

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**РОГОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 621.83.062.1

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМ  
“ДВИГУН-ТРАНСМІСІЯ” АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" (НТУ „ХПІ”) Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Самородов Вадим Борисович**,  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",  
завідувач кафедрою автомобіле- і тракторобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Лебедєв Анатолій Тихонович**,  
Харківський національний технічний університет сільського господарства,  
завідувач кафедрою „Трактори та автомобілі”

кандидат технічних наук  
**Аврунін Григорій Аврамович**,  
Казенне підприємство “Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова”,  
заступник головного конструктора

**Провідна установа** Східноукраїнський національний університет імені В.І. Даля, кафедра “Автомобілі” Міністерства освіти і науки України, м. Луганськ.

Захист відбудеться 1 березня 2006 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

Автореферат розісланий 27 січня 2006 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Наглюк І.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Трансмісія є невід'ємною частиною кожного транспортного засобу, що істотно впливає на технічні характеристики машини, її ергономічність, паливну економічність і екологічні показники. Процес проектування трансмісій вимагає ретельної цілеспрямованої дослідницької роботи ще на етапі вибору типу трансмісії, її кінематичної схеми і конструктивних параметрів. Недооцінка важливості і необхідності розрахунково-теоретичних попередніх досліджень приводить до загального зниження техніко-економічних показників машини, передчасного вироблення ресурсу двигуна та незручності керування. Достовірне теоретичне обґрунтування типу схеми і конструктивних параметрів трансмісії дозволяють істотно знизити державні витрати на створення і доведення трансмісії, забезпечити конкурентні переваги національних зразків автотракторної техніки та підвищити рентабельність машинобудівних підприємств.

В практиці машинобудівних підприємств використовувалися методики аналізу трансмісій, що зводилися до складання системи кінематичних і силових рівнянь. При цьому вносились допущення і спрощення, що істотно знижували адекватність отриманої математичної моделі, такі як сталість напрямку потоку потужності в зубцюватому зачепленні або постійний гідромеханічний і об'ємний ККД гідрооб'ємних передач (ГОП). У результаті отримувалась математична модель, придатна тільки для приблизних оцінних розрахунків конкретної розроблювальної трансмісії. Використання подібних методик створювало несприятливі умови для дослідження варіантів конструктивних рішень з метою підвищення технічних характеристик трансмісії і транспортного засобу в цілому. Виходячи з дослідження досвіду впровадження гідрооб'ємних механізмів повороту (ГОМП) для гусеничних машин та гідрооб'ємно-механічних трансмісій (ГОМТ) для колісної сільськогосподарської техніки у країнах Західної Європи і США, зроблено висновок про те, що використання ГОМП і ГОМТ в зразках вітчизняної техніки є перспективним шляхом підвищення її ефективності.

Використання ГОМТ для колісної техніки, які безступінчато регулюють швидкість прямолінійного руху машини, навіть незважаючи на знижений ККД, може виявитися доцільним з погляду зручності керування і можливості установки двигуна в постійний режим мінімальної витрати палива. Величезний науково-технічний інтерес у цьому змісті представляють уперше створені в Україні ГОП на базі гідромашин радіально-поршневого (РПГМ) типу з кульовими поршнями, які можуть використовуватись у складі ГОМТ та ГОМП. В останні роки рішення проблеми використання ГОП у трансмісіях колісних і гусеничних тракторів, комбайнів, навантажувачів, дорожньо-будівельних машин одержала свій розвиток у роботах відомих українських і закордонних учених (Башта Т.М., Александров Є.Є., Самородов В.Б., Лебедев А.Т., Назаров Л.В., Григоров О.В., Городецький К.І., Пономаренко Ю.Ф., Прокофьев В.М.,

Кисточкін Є.С.), а також ведучих конструкторів і фахівців (Борисюк М.Д., Аврунін Г.А., Завадський А.М., Пономарьов Є.П., Забелишинський З. Е., Кононенко В.О.) як в області створення ГОМТ, так і в сфері розробки об'ємних гідромашин і ГОП.

