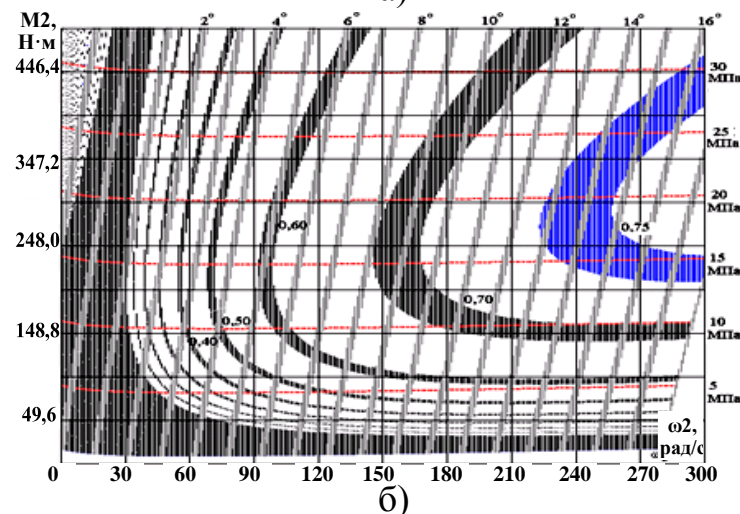
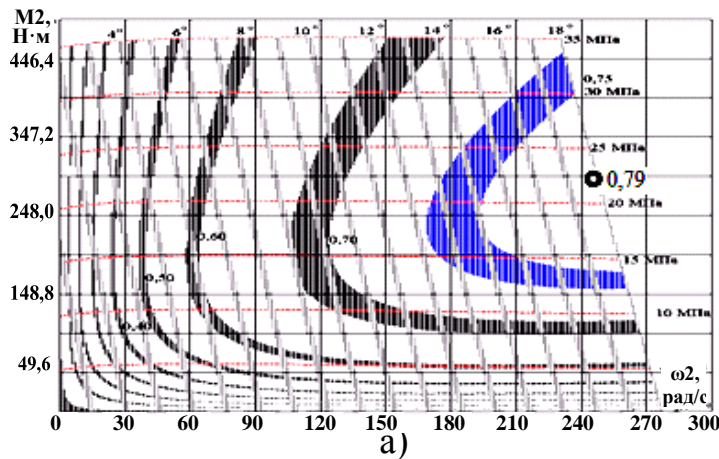


Рисунок 3 – Універсальні характеристики ГСТ-90: а) у прямому і б) зворотному потоках

Якщо всі індекси «1» міняються місцями з індексами «2», то система рівнянь (7)–(11) описує роботу ГОП у зворотному потоці потужності.

Суттєвою різницею універсальних характеристик у зворотному потоці потужності (рис. 3 б) є те, що топографічні лінії рівних ККД огортають менші площини з високим ККД і особлива зона (у лівому нижньому куті) з нульовим ККД є більшою, ніж на універсальній характеристиці у прямому потоці потужності (рис. 3 а). В дисертації на основі аналізу універсальних характеристик доведено, що двомашинне регулювання ГОП як в прямому, так і в зворотньому потоках потужності, однозначно призводить до зменшення загального ККД ГОП і звуженню діапазона навантажування, тому не може бути ефективним у двопотокових ГОМТ на тяглових режимах роботи тракторів.

У третьому розділі представлено комплекс математичних моделей та результати порівняльних досліджень альтернативних схем ГОМТ № 1 – № 4.

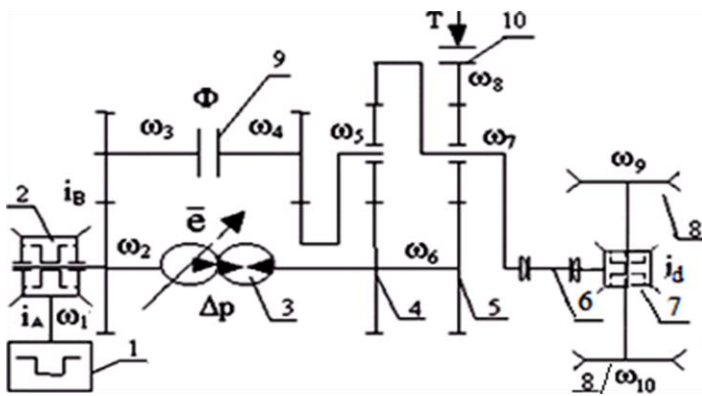


Рисунок 4 – Кінематична схема ГОМТ № 1 і кутові швидкості ланок: 1 – двигун; 2 – редуктор; 3 – ГОП; 4, 5 – планетарні ряди; 6 – карданна передача; 7 – головна передача; 8 – тягові колеса; 9 – фрикціон; 10 – гальмо

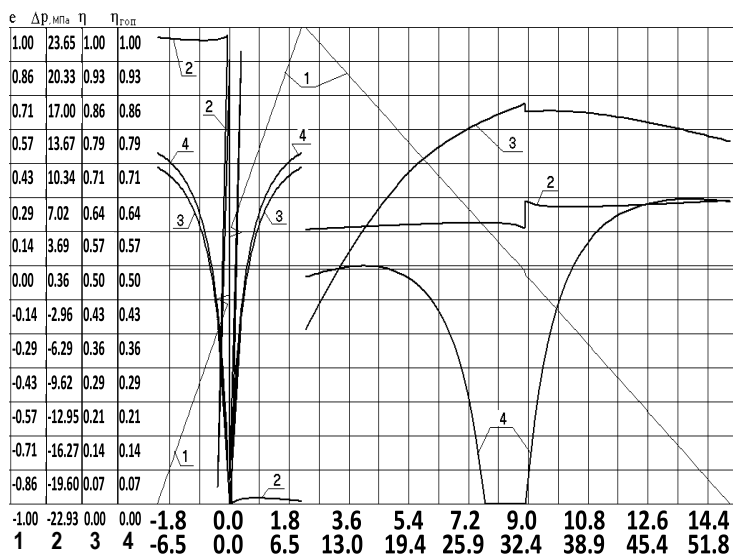


Рисунок 5 – Результати аналізу ГОМТ № 1 для колісного трактора: 1 – регульовальна характеристика ГОП; 2 – перепад тиску  $\Delta p$  в ГОП; 3 – ККД ГОМТ; 4 – ККД ГОП