Актуальність дисертаційної роботи складається в необхідності модифікації існуючих і розробки перспективних трансмісій для вітчизняної автотракторної техніки на основі розвитку розрахунково-теоретичних методів аналізу систем "двигун-трансмісія". Це досягається шляхом розвитку методики складання математичної моделі трансмісії довільної структури і аналізу руху транспортного засобу в широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана відповідно до направленості держбюджетної наукової роботи кафедри "Автомобіле- і тракторобудування" за темою М2601 "Разработка научных основ синтеза трансмиссий и адаптивных тормозных систем транспортных машин в агропромышленном комплексе Украины" (д/р № 0104U003359) та госпдоговорів: №26950 "Структурний і параметричний синтез раціональної схеми ГОМТ для лісогосподарського трактора" – замовник ДП „Завод ім. Малишева”, №26947 "Синтез раціональних конструктивних параметрів гідрооб'ємного механізму повороту (ГОМП) і серійного механізму повороту гусеничних тракторів" – замовник ВАТ „ХТЗ ім. С. Орджонікідзе”, №11/4 "Вибір оптимальних характеристик механізму повороту і типорозміру гідрооб'ємної передачі для "виробу 71" – замовник ВАТ „ХТЗ ім. С. Орджонікідзе”.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дисертації є розвиток методів моделювання ступінчастих механічних і безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісій, спрямованих на модернізацію і створення перспективних систем "двигун-трансмісія". Досягнення мети дослідження викликало необхідність постанови та вирішення наступних задач:

- розвиток методики матричного аналізу трансмісій шляхом введення нових структурних елементів: ГОП із двомашинним регулюванням, гальмових елементів і обгінних муфт; розробки методики щільного упакування формальних силових невідомих у повних матричних системах трансмісій;

- розробка системи проектування довільних трансмісій транспортних засобів на рівні структури і вибору конструктивних параметрів системи "двигун-трансмісія";

- розробка аналітичної математичної моделі об'ємних і гідромеханічних втрат і ККД перспективних радіально-поршневих гідрооб'ємних передач з кульовими поршнями як елементів гідрооб'ємно-механічних трансмісій і гідрооб'ємних механізмів повороту; порівняння результатів моделювання втрат і ККД з експериментальними даними;

- розробка методики динамічного аналізу системи "двигун-трансмісія" і системи підресорювання при русі транспортного засобу по довільній поверхні у виді гладкої безперервної тривимірної функції в загальному випадку нерів-

номірного повороту як при використанні ступінчастих механічних, так і безступінчастих гідروоб'ємно-механічних трансмісій.

*Об'єктом дослідження* є процес розвитку й удосконалювання методів розрахунку й адекватних математичних моделей ступінчастих механічних і гідрооб'ємно-механічних трансмісій з наступним статичним і динамічним аналізом систем “двигун-трансмісія” і вибором раціональних параметрів. *Предметом дослідження* – взаємозв'язки кінематичних, силових і енергетичних характеристик у системах “двигун-трансмісія” для перспективних автомобілів і тракторів.

*Методи дослідження.* Теоретичною та методологічною основою дослідження є основні положення теоретичної механіки, наукові праці видатних розробників трансмісій.

Для вирішення поставлених задач застосувались методи матричної алгебри для розвитку методики матричного математичного моделювання трансмісій, теорія оптимізації для ідентифікації емпіричних коефіцієнтів в моделі ГОП, числові методи інтегрування для отримання результатів математичного моделювання системи “двигун-трансмісія”, диференціальне та інтегральне числення для розробки аналітичної математичної моделі ГОП з кульовими поршнями, об'єктно-орієнтоване програмування для створення комп'ютерної реалізації розроблених методик.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

*вперше*

- одержані аналітичні взаємозв'язки між кінематичними та навантажувальними параметрами роботи радіально-поршневих гідрооб'ємних передач з кульовими поршнями та механічними й об'ємними втратами в них.

*набули подальшого розвитку та удосконалені:*

- методичні основи матричного аналізу трансмісій за рахунок уведення базисних матриць нових структурних елементів;
- методичні основи динамічного аналізу системи “двигун-трансмісія” за рахунок розширення аналізованих режимів руху транспортного засобу;
- методичні основи побудови повних матричних математичних моделей трансмісій за допомогою щільного упакування формальних силових невідомих.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що робота дає сучасну універсальну математичну модель складної технічної системи “двигун-трансмісія”, на основі якої моделюються основні робочі процеси в загальному випадку нерівномірного руху в тривимірному просторі по заданій поверхні; модель реалізується розробленим програмним продуктом TRANS з розвитим професійно орієнтованим інтерфейсом. На основі розробленої аналітичної математичної моделі ГОП-900 оцінені її кінематичні, силові й енергетичні параметри у виді універсальних характеристик для декількох варіантів конструктивних реалізацій РПГМ з кульовими поршнями та видані рекомендації

дації з раціональної множини конструктивних параметрів, що забезпечують максимальний ККД ГОП при заданому робочому об'ємі.