обчислюються на основі уточнених коефіцієнтів втрат  $K_{y1}$ ,  $C_{y1}$  і  $K_{y2}$ ,  $C_{y2}$ ; моменти навантаження  $M_1$  і  $M_2$  на валах  $ГМ1$  і  $ГМ2$  з урахуванням втрат моментів  $\Delta M_1$  і  $\Delta M_2$  у гідромашинах; рівняння балансу моментів на ланках ГОМТ, на валу двигуна і тягових колесах; рівняння, що описують стан керуючих елементів для першого та другого швидкісних діапазонів трактора. Після розв'язання повної нелінійної системи рівнянь шляхом послідовних наближень, визначення кутових швидкостей і моментів на ланках ГОМТ, перепаду тиску  $\Delta P$  в ГОП, знаходимо потужності втрат  $\Delta N_{ГОП}$  в ГОП і  $\Delta N_{МЕХ}$  в механічній частині ГОМТ, які є функціями  $B$  і  $e$ . Щодо схеми ГОМТ № 1:

Технологія побудови математичних моделей дво-потоккових тракторних ГОМТ на прикладі кінематичної схеми ГОМТ № 1 (рис. 4) і результати аналізу (рис. 5) для дослідного зразка самохідного шасі ВАТ ХЗТСШ класу 0,9 масою 2200 кг полягає у наступному. На підставі того, що технологічні процеси, які виконують колісні трактори (оранка, культивування, боронування та ін.) є відносно рівномірними у часі (відносно стабільними), задачу визначення параметрів ГОП, ГОМТ і загалом МТА можна розв'язувати, як квазістаціонарну.

Використовується система рівнянь, яка описує кінематику усіх ланок ГОМТ, кожна з яких має свою кутову швидкість  $\omega_j$  ( $j = 1..10$ ), включаючи кінематику триланкових планетарних механізмів зі внутрішніми передаточними відношеннями  $k_A$ ,  $k_B$ ; рівняння балансу робочої рідини в ГОП з продуктивністю  $q$ , перепадом тиску  $\Delta p$ , параметром регулювання  $e$  і об'ємними втратами  $\Delta Q_1$  і  $\Delta Q_2$  в обох гідромашинах, які

$$\Delta N_{\text{ГОП}} = |M_{23}\omega_2 + M_{61}\omega_6| \quad (12)$$

$$\Delta N_{\text{МЕХ}} = \sum_{i=1}^k N_i [\omega_D, e_1] (1 - \eta_i). \quad (13)$$

Повні втрати  $\Delta N$ , повний ККД і питома сила тяги трактора  $D$  з ГОМТ:

$$\Delta N = \Delta N_{\text{ГОП}} + \Delta N_{\text{МЕХ}}, \eta = \frac{1}{M_D \omega_D} (M_9 \omega_9 + M_{10} \omega_{10}); D = \frac{1}{Gr} |M_9 + M_{10}|. \quad (14)$$

де  $M_{23}$ ,  $M_{61}$  – моменти навантаження на ГМ1 і ГМ2;  $M_9$ ,  $M_{10}$  – моменти на тягових колесах;  $\omega_2$ ,  $\omega_6$  – кутові швидкості валів ГМ1 і ГМ2;  $N_i [\omega_D, e_1]$ ,  $\eta_i$  – потужність, яка передається  $i$ -му зубчастому зчепленню та його ККД.

Проведено чисельні експерименти для порівняння чотирьох альтернативних тракторних ГОМТ (№ 1 – № 4) для трактора – аналога ХТЗ-17021 (ХТЗ-21021, ХТЗ-242К) масою 8910 кг, обладнаного двигуном типу Д260 максимальною потужністю 147 кВт, об'ємними гідромашинами ГСТ-90, з максимальною швидкістю трактора на I тягловому діапазоні близько 2,8 м/с (10 км/год), на II транспортному – близько 8,30–8,88 м/с (30–32 км/год). На I діапазоні навантаження на гаку імітувалося коефіцієнтом опору руху  $f = 0,45$ – $0,5$ , з шириною плуга на оранці  $B = 2,0$ – $2,8$  м. На II транспортному  $f = 0,05$ .

Альтернативні тракторні ГОМТ (№ 1 – № 4) порівнювалися за максимальними шкідливими циркуляційними потужностями, які виникають в ГОМТ з диференціалом на виході, за навантаженням в елементах ГОМТ, за максимальним перепадом тиску в ГОП, за ККД ГОП і ГОМТ, за складністю конструкції. За цими критеріями, насамперед, за рівнем ККД, циркуляційних потужностей і навантажень в елементах ГОМТ, порядок найвищих пріоритетів щодо ГОМТ такий: № 4, № 3, № 2 і № 1.

У третьому розділі розвинутий метод математичного моделювання та його програмна реалізація для визначення основних техніко-економічних показників МТА з ГОМТ в умовах буксування колісного трактора.

Продуктивність  $S$  МТА, оснащеного ГОМТ, в процесі технологічної операції «оранка» з урахуванням коефіцієнта змінності  $K_{3М}$ :

$$S = K_{3М} B \cdot v(B, e), \quad (15)$$

де  $v(B, e) = \omega_X \cdot r (1 - \delta(B, e))$  – дійсна швидкість трактора;  $\omega_X \cdot r$  – теоретична швидкість руху трактора за відсутністю буксування;  $\omega_X$ ,  $r$  – відповідно, кутова швидкість тягових коліс і їх радіус.

Погектарна витрата палива  $Q$  (кг/га):

$$Q = 10^{-3} \frac{q_N \cdot N}{360 \cdot B \cdot v(B, e)} = 10^{-3} \frac{q_N \cdot M_D \omega_D}{360 \cdot B \cdot v(B, e)}, \quad (16)$$

де  $q_N$  – питома витрата палива за номінальною потужністю  $N$ .

Критерій ефективності МТА, що відображає кількість оброблених гектарів на одиницю витрат, має вигляд:

$$D^* = \frac{S \cdot T_P}{e_H \cdot C_1 + \sum_{i=2}^m C_i + Q \cdot (S \cdot T_P) \cdot C_{1Л}}, \quad (17)$$

де  $T_p$  – реальний час роботи трактора з урахуванням відмов до закінчення гарантійного терміну;  $e_H \cdot C_1$  – сума амортизаційних відрахувань;  $C_i$  – характерні витрати ( $m$ -різновидів) за час  $T_0$  роботи трактора без відмов, включаючи заробітну платню тракториста;  $C_{1л}$  – вартість одного літра палива.