Результати дисертаційної роботи використовувалися: для створення структурної і кінематичної схеми ГОМТ перспективного лісотехнічного трактора класу 1,4 виробництва ДП "Завод ім. В.О. Малишева" і вибору раціональних конструктивних параметрів трансмісії; для модифікації трансмісії спеціальної гусеничної машини виробництва ВАТ "ХТЗ ім. С. Орджонікідзе" шляхом впровадження в її склад ГОМП і вибору раціональних передатних відносин редукторів і робочого об'єму ГОП; для проведення комплексного аналізу кінематичних, силових і енергетичних характеристик системи "двигун-трансмісія" перспективного гусеничного трактора ХТЗ-200 із установленим ГОМП.

Практична цінність дисертаційної роботи підтверджена п'ятьма актами про впровадження результатів у розрахункову практику ВАТ "ХТЗ ім. С. Орджонікідзе", Дніпропетровського тракторного заводу, ХК "АвтоКрАЗ"; в навчальний процес НТУ "ХП" та Національного гірничого університету.

**Особистий внесок здобувача** в опублікованих у співавторстві роботах полягає в наступному: у роботі [1] дисертантові належить розробка структури і функціональної схеми програмної реалізації методики матричного аналізу трансмісій; у роботах [2, 9] - математичне моделювання руху колісного трактора з ГОМТ та одержання результатів; у роботі [3] – одержання результатів моделювання роботи трансмісії з використанням уточненої методики визначення втрат в планетарних рядах; у роботах [4, 5, 7, 14] - одержання результатів математичного моделювання статичних та динамічних режимів системи „двигун-трансмісія” для гусеничних машин з ГОМТ; у роботі [6] - програмна реалізація методики визначення механічних втрат у радіально-поршневих ГОП з кульовими поршнями; у роботі [8] - розробка методики динамічного аналізу системи "двигун-трансмісія" у режимі гальмування й одержання результатів моделювання; у роботі [10] – розробка принципів та алгоритмів роботи системи автоматичного регулювання ГОМТ та одержання результатів моделювання роботи даної системи; у роботі [11] – критичний аналіз розрахунково теоретичних методів аналізу та синтезу сучасних трансмісій з метою постановки задач дослідження; у роботі [12] – розробка методики щільного упакування формальних силових невідомих в повних матричних моделях ГОМТ та порівняльний аналіз ефективності наведеної методики; у роботі [13] - розробка методики динамічного аналізу системи "двигун-трансмісія" при моделюванні нерівномірного повороту транспортного засобу по заданій довільній поверхні та одержання результатів моделювання; у роботі [16] - розробка аналітичної математичної моделі об'ємних і механічних втрат у радіально-поршневих ГОП з кульовими поршнями й ідентифікація емпіричних коефіцієнтів на основі отриманих експериментальних даних;

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні положення дослідження та одержані практичні результати доповідалися та обговорювалися

на 6-ій міжнародній науково-методичній конференції "Сучасні технології, економіка та екологія в промисловості, на транспорті та в сільському господарстві" (Алушта, 2000); міжнародній науково-технічній конференції "Теорія і практика розробки колісних і гусеничних машин спеціального призначення" (Алушта, 2000); всеукраїнській науково-технічній конференції "Проблеми створення нових машин і технологій" (Кременчук 2002, 2003); міжнародній науково-технічній конференції "Автомобільний транспорт в XXI столітті" (Харків, ХНАДУ, 2003); VII міжнародній науково-технічній конференції "Автомобільний транспорт: проблеми та перспективи" (Севастополь, 2004); наукових конференціях професорсько-викладацького складу Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (2000-2004).

У повному обсязі дисертація доповідалася і була схвалена на науковому семінарі кафедри автомобіле- і тракторобудування (НТУ "ХПІ", 2005).

**Публікації.** За темою дослідження опубліковано 16 наукових статей, що надруковані в наукових виданнях, визнаних ВАК України фаховими за технічними спеціальностями.