$T_p$  з урахуванням відмов до закінчення терміну  $T_0$  під час загального моніторингу  $N$  тракторів в експлуатації логічно зв'язати з надійністю:

$$T_p = T_0 \cdot \prod_{j=1}^n \left( 1 - \frac{\Delta N_j}{N} \right), \quad (18)$$

де відмови  $\Delta N_j$  ( $j = 1, n$ ;  $n$  – число різновидів відмов) – це відмови двигуна  $\Delta N_1$ , відмови коробки передач  $\Delta N_2$ , відмови гідравлічної системи  $\Delta N_3$  та ін. Для визначення параметрів ГОП, ГОМТ і основних техніко-економічних показників МТА використано безрозмірний квадратичний функціонал  $\Phi(e, \delta, B)$  як функцію трьох варійованих змінних  $e$ ,  $\delta$  і  $B$  (тут  $B$  – ширина плуга):

$$\Phi(e, \delta, B) = \left\{ 1 - \frac{m \cdot g \cdot f^* \cdot v(B, e) + \left\{ f_{пл} \cdot G_{пл} + B \cdot h \cdot k \cdot \left( 1 + \frac{\varepsilon_0 \cdot v(B, e)^2}{k} \right) \right\} v(B, e)}{(M_d \omega_d - \Delta N_{ГОП}(B, e) - \Delta N_{МЕХ}(B, e))(1 - \delta(B, e))} \right\}^2 + \left\{ 1 - \frac{m \cdot g (\alpha - \beta \cdot e^{-\lambda \delta})}{f_{пл} \cdot G_{пл} + B \cdot h \cdot k \left( 1 + \frac{\varepsilon_0 \cdot v(B, e)^2}{k} \right)} \right\}^2 + \left( 1 - \frac{N}{M_d \omega_d} \right)^2. \quad (19)$$

Вирази в чисельнику і знаменнику першої фігурної дужки – це ліва і права частини рівняння балансу потужності двигуна  $M_d \omega_d$  до тягових коліс з урахуванням втрат  $\Delta N_{ГОП}(B, e)$  в ГОП, втрат  $\Delta N_{МЕХ}(B, e)$  у механічній частині ГОМТ і втрат на буксування, які ураховуються множителем  $(1 - \delta(B, e))$ .

В чисельнику і знаменнику другої фігурної дужки – це ліва і права частини рівняння балансу тягової сили на гаку трактора з урахуванням буксування  $\delta$  і формули Горячкіна, що враховує квадратичне зростання втрат на перевертання ґрунту при оранці залежно від швидкості оранки.

В чисельнику і знаменнику третьої круглої дужки – це ліва і права частини рівняння балансу заданої потужності двигуна  $N$  і розрахункової  $M_d \omega_d$ . Мінімізація функціоналу (19) вирішує задачу умовної оптимізації

$$\min \Phi(e, \delta, B) = \Phi(e^*, \delta^*, B^*), \quad (20)$$

за умов фізично чітко визначених обмежень  $e \in [-1; 1]$ ,  $\delta \in [0; 0,15]$ ,  $B \in [0; B_{\max}]$ .

Водночас, цей підхід трансформується для моделювання втрат, ККД, буксування і основних техніко-економічних показників МТА з СМТ –

за відсутністю ГОП усі функції двох змінних ( $B, e$ ) у співвідношенні (19) перетворюються у функції однієї змінної  $B, \Delta N_{\text{ГОП}}(B, e) = 0$ , а  $\Delta N_{\text{МЕХ}}(B, e)$  легко визначається через механічний ККД СМТ. Тоді задача оптимізації (20) має вигляд:  $\min \Phi(\delta, B) = \Phi(\delta^*, B^*)$  за умов  $\delta \in [0; 0,15]$ ,  $B \in [0; B_{\text{max}}]$ .

Для оцінювання економічної ефективності тракторів ХТЗ-150К і ХТЗ-17221 (ХТЗ-21021, ХТЗ-242К) з ГОМТ в режимі «оранка» був впроваджений критерій витрат  $1/D^*$  (грн/га). При цьому прийнято:  $K_{\text{НАД}} = 0.85$ ;  $T_0 = 1000$  год;  $T_P = 425$  – час роботи на оранці, год;  $e_H = 0.1$ ;  $C_1 = 1.5$  млн грн;  $C_5 = 45\,000$  – заробітна платня тракториста за час  $T_P$ ;  $C_{1л} = 25$  грн/л – ціна пального;  $K_{3М} = 0.68$ .

Ефективність роботи трактора-аналога ХТЗ-17221, оснащеного ГОМТ (№ 1–№ 4), перевірялася шляхом чисельного експерименту з визначення основних техніко-економічних характеристик. Результати наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні техніко-економічні характеристики для ГОМТ (№ 1–№ 4)

№ пор.	Техніко-економічний параметр	Одиниця виміру	ГОМТ № 1	ГОМТ № 2	ГОМТ № 3	ГОМТ № 4	ГОМТ-1С
1	$\eta_{\text{ГОП}}$		0.715	0.744	0.742	0.670	0.656
2	$\eta_{\text{ТР}}$		0.686	0.821	0.815	0.830	0.808
3	$\Delta p$	МПа	30.2	16.65	17.35	21.10	22.04
4	$N$	кВт	145.5	146.7	147.6	146.1	148.4
5	$\Delta Q$	л/хв	47.4	25.9	26.44	30.7	31.2
6	$\Delta N_{\text{ГОП}}$	кВт	39.8	20.3	20.2	19.9	19.5
7	$V_T$	км/год	7.99	9.44	9.44	9.49	9.53
8	$V$	км/год	7.05	8.22	8.22	8.27	8.39
9	$P_{\text{КР}}$	Н	35103	37062	37054	37134	37334
10	$S$	га/год	0.99	1.12	1.12	1.13	1.140
11	$\eta_{\text{КР}}$		0.462	0.519	0.516	0.526	0.531
12	$Q$	кг/га	23.08	19.62	19.75	19.40	19.46
13	$1/D^*$	грн/га	1115.1	975.7	979.3	961.0	968.0
14	$\delta$	%	11.7	13.9	13.9	13.9	12.0
15	$e$		1.00	1.00	-0.95	0.60	0.54
16	$\Phi$	%	0.029	0.017	0.017	0.017	0.0016

Як видно із табл. 1, схема з ГОМТ № 4 є також найефективнішою у порівнянні із ГОМТ № 1–№ 3 за параметрами  $\eta_{\text{ТР}}$ ,  $P_{\text{КР}}$ ,  $S$ ,  $\eta_{\text{КР}}$ ,  $Q$ ,  $1/D^*$  і практично однакова з ГОМТ-1С, результати для якої також наведено в табл. 1.

Математичні моделі перевірялися на тракторах зі ступінчастими механічними трансмісіями в умовах польових випробувань. Результати моделювання порівнювалися з експериментальними даними, що дозволило судити про адекватність математичної моделі.