**Структура і обсяг роботи** – дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатка. Повний обсяг роботи складає 168 сторінок, 45 рисунків на 24 сторінках, 4 таблиць на 3 сторінках, 1 додатка на 10 сторінках. Список використаних джерел налічує 115 найменувань на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету та задачі дослідження, сформульовані об'єкт і предмет дослідження, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено огляд використовуваних трансмісій у закордонних і вітчизняних зразках автотракторної і спеціальної гусеничної техніки. Відзначено, що в закордонній техніці вже тривалий час використовуються трансмісії, що забезпечують безступінчасте регулювання швидкості прямолінійного руху машини і повороту, у той час як для вітчизняних транспортних засобів у більшості випадків застосовуються малоефективні ступінчасті механічні трансмісії (СМТ), як в автомобілях, так і в тракторах з використанням диференціальних механізмів вально-редукторного типу. Основними аргументами для впровадження таких трансмісій в усі транспортні засоби, у тому числі і гусеничні, відносна простота технології виготовлення, низька вартість та відносно високий ККД. Виходячи з цього, у дисертаційній роботі приведені достоїнства і недоліки застосування ГОМТ і ГОМП в автотракторній техніці. Звернено увагу на підприємства України, що почали виробництво гусеничних тракторів і спеціальних гусеничних машин з безступінчастим регулюванням радіуса повороту. Визначено, що розрахунково-теоретичні дослідження пов'язані з проектуванням трансмісій зі складною

структурою, ускладнені застосуванням існуючих донедавна методик моделювання і динамічного аналізу системи "двигун-трансмсія".

Перспективною, з погляду універсальності і можливості реалізації за допомогою обчислювальної техніки, є методика матричного аналізу трансмісій, докладно розглянута й удосконалена в роботах Самородова В.Б. Дана методика володіє низкою істотних достоїнств: автоматизована побудова математичної моделі трансмісії довільної структури на основі кінематичної схеми, блочно-модульна структура, що дозволяє розвивати та доповнювати математичну модель за рахунок уведення нових структурних елементів і удосконалення математичних моделей існуючих; можливість проведення статичного і динамічного аналізу роботи трансмісії у всіх режимах, а також пошуку за допомогою методів оптимізації раціональної множини конструктивних параметрів. У дисертації дана методика обрана в якості базової.

Адекватність математичної моделі ГОМТ залежить від точності математичних моделей усіх механізмів і агрегатів (елементів), що входять до складу трансмісії. Особливо важлива наявність коректної моделі ГОП, як основного агрегату, що забезпечує сам принцип безступінчастого регулювання і, таким чином, функціональність усієї трансмісії. Точність математичної моделі ГОМТ істотно залежить від точності математичної моделі ГОП, тому моделювання роботи безступінчастої трансмісії не може розглядатися окремо від моделювання роботи ГОП.

Кінематичні і навантажувальні режими роботи трансмісій тісно зв'язані з характеристиками транспортного засобу й умовами роботи. Кінцевою метою моделювання роботи трансмісії є підвищення ефективності всього транспортного засобу, а не тільки забезпечення працездатності трансмісії. Відповідність трансмісії експлуатаційним режимам транспортного засобу, надійність і раціональність її конструкції – лише складові загальної ефективності машини; іншими складовими є масово-габаритні характеристики, тип використовуваного рушія, характеристики двигуна. Немаловажним є ергономічність і зручність керування транспортним засобом, що також у більшій мірі забезпечується застосуванням безступінчастих трансмісій. Для оцінки загальної ефективності транспортного засобу необхідно також володіти методиками визначення активного моменту на колінчатому валові двигуна, моментів навантаження на ведучих колесах у залежності від умов руху і роботи. Таким чином, моделювання роботи трансмісії невід'ємно від моделювання роботи двигуна і руху транспортного засобу. У зв'язку з цим, у дисертації об'єднані в одну загальну методику розрахунку систем "двигун-трансмсія" методика матричного аналізу трансмісій, математичні моделі перспективних ГОП, а також методика моделювання руху транспортного засобу в тривимірному просторі по опорній поверхні з заданим макропрофілем.

Проведений аналіз дає можливість обґрунтувати необхідність розвитку нових прогресивних і універсальних методик математичного моделювання трансмісій довільної структури.



У другому розділі обґрунтовано необхідність уведення у методику матричного аналізу трансмісії базисних матриць нових структурних елементів: гальмового елемента, що приймає участь у зниженні швидкості транспортного засобу, обгінних муфт, ГОП із двомашинним регулюванням і гідросистеми, що складається з одного насоса і декількох гідромоторів.

Уведення в методику матричного аналізу трансмісії базисної матриці гальмового елемента, що приймає участь у зниженні швидкості руху транспортного засобу, дозволяє проводити динамічний аналіз системи “двигун-трансмісія” у режимі гальмування, оцінювати навантаження на елементах трансмісії та інтенсивність тепловиділень для проектування гальмових систем, систем тепловідводу та охолодження.

У розвиток існуючої методики матричного моделювання трансмісії з використанням матричної алгебри та теоретичної механіки наведено матричні рівняння гальмового елемента для випадків гальмування машини з кінематичним відривом двигуна від ведучих коліс (1) і гальмування двигуном (2):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & I_T & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} M^T = \begin{bmatrix} \omega_T \\ M_T \end{bmatrix}; \quad (1) \quad I_T \cdot \dot{\omega} M^T = M_T; \quad (2)$$

$$M_T = M_{T0}(t) \cdot \text{sign}(-\omega_T), \quad (3)$$

де  $I_T$  - момент інерції гальмової ланки,  $M_T$  - момент, створюваний керуючим гальмовим елементом;  $M_{T0}(t) > 0$  - абсолютна величина гальмового моменту;  $\omega$ ,  $\dot{\omega}$  - кутова швидкість та кутове прискорення гальмової ланки.

На основі побудованих матричних рівнянь (1), (2) побудовано повну матричну математичну модель (4), що містить у своєму складі базисне матричне рівняння гальмового елемента (1):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega}_3 \\ M_1 \\ M_{1A} \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_5 \\ M_6 \\ M_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_D \\ 0 \\ \omega_T \\ 0 \\ 0 \\ M_D \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ M_X \\ M_T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $M_{1A}$  – активний момент на валу ДВЗ [Н·м];  $\dot{\omega}_1 \dots \dot{\omega}_3$  - кутові прискорення ланок трансмісії [рад/с<sup>2</sup>];  $\omega_D$ ,  $\omega_T$  – кутова швидкість колінчатого валу ДВЗ та

гальмового елементу, що визначаються в процесі числового інтегрування під час динамічного моделювання роботи системи “двигун-трансмсія” [рад/с];  $M_D$  – момент двигуна з зовнішньої характеристики як функція від кутової швидкості  $\omega_D$  [Н·м];  $M_X$  – момент навантаження від ведучих коліс [Н·м]. Запропоноване введення гальмового елементу як нової структурної складової матричного аналізу дозволяє аналізувати різноманітні режими: гальмування транспортного засобу у випадку кінематичного відокремлення двигуна від ведучих коліс; одночасного гальмування за рахунок моменту тертя двигуна у режимі припинення паливоподачі та зміни параметру регулювання ГОП у складі трансмісії.

Відомо, що в деякі конструкції трансмісій входять обгінні муфти, які на цей час не були охоплені методикою матричного аналізу, що в визначеній мірі стримує їх застосування в перспективних трансмісіях. Тому математичне моделювання трансмісій, у склад яких входять обгінні муфти, потребує удосконалення методики трансмісійного матричного моделювання у зв’язку з невизначеністю режимів роботи обгінних муфт ще до етапу побудови повної математичної моделі трансмісії. Режим роботи обгінної муфти впливає на розмір її базисної матриці та залежить від співвідношення кутових швидкостей елементів муфти, що отримуються в результаті вирішення матричної моделі трансмісії. У випадку передачі потужності обгінною муфтою базисна матриця представляється у вигляді (5), базисна матриця обгінної муфти у нейтральному стані має вид (6).

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \omega_1 \quad \omega_2 \quad M_1 \quad M_2^T = 0; \quad (5) \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} = 0, \quad (6)$$

де  $\omega_1, \omega_2$  – кутові швидкості ланок обгінної муфти [рад/с];  $M_1, M_2$  – моменти на ланках обгінної муфти [Н·м].

З матричних рівнянь (5) та (6) видно, що кількість кінематичних рівнянь в моделі трансмісії залежить від кількості обгінних муфт у робочому режимі. Встановлено, що коректна побудова матричної моделі трансмісії можлива за наступних умов: кількість обгінних муфт у робочому режимі забезпечує замкненість матричної системи; отримані в результаті вирішення цієї системи кутові швидкості ланок трансмісії відповідають конструктивним параметрам обгінних муфт.