У польових випробуваннях брали участь трактор Т-150К-09 з плугами ПЛН-5-35 і ПН-6-35, оснащений двигуном ЯМЗ-236Д-3; трактор Т-17021-03 з плугом ПРУН-5-45, оснащений ліцензійним двигуном Дойц-ТВД226В6 виробництва Китай; трактор МТЗ-1221 з плугом ПЛН-5-35, оснащений двигуном Д260.2. Результати польових випробувань представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати порівняння польових випробувань тракторів

Склад МТА (трактор + двигун + плуг)	В, м	q <sub>n</sub> , г/ кВт·год N <sub>д</sub> , кВт	S <sub>експ</sub> (S), га/год		Q <sub>експ</sub> (Q), кг/га		V <sub>експ</sub> (V), км/год		δ <sub>експ</sub> (δ), %	
			ГОМТ №4 / ΔS, %	СМТ /ΔS, %	ГОМТ № 4 / ΔQ, %	СМТ / ΔQ, %	ГОМТ № 4 /ΔV, %	СМТ /ΔV, %	ГОМТ № 4 /Δδ, %	СМТ /Δδ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Т-150К-09 ЯМЗ- 236Д-3 ПЛН-5-35	1.75	220 129	– (1.25) ΔS= –1.9%	1.33 (1.28) / –3.8 %	– (25.09) ΔQ=2,0%	26.98 (24.6) / –8.8 %	– (7,14)	7.6 (7.35) / –3.3 %	– 14,9	17.1 (16.5) / –3.5 %
ХТЗ-17021 ТВД226В6 (Китай) ПРУН 5-45	2.25	217 (200*) 132 (103*)	– (1,15) ΔS= –1.8%	1.25 (1.18) / –5.4 %	– (17,75) ΔQ= 1,95%	16.60 (17.42) / +4.9 %	– (5,11)	5.56 (5.25) / –5.6 %	– 15,1	18.5 (17.3) / –3.8 %
Т-150К09 ЯМЗ- 236Д-3 ПН 6-35	2.10	220 129	– (1,58) ΔS= –2%	1.70 (1.62) / –4.7 %	– (20,93) ΔQ=2,0%	20.75 (20.52) / –1.1 %	– (7,52)	8.1 (7.7) / –4.9 %	– 15,8	17.1 (17.7) / +3.4 %
МТЗ-1221 Д260.2 ПЛН-5-35	1.75	226 96	– (0,95) ΔS= –1.9%	0.99 (0.97) / –2.0 %	– (26,31) ΔQ=2,0%	26.56 (25.8) / –2.9 %	– (5,42)	5.66 (5.55) / –1.9 %	– 21,8	22.0 (23.0) / +4.5 %

В табл. 2: \* – реальні значення, що використовуються в експерименті; у дужках – значення за математичною моделлю. На підставі проведених досліджень можна дійти висновку, що математичні моделі МТА і ГОМТ є достовірними.

Аналіз експериментальних даних і результатів розрахунку буксування у разі використання на тракторах ступінчастих механічних і безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісій приводить до наступного важливого висновку. Об'ємні і механічні втрати в ГОМТ на 5–7 % перевищують суто механічні втрати в СМТ. У зв'язку з цим продуктивність на оранці зменшується теоретично до 2 %, а погектарна витрата приблизно настільки ж збільшується. Однак ефект безступінчастого регулювання ГОМТ істотно полегшує роботу тракториста. Підвищується керованість МТА, особливо на тягових технологіях, знижуються динамічні навантаження в трансмісії за рахунок демпфувальних властивостей робочої рідини в системі ГОП. Загалом, істотне підвищення ергономічності ГОМТ сприяє підвищенню продуктивності праці тракториста за рахунок його меншої втоми і зменшенню психофізичних навантажень. Проведений аналіз чисельно підтвердив практично однакову ефективність ступінчастих механічних і гідрооб'ємно-механічних трансмісій. Принаймні, теоретично доведено, що ані продуктивність МТА, ані погектарні витрати палива, а отже й витрати на обробку 1 га (грн/га) у разі використання раціонально вибраних кінематичних схем безступінчастих двопотокових ГОМТ для ХТЗ-17021 не призведуть до зменшення техніко-економічних показників, що водночас, є ефективним з точки зору ергономіки та екології.

У четвертому розділі сформульовано та розв'язано задачу побудови універсальних характеристик тракторів з ГОМТ і візуалізації кінематичних, силових і енергетичних параметрів ГОМТ у всьому діапазоні експлуатаційних режимів роботи трактора для порівняння альтернативних схемних рішень

ГОМТ і вибору найраціональнішого з них, розглянуті універсальні характеристики ГОМТ. На підставі аналізу універсальних характеристик можна проводити обґрунтування раціонального робочого об'єму гідромашини для заданої системи тракторної ГОМТ.

Універсальні характеристики повного ККД ГОМТ з ГСТ-90 наведено на рис. 6, а для ГСТ-112 – на рис. 7.

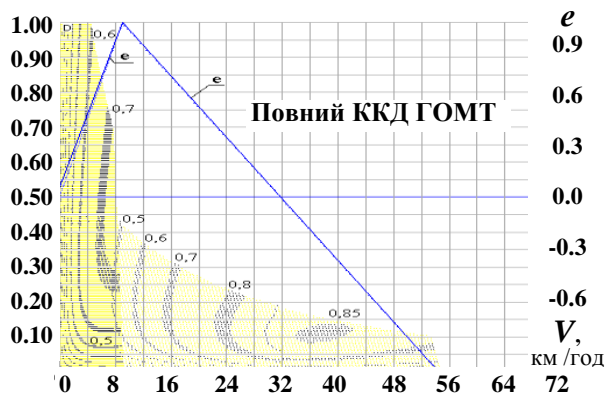


Рисунок 6 – Універсальні характеристики ГОМТ № 1 (повний ККД) з використанням ГСТ-90

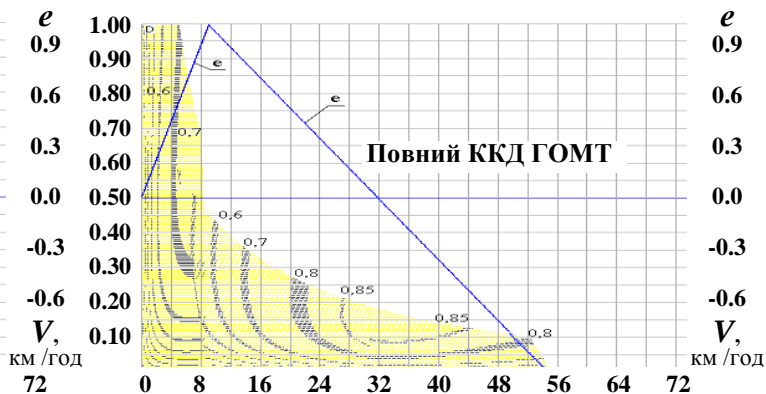


Рисунок 7 – Універсальні характеристики ГОМТ № 1 (повний ККД) з використанням ГСТ-112

Аналіз показав, що у разі використання ГСТ-112 збільшується динамічний фактор, оскільки він забезпечується гідромашинами більшого робочого об'єму; помітно розширюються зони робочих режимів ГОМТ з ККД, що перевищує 0,85; підвищується ККД ГОМТ на першому повнопотоковому діапазоні. На рис. 8 для порівняння наведено універсальні характеристики ГОМТ-1С трактора ХТЗ-21021 (ХТЗ-242К) з двигуном Д-260 (додаток В дисертації).

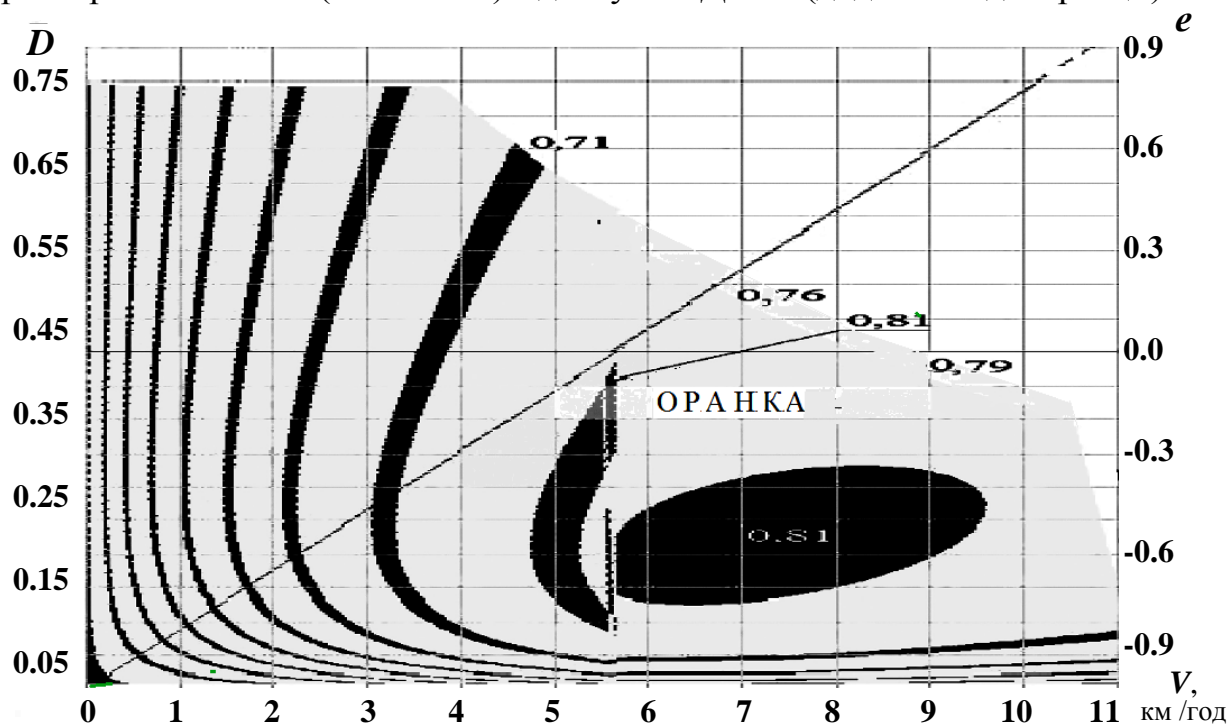


Рисунок 8 – Універсальні характеристики ГОМТ-1С у режимі «оранка»



Таким чином, універсальні характеристики ГОМТ можуть бути використані не тільки для порівняння різних альтернативних варіантів ГОМТ, але й для оцінки тих чи інших конструктивних змін в конкретній трансмісії.

У п'ятому розділі експериментально досліджено безступінчасту ГОМТ. Наведено опис експериментальної установки – станду, виготовленого на кафедрі автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХПІ» (рис. 9).

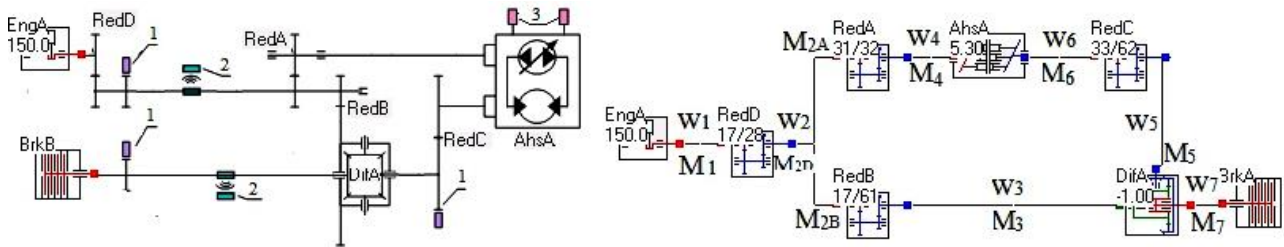


Рисунок 9 – Функціональна та структурна схеми експериментального станду; датчики: 1 – частоти обертання вала електродвигуна; 2 – крутного моменту ланки; 3 – тиску; EngA – електродвигун; RedA...C – редуктори; AhsA – ГОП; Difa – диференціал

Стенд імітує роботу безступінчастих двопотокових ГОМТ з диференціалом на вході і на виході. Разом з іншими співробітниками зазначеної кафедри автор брав участь у розробці, запуску та наукових дослідженнях на даному стенді. Випробування ГОМТ проводилося на 7 каналах: 1 канал – число оборотів гальма, датчик живиться від 30 В, число зубів шестерні – 31; 2 канал – число оборотів електродвигуна, датчик АБС живиться від 5 В, число зубів шестерні – 31; 3 канал – число оборотів гідромотора, датчик живиться від 12 В, число зубів шестерні – 62; 4 канал – високий тиск гідромотора, опір датчика  $R = 200 \text{ Ом}$ ; 5 канал – тиск підживлення, опір датчика  $R = 200 \text{ Ом}$ ; 6 канал – крутний момент гальма; 7 канал – крутний момент електродвигуна.

Таблиця 3 – Порівняльна характеристика розрахункових і експериментальних даних

Парам. рег. $e$	Швидкість вих. ланки $w7$ [рад/с]		Крутний момент ланки $M7$ [Нм]		Тиск $\Delta P$ [МПа]	
	теор.	експ.	теор.	експ.	теор.	експ.
-1	-0,35	-0,98	-42,12	-42,12	-4,66	-6,42
-0,8	9,6	12,83	45,25	46,23	4,25	1,46
-0,6	19,62	22,8	45,45	45,14	4,39	2,98
-0,4	29,65	28,23	45,45	48,69	4,52	4,12
-0,2	39,69	40,01	45,45	58,55	4,53	4,32
0	49,77	48,62	58,44	59,27	4,50	4,98
+0,2	59,21	59,89	58,44	62,09	6,99	7,27
+0,4	69,24	68,23	58,44	64,78	6,32	7,35
+0,6	81,25	80,66	58,44	57,25	7,49	7,68
+0,8	89,25	88,51	45,45	46,97	7,49	7,75
+1	99,24	96,035	45,45	43,35	7,49	7,89

Результати експерименту були оброблені за допомогою програмного комплексу Mathcad.