Для виконання вищезазначених умов автором із застосуванням методів комбінаторики розроблено алгоритм, який забезпечує замкненість статичної матричної системи трансмісії, до складу якої входять обгінні муфти.

З метою дослідження доцільності використання ГОП з двомашинним регулюванням у дисертації запропоновано модифіковану базисну матрицю ГОП для загального випадку двох регульованих гідромашин з різним робочим об’ємом.

На основі проведеного аналізу структурних схем ГОМТ для автотракторних засобів виявлено наявність гідравлічних систем, що складаються з

насосу та декількох гідромоторів. З метою аналізу ефективності використання подібних гідросистем в автотракторній техніці розроблено базисні матриці насоса і гідромоторів, що входять у єдину гідросистему й алгоритм по введенню даних матриць у повну математичну модель трансмісії.

$$\begin{bmatrix} -e_0 q_0 & 0 & 0 & -\frac{k_y}{\nu} \left( 1 + n + C_y \sum_{i=0}^n \omega_{i0} \right) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -e_0 q_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_\Phi \\ M_0 \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta M(e_0, q_0, \omega_{00}, \Delta p_0) \text{sign} \omega_{00} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} e_i q_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -e_i q_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_i \\ M_i \\ M_{\Phi i} \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta M(e_i, q_i, \omega_{i0}, \Delta p_0) \text{sign} \omega_{i0} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де  $e_0, e_i$  – параметри регулювання насосу та  $n$  гідромоторів;  $q, q_i$  – продуктивність насосу та  $n$  гідромоторів [ $\text{м}^3/\text{рад}$ ];  $k_y$  – коефіцієнт виток за рахунок перепаду тиску [ $\text{рад}$ ];  $\nu$  – динамічна в'язкість робочої рідини [ $\text{Па} \cdot \text{с}$ ];  $C_y$  – коефіцієнт виток за рахунок кутової швидкості [ $\text{с}/\text{рад}$ ];  $\omega_0, \omega_i$  – кутова швидкість обертання валів насосу та  $n$  гідромоторів [ $\text{рад}/\text{с}$ ];  $M_0, M_i$  – моменти навантаження на насосі та гідромоторах [ $\text{Н} \cdot \text{м}$ ];  $\Delta p$  – перепад тиску в гідросистемі [ $\text{Па}$ ];  $\omega_\Phi, M_{\Phi i}$  – формальна кутова швидкість обертання та моменти на ланці, що поєднує гідромашини;  $\Delta M$  – момент втрат у гідромашині як функція від поточного параметру регулювання  $e_i$ , продуктивності  $q_i$ , кутової швидкості  $\omega_{i0}$  валу гідромашини та перепаду тиску  $\Delta p_0$  в гідросистемі, отриманих на попередній ітерації [ $\text{Н} \cdot \text{м}$ ].

Введення в методику матричного аналізу базисних матричних рівнянь ГОП із двомашинним регулюванням як у моноблочному, так і в роздільному виконанні дозволяє досліджувати ефективність даних агрегатів і систем у складі досліджуваної ГОМТ і обґрунтовано приймати рішення про доцільність використання ГОП в одному з трьох варіантів: 1) моноблочна ГОП з нерегульованим гідромотором; 2) моноблочна ГОП із двомашинним регулюванням; 3) ГОП у виді роздільної системи "насос - кілька гідромоторів".

За допомогою базисних рівнянь (7) – (8) проаналізовано ГОМТ трактора Fendt виробництва Німеччини, що використовує двомашинне регулювання, у результаті аналізу обґрунтовано недоцільність зменшення параметра регулювання другої гідромашини та використання роздільної гідросистеми.

На основі фізичних процесів, що протікають у трансмісії, запропоновано методику щільного упакування формальних силових невідомих, що дозволяє в середньому в 1,45 рази підвищити ефективність проведення статичного і динамічного аналізу системи "двигун-трансмісія". Проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованої методики для трансмісій різних транспортних засобів (див. табл. 1).