У результаті проведення експерименту були отримані залежності кутових швидкостей і тиску в ГОП від часу, залежність крутних моментів, кутів нахилу шайби гідронасоса і ККД від часу.

Складена математична модель станда і оброблена за допомогою програмного пакету TRANS, розробленого на кафедрі автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХПІ».

Результати аналізу експериментальних і теоретичних даних для трьох із семи вищезазначених каналів наведені у табл. 3. Максимальна похибка теорії експерименту щодо стенда склала 7,92 %.

Встановлено, що методологія створення математичних моделей ГОМТ і СМТ є адекватною і рекомендується для використання.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі розв'язано науково-практичну задачу розробки ефективних методів розрахунку, що дозволяють аналізувати різні альтернативні схеми двопотокових безступінчастих гідروб'ємно-механічних трансмісій і визначати з них найкращі та раціональні схемні рішення. Виконане дослідження дозволило отримати наступні наукові та практичні результати.

1. В процесі аналізу сучасного стану безступінчастих тракторних ГОМТ встановлено, що на сьогодні відсутня комплексна система оцінювання альтернативних схем ГОМТ для колісних тракторів різних класів.

2. Удосконалено математичну модель гідрооб'ємних аксіально-поршневих гідромашин, як основних елементів двопотокових ГОМТ на підставі експериментальних даних щодо втрат і ККД. Середня похибка складає 7 %.

3. Розроблена математична модель і її програмна реалізація для встановлення взаємно однозначної відповідності між робочими параметрами, втратами і ККД ГОП дозволяє: а) побудувати і аналізувати універсальні характеристики ГОП, які суттєво відрізняються в прямому і зворотному потоках потужності; б) науково обґрунтувати робочий об'єм гідромашин для роботи у складі ГОМТ; в) уточнити параметри ГОМТ і показники МТА;

4. Встановлено взаємовідношення між кінематичними, силовими і енергетичними характеристиками двопотокових ГОМТ; доведено, що одночасне регулювання насоса і гідромотора в ГОП призводить до істотного зниження повного ККД ГОП і загального звуження областей з відносно високим ККД. І цей шлях не є перспективним з точки зору підвищення ККД трансмісії трактора і його продуктивності.

5. Розроблені методи дозволяють в комплексі визначити параметри ГОП і ГОМТ, рівень циркуляцій потужності, навантаження в елементах трансмісії, втрати в ГОП, ГОМТ і буксування трактора на тягових режимах та істотно уточнюють визначення і прогнозування техніко-економічних характеристик МТА, як із безступінчастими ГОМТ, так і з СМТ, зокрема характеристики нового вітчизняного трактора ХТЗ-21021 із ГОМТ-1С;

6. Сформульовано задачу побудови універсальних характеристик тракторів з ГОМТ та розроблено метод візуалізації кінематичних, силових і енергетичних параметрів ГОМТ у всьому діапазоні експлуатаційних режимів трактора, що дозволило обґрунтовано вибрати найраціональніше схемне рішення ГОМТ колісного трактора серед ланки альтернативних кінематичних схем ГОМТ, що забезпечує найкращі техніко-економічні показники колісного трактора. Схема № 4 перевищує схеми № 1–№ 3 за усіма показниками на 8–10 %.

7. Експериментально підтверджено достовірність математичних моделей ГОП і ГОМТ на лабораторному стенді, а для тракторів з СМТ – у польових

умовах. Порівняння теоретичних і експериментальних даних підтверджує адекватність розроблених моделей. Максимальна похибка експериментальних і розрахункових значень не перевищує 8,8 %.

Результати і рекомендації дисертаційної роботи використовуються на АТ «ХТЗ» для колісних тракторів з ГОМТ потужністю 175 кВт, а також у навчальному процесі НТУ «ХП» для студентів спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування».

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бурлыга М. Б. Обоснование оптимальных параметров гидромашин объёмного гидропривода ходовой части самоходного шасси / М. Б. Бурлыга // Тракторна енергетика в рослинництві. – Харків : ХГТУСХ. – 1999. – Вип. 5. – С. 140–146.

2. Бурлыга М. Б. Методика и результаты построения универсальных характеристик гидрообъемно-механических трансмиссий / В. Б. Самородов, А. В. Рогов, М. Б. Бурлыга // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ. – 2002. – Вип. 3 (14). – С. 46–49.

*Здобувач вперше запропонував методику розрахунку і побудови на ЕОМ універсальних характеристик тракторних ГОМТ для порівняння ефективності альтернативних схем безступінчастих трансмісій для різних технологічних процесів МТА.*

3. Бурлыга М. Б. Результат математического моделирования двухпоточной ГОМТ колесного трактора класса 0,9 / В. Б. Самородов, М. Б. Бурлыга, А. В. Рогов // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія : Автомобіле- та тракторобудування. – Харків : НТУ «ХП». – 2002. – Вип. 10, Т. 1. – С. 17–22.

4. Бурлыга М. Б. Критический обзор работ в области тракторных гидрообъемно-механических трансмиссий / В. Б. Самородов, А. В. Рогов, М. Б. Бурлыга, Б. В. Самородов // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія : Автомобіле- та тракторобудування. – Харків : НТУ «ХП». – 2003. – Вип. 4. – С. 3–19.

*Здобувач виконав аналіз сучасних безступінчастих трансмісій тракторів і тенденцій їх розвитку, здійснив аналіз літературних джерел щодо математичного моделювання безступінчастих ГОМТ.*

5. Бурлыга М. Б. Методика упаковки матричных систем, моделирующих работу гидрообъемно-механических трансмиссий / В. Б. Самородов, А. В. Рогов, М. Б. Бурлыга, Б. В. Самородов // Автомобільний транспорт. – Харків : ХНАДУ. – 2003. – № 13. – С. 91–98.

*Здобувач запропонував удосконалену методику щодо матричного аналізу кінематичних, силових і енергетичних характеристик двопотокових ГОМТ з урахуванням режимів циркуляції потужності і втрат в ГОП та ГОМТ.*

6. Бурлыга М. Б. Методика построения универсальных характеристик гидрообъемных передач, работающих в прямом и в обратном потоках мощности в составе гидрообъемно-механических трансмиссий /

В. Б. Самородов, А. В. Рогов, М. Б. Бурлыга, Б. В. Самородов // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2003. – Вип. 1, Т. 1. – С. 294–301.

*Здобувач запропонував методику щодо встановлення взаємно однозначної відповідності між робочими параметрами, втратами і ККД ГОП, що працюють у прямому і зворотному потоках потужності у складі ГОМТ.*

7. Бурлыга М. Б. Результаты численного эксперимента по анализу основных параметров гидрообъемно-механической трансмиссии колесного трактора-аналога ХТЗ 17221 / В. Б. Самородов, М. Б. Бурлыга // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Автомобіле- та тракторобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2004. – Вип. 16. – С. 63–70.

*Здобувач запропонував удосконалену методику для аналізу кінематичних, силових і енергетичних характеристик двопотокових тракторних ГОМТ з урахуванням режимів циркуляції потужності, втрат в ГОП, ГОМТ і буксування трактора.*

8. Бурлыга М. Б. Расчетно-теоретическое обоснование двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии колесного трактора-аналога ХТЗ 17221 / В. Б. Самородов, М. Б. Бурлыга // Збірник наукових праць Дніпропетровського національного гірничого університету. – Дніпропетровськ : ДНГУ. – 2005. – № 21. – С. 143–151.

*Здобувач розвинув методику для аналізу кінематичних, силових і енергетичних характеристик двопотокових тракторних ГОМТ з урахуванням режимів циркуляції потужності, втрат в ГОП, ГОМТ і буксування трактора.*

9. Бурлыга М. Б. Моделирование взаимосвязей крюковой нагрузки с потерями в гидрообъемно-механической трансмиссии и буксованием колесного трактора / В. Б. Самородов, М. Б. Бурлыга // Автомобільний транспорт. – Харків : ХНАДУ. – 2005. – Вип. 16. – С. 166–170.

*Здобувач вперше запропонував оптимізаційну технологію для визначення параметрів ГОП, ГОМТ і основних техніко-економічних показників МТА з безступінчастими ГОМТ.*

10. Бурлыга М. Б. Универсализация математических моделей гидрообъемных передач, работающих в составе двухпоточных бесступенчатых трансмиссий / М. Б. Бурлыга // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків : НВП ПП «Технологічний центр». – 2008. – Вип. 5/5 (35). – С. 4–7.

11. Бурлыга М. Б. Методика уточнения математической модели объемного КПД аксиально-поршневых гидронасосов / В. Б. Самородов, А. В. Рогов, А. А. Коваль, М. Б. Бурлыга // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Автомобіле- та тракторобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – Вип. 58. – С. 3–10.

*Здобувач запропонував удосконалений запис математичної моделі втрат і ККД аксіально-поршневих гідронасосів, як головних елементів ГОМТ.*

12. Бурлыга М. Б. Использование информационных технологий при адаптации математических моделей к объектам гидромашиностроения / В. Б. Самородов, А. А. Коваль, М. Б. Бурлыга // Східно-Європейський журнал

передових технологій. – Харків : НВП ПП «Технологічний центр». – 2009. – Вип. 1/5 (37). – С. 20–24.

*Здобувач запропонував удосконалений запис математичної моделі втрат і ККД аксіально-поршневих гідромоторів, як головних елементів ГОМТ.*

13. Бурлыга М. Б. Сравнение универсальных характеристик гидрообъемных передач как элементов перспективных бесступенчатых гидрообъемно-механических трансмиссий украинских тракторов / В. Б. Самородов, А. А. Коваль, М. Б. Бурлыга // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ. – 2009. – Вип. 2 (55), Ч. 1. – С. 73–77.

*Здобувач здійснив порівняльний аналіз і запропонував удосконалену методику щодо встановлення взаємно однозначної відповідності між робочими параметрами, втратами і ККД ГОП, які працюють у прямому і зворотному потоках потужності у складі безступінчастих тракторних ГОМТ.*

14. Бурлыга М. Б. Результаты полевых испытаний и сравнение их с расчетом для основных технико-экономических показателей тракторов / В. Б. Самородов, М. Б. Бурлыга, С. А. Шуба // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія : Автомобіле- та тракторобудування. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2013. – № 30 (1003). – С. 70–74.

*Здобувач виконав розрахункове дослідження основних техніко-економічних показників і здійснив аналіз результатів польових випробувань колісних тракторів зі ступінчастими механічними трансмісіями.*

15. Бурлыга М. Б. Экспериментальное исследование бесступенчатой гидрообъемно-механической трансмиссии / В. Б. Самородов, Н. А. Митцель, М. Б. Бурлыга // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия : X Междунар. науч.-практ. конф., 17–18 апр. 2015 г. – Новосибирск : Международный научный институт «EDUCATIO», 2015. – № 3 (10), Ч. 4. – С. 6–10.

*Здобувач виконав розрахункове і експериментальне дослідження на лабораторному стенді щодо встановлення достовірності розроблених математичних моделей ГОМТ.*

16. Burlyga M. B. The optimization algorithm in determining the relationship between technical and economic indices of machine-tractor unit with hydrovolumetric-mechanical transmission / V. B. Samorodov, M. B. Burlyga // European Cooperation. – Warszawa : Consilium LLC. – 2016. – Vol. 3 (10). – P. 94–107.

*Здобувач вперше запропонував оптимізаційний алгоритм і його програмну реалізацію щодо визначення взаємозв'язків між основними техніко-економічними показниками МТА з ГОМТ з урахуванням буксування.*

17. Burlyga M. B. Experimental confirmation of the rational change parameter of the hydraulic transmission during acceleration and braking of the hydraulic volume mechanical transmission (HVMT)/ V. Samorodov, A. Kozhushko, N. Mittsel, E. Pelipenko, M. Burlyga // European Cooperation. – Warszawa : Consilium LLC. – 2017. – Vol. 7 (26). – P. 9–24.

*Здобувач проаналізував експериментальні дані, отримані на лабораторному стенді ГОМТ.*

## АНОТАЦІЇ

**Бурлига М. Б. Развитие методов расчета та выбор рациональных схем двухпоточных бесступенчатых гидрообъемно-механических трансмиссий колесных тракторов.** – 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, 2017.

Дисертація присвячена розвитку методів розрахунку для аналізу робочих параметрів безступінчастих ГОМТ і їх основних елементів ГОП, прогнозуванню техніко-економічних показників машинно-тракторного агрегату для визначення раціональних схемних рішень ГОМТ. Актуальність роботи полягає у необхідності забезпечення конкурентоспроможності вітчизняних тракторів.

Здійснено аналіз роботи двопотокових ГОМТ колісних тракторів зарубіжних аналогів. Уточнено на підставі новітніх експериментальних даних щодо втрат і ККД математичну модель об'ємних аксіально-поршневих гідромашин, як основних елементів тракторних ГОМТ. Розроблено алгоритм і обчислювальну процедуру щодо встановлення взаємно однозначної відповідності між робочими параметрами, втратами і ККД ГОП в прямому і зворотному потоках потужності крізь ГОП під час їх роботи у складі двопотокових ГОМТ.

Вперше розроблено розрахунково-теоретичну методику і програмну реалізацію з визначення параметрів ГОП, ГОМТ і основних техніко-економічних показників МТА з урахуванням режимів циркуляції потужності, втрат в ГОП, ГОМТ і буксування трактора для аналізу і прогнозування характеристик альтернативних тракторних ГОМТ та наукового обґрунтування найраціональнішої трансмісії для конкретного трактора.