**Порівняльний аналіз ефективності методики щільного упакування**

Трансмiсія транспортного засобу	Ранг матричної системи		Зниження рангу матриці	Пiдвищення ефективності розрахунку
	вихідний	щільне упакування		
Трактор ХТЗ-200	93	72	1,29	1,67
КрАЗ-64431	64	53	1,21	1,46
БМП М113	82	69	1,19	1,41
Трактор Fendt-Vario	32	27	1,19	1,41
МТ-ЛБ	80	64	1,25	1,56
Трактор ЛТ-60	43	36	1,19	1,41

Таким чином, у відповідності до задач дослідження удосконалено методику матричного аналізу ступінчастих механічних і гідро-об'ємно-механічних трансмісій за допомогою введення базисних матриць нових структурних елементів, таких як обгінна муфта, ГОП з двомашинним регулюванням, гідросистема, гальмовий елемент. Запропоноване удосконалення дозволяє проводити статичний та динамічний аналіз трансмісій, у склад яких входять нові структурні елементи.

У третьому розділі представлена аналітична математична модель об'ємних та гідромеханічних втрат в РПГМ з кульовими поршнями; побудовано універсальні характеристики (УХ) ГОП; досліджено вплив конструктивних параметрів ГОП із заданим робочим об'ємом на максимальний ККД та видані рекомендації щодо використання РПГМ в автотракторній галузі.

У ході дослідження зроблено висновок про необхідність приведення диференціальної математичної моделі об'ємних та механічних втрат в РПГМ до аналітичного виду з метою одержання компактної та функціональної моделі. На основі вихідної диференціальної математичної моделі за допомогою методів тригонометрії, аналітичного інтегрування та оптимізації багатовимірної функції автором запропоновано в дисертації аналітичну математичну модель, що дозволяє підвищити ефективність дослідницьких робіт, а також проводити ідентифікацію емпіричних коефіцієнтів на підставі експериментальних даних. Для застосування запропонованої математичної моделі розроблено методику розрахунку витоків і моментів втрат в одній РПГМ. На підставі експериментальних даних, що були отримані силами КП „ХКБМ ім. О.О. Морозова”, ідентифіковані коефіцієнти компонент витоків, оцінено погрішність отриманої математичної моделі по ККД, яка складає 5%.

Дослідження РПГМ із кульовими поршнями дозволило зробити важливий висновок стосовно того, що об'ємні втрати у РПГМ з кульовими поршнями не залежать від ексцентриситету, на відміну від аксіально- та радіально-плунжерних гідромашин. З метою обґрунтування доцільності використання подібних гідромашин в автотракторній техніці з використанням розробленої та ідентифікованої аналітичної математичної моделі РПГМ на основі методики побудови УХ отримані дані характеристики РПГМ із кульовими поршнями для різної кількості і діаметра поршнів-куль і різних робочих об'ємів гідромашин. УХ для ГОП-900 та радіально-поршневої ГОП з робочим об'ємом  $89 \text{ см}^3$  наведено на рис. 1.

а) б)

Рис. 1. Універсальні характеристики ГОП-900 (а) та радіально-поршневої ГОП з кульовими поршнями робочого об'єму  $89 \text{ см}^3$  (б)

На підставі аналізу отриманих характеристик розроблено рекомендації з вибору конструктивних параметрів гідромашин, що забезпечують максимальний ККД при заданому робочому об'ємі; виявлено особливості та зроблено висновок про можливість застосування подібних ГОП у трансмісіях автотракторної техніки.

**У четвертому розділі** удосконалено методику динамічного аналізу системи "двигун-трансмсія" для загального випадку нерівномірного повороту в тривимірному просторі по заданій поверхні з урахуванням макропрофілю поверхні, характеристик двигуна, об'ємних і механічних втрат у трансмісії, конструктивних параметрів системи підресорювання, масово-габаритних характеристик транспортного засобу в цілому і реакцій під опорними катками машини, що змінюються в часі. Дослідження показали, що динаміка системи "двигун-трансмсія" раніше моделювалася лише для випадку руху транспортного засобу по ідеальній пласкій поверхні, при цьому не враховувались коливання корпусу машини та вплив системи підресорювання. Застосування

такої методики знижує адекватність процесу моделювання; автором запропоновано врахування впливу зазначених чинників на моменти опору руху та повороту. Відповідно до цього, у дисертації розроблено модифіковану методику визначення моментів навантаження на ведучих колесах з урахуванням різних реакцій під опорними катками, зсуву полюса повороту, наявності відцентрових сил у випадку повороту і гравітаційних складових у випадку зміни орієнтації корпусу машини в просторі. Сили, що діють на машину в режимі нерівномірного повороту на довільній поверхні, напрямки осей абсолютної і переносної систем координат і кутів повороту корпусу машини наведені на рис. 2.

Рис. 2. Розрахункова схема для моделювання руху машини в тривимірному просторі

На рис. 2  $x, y, z$  – напрямки осей абсолютної системи координат;  $x_1, y_1, z_1$  – напрямки осей переносної системи координат, зв'язаної з геометричним центром машини  $O$ ;  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  – кути повороту машини навколо осей  $x_1, y_1, z_1$ ;  $L, B, H$  – довжина опорної галузі, колія і висота центра мас транспортного засобу;  $C(x_g; y_g; z_g)$  – центр мас машини;  $F_{\text{слев}}, F_{\text{спр}}$  – сили опору руху на лівій і правій гусениці;  $F_{\text{хлев}}, F_{\text{хпр}}$  – рушійні сили на гусеницях;  $G_x, G_y, G_z$  – компоненти вектора сили ваги в переносній системі координат;  $O_p, O_1, O_2$  – полюси повороту машини, лівої і правої гусениці;  $F_x$  – сила інерції;  $F_y$  – відцентрова сила;  $N_1, N_2 \dots N_L$  – реакції опорних катків;  $N_{\text{лев}}, N_{\text{пр}}$  – сумарні реакції опорних катків на левом і правом борту;  $x_0$  – абсолютний зсув полюса повороту.

У дослідженні запропонована динамічна модель взаємодії корпусу машини, катків з їхніми підвісками і ґрунту (рис. 3).

На рис. 3  $P_i(x_{pi}; y_{pi}; 0)$  – точка підвісу  $i$ -го катка;  $r_0$  – радіус катка;  $h_d$  – динамічний хід підвіски;  $d_k$  – хід катка;  $z_d$  – глибина занурення гусениці під

катком в ґрунт;  $S_i$  – сила опору поперечному зсуву гусениці під і-м катком;  $F_r$  – реакція катка на ґрунт і транспортний засіб;  $F_g$  – реакція ґрунту на каток.

Рис. 3. Розрахункова схема взаємодії корпусу, опорних катків і ґрунту

Для переводу векторів сил у тривимірному просторі з абсолютної в переносну систему координат і назад використовувалися матриці  $M$  і  $M^{-1}$  (9) послідовного повороту на кути  $\alpha_z; \alpha_y; \alpha_x$ :

$$M = \begin{bmatrix} \cos \alpha_y \cos \alpha_z & -\cos \alpha_y \sin \alpha_z & \sin \alpha_y \\ \sin \alpha_x \sin \alpha_y \cos \alpha_z + \cos \alpha_x \sin \alpha_z & -\sin \alpha_x \sin \alpha_y \sin \alpha_z + \cos \alpha_x \cos \alpha_z & -\sin \alpha_x \cos \alpha_y \\ -\cos \alpha_x \sin \alpha_y \cos \alpha_z + \sin \alpha_x \sin \alpha_z & \cos \alpha_x \sin \alpha_y \sin \alpha_z + \sin \alpha_x \cos \alpha_z & \cos \alpha_x \cos \alpha_y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Реакція  $F_{Ri}$  і-го опорного катка на корпус машини визначається, виходячи з відносної координати  $d_{ki}$  центра катка щодо положення повного вивішування  $(x_{pi}; y_{pi}; -h_d)$  і швидкості переміщення катка  $\dot{d}_{ki}$ :

$$F_{Ri} = d_{ki} C_0 + C_1 (\text{sign}(\dot{d}_{ki})) \dot{d}_{ki} + R_g(z_{di}), \quad (10)$$

де  $C_0$  - пружність підвіски [Н/м];  $C_1$  - коефіцієнт демпфірування підвіски, що залежить від напрямку переміщення катка [Н/м·с];  $R_g$  - реакція ґрунту, що залежить від занурення гусениці під катком в ґрунт [Н]:

$$R_g(z_{di}) = \begin{cases} -\dot{d}_{ki} \cdot C_{1g} + z_{di} m g n^{-1} z_{d\max}^{-1}, & \dot{d}_{ki} < 0 \\ z_{di} m g n^{-1} z_{d\max}^{-1}, & \dot{d}_{ki} \geq 0 \end{cases}; \quad (11) \quad z_{di} = z_{ai} - Z(x_{ai}; y_{ai}) \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x_{ai} \\ y_{ai} \\ z_{ai} \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} x_{pi} \\ y_{pi} \\ h_d + r_0 - d