Вперше вирішено задачу побудови універсальних характеристик тракторів з ГОМТ і візуалізації робочих параметрів ГОМТ у всьому діапазоні експлуатаційних режимів трактора для порівняння альтернативних схемних рішень ГОМТ і вибору найраціональнішого з них. Побудовано універсальні характеристики першого в Україні трактора ХТЗ-21021 з ГОМТ-1С розробки НТУ «ХПІ» і АТ «ХТЗ». За результатами чисельного і натурного експериментів зроблено висновок, що математичні моделі й запропоновані методики є адекватними і спрямованими на підвищення ефективності та конкурентоспроможності вітчизняних тракторів.

*Ключові слова:* трактор, гідрооб'ємний привод, двопотокова безступінчаста гідрооб'ємно-механічна трансмісія, ступінчаста трансмісія, аксіально-поршневі гідромашини, гідронасос, гідромотор.

**Бурлыга М. Б. Развитие методов расчета и выбор рациональных схем двухпоточных бесступенчатых гидрообъемно-механических трансмиссий колесных тракторов.** – 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, 2017.

Диссертация посвящена развитию методов расчета для анализа рабочих параметров бесступенчатых ГОМТ и их основных элементов ГОП, прогнозированию технико-экономических показателей машинно-тракторного агрегата для определения рациональных схемных решений ГОМТ. Актуальность работы заключается в необходимости обеспечения конкурентоспособности отечественных тракторов.

В работе получены универсальные соотношения для объемного и механического КПД объемных гидромашин аксиально-поршневого типа, входящих в состав двухпоточных ГОМТ и работающих в режимах циркуляции мощности. Осуществлен анализ работы двухпоточных ГОМТ тракторов зарубежных аналогов. Уточнена на основании новейших экспериментальных данных по потерям и КПД математическая модель объемных аксиально-поршневых гидромашин, как основных элементов тракторных ГОМТ. С помощью методов оптимизации получены коэффициенты объемных потерь К.И. Городецкого, что позволяет строить более точные универсальные характеристики ГОП и ГОМТ. Обоснована нецелесообразность двухмашинного регулирования ГОП как в прямом, так и в обратном потоках мощности, которое приводит к уменьшению общего КПД ГОП и сужению диапазона нагрузочных моментов на выходном валу регулируемого гидромотора, поэтому не может быть использовано в двухпоточных бесступенчатых ГОМТ на тяговых режимах тракторов.

Впервые разработаны алгоритм и вычислительная процедура по установлению взаимно однозначного соответствия между рабочими параметрами, потерями и КПД ГОП в прямом и обратном потоках мощности через ГОП при ее работе в составе двухпоточных ГОМТ.

Впервые разработана расчетно-теоретическая методика и ее программная реализация по определению параметров ГОП, ГОМТ и основных технико-экономических показателей МТА с учетом режимов циркуляции мощности, потерь в ГОП, ГОМТ и буксования трактора для анализа и прогнозирования характеристик альтернативных тракторных ГОМТ и научного обоснования наиболее рациональной трансмиссии для конкретного трактора.

Впервые поставлена и решена задача построения универсальных характеристик трактора с ГОМТ. Предложено оригинальное решение задачи по визуализации кинематических, силовых и энергетических параметров ГОМТ перспективных украинских тракторов во всем диапазоне их эксплуатационных режимов как важного критерия для сравнения альтернативных схемных решений ГОМТ. Построены универсальные характеристики первого в Украине и на постсоветском пространстве трактора ХТЗ-21021 с бесступенчатой ГОМТ-1С разработки НТУ «ХПИ» и АО «ХТЗ».

Разработан улучшенный критерий эффективности колесных тракторов с ГОМТ, что дает возможность оценить каждую схему с ГОМТ колесного трактора с точки зрения экономической эффективности.

Результаты численного и натурного экспериментов позволяют сделать вывод, что разработанные в диссертации расчетно-теоретические методики и составляющие их математические модели являются адекватными и направлены на повышение эффективности и конкурентоспособности украинских тракторов.

*Ключевые слова:* трактор; гидрообъемный привод, двухпоточная

бесступенчатая гидрообъемно-механическая трансмиссия, ступенчатая трансмиссия, аксиально-поршневые гидромашины, гидронасос, гидромотор.

**Burlyga M. B. Development of calculation methods and choice of wheeled tractors' dual path hydraulic volume mechanical transmissions rational schemes.** – Manuscript.

Thesis for Scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.22.02 – vehicles and tractors. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2017.

The work is devoted to solving the technical problem of development of calculation methods and choice of rational schemes of dual path hydraulic volume mechanical transmission (HVMT) wheeled tractors, which allows you to select the optimal scheme HVMT at the design stage. Actuality of work consists in the necessity of providing of competitiveness of Ukraine tractors. The analysis of work of the dual path HVMT tractors of foreign analogues is carried out. Refined mathematical model of hydrostatic axial-piston hydraulic machines as the main HVMT elements identity-based loss coefficients with the latest experimental data loss and coefficient of performance (COP).

The algorithm and the computational procedure for the establishment of a one-to-one correspondence between the operating parameters and the efficiency of hydraulic drive system (HDS) losses in forward and reverse flow of power through the HDS for her work in the dual path tractor HVMT.

Calculation-theoretical methodology and her programmatic realization is first worked out for determination of HDS parameters, dual path HVMT and basic technical and economic indexes of tractor-aggregate taking into account the modes of circulation of power, losses in HDS, HVMT and skidding of tractor for an analysis and prognostication of descriptions alternative tractor HVMT and scientific ground of the most rational transmission for a certain tractor.

The problem of construction of universal descriptions of tractor is first set and decided with dual path HVMT. Original solution of task offers on visualization of kinematics, power and power parameters of dual path HVMT of the perspective Ukrainian tractors in all range of their operating modes as an important criterion for comparison of alternative schematics of HVMT. Universal descriptions of first in Ukraine and on post-soviet space of tractor of XTZ-21021 from stepless HVMT-1S development of NTU "KhPI" and propulsion MODULE of "XTZ" are built.

Results numeral and natural experiments allow to draw conclusion, that the calculation-theoretical methodologies and constituents of them worked out in dissertation mathematical models are adequate and directed to on an increase efficiency and competitiveness of the Ukrainian tractors.

*Keywords:* tractor, hydraulic drive system, dual path hydraulic volume mechanical transmission, manual transmission, axial-piston hydraulic machines, hydraulic pump, hydraulic motor.





Підписано до друку 16.03, 2018 р. Формат 60 × 90/16. Папір друкарський.  
Гарнітура Times New Roman Суг. Друк ризограф.  
Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим.  
Замовлення № 18331

---

Віддруковано у видавничому відділі Кременчуцького національного  
університету  
імені Михайла Остроградського,  
39600, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20  
Реєстраційне свідоцтво серії ДК №4837 від 22.01.2015 р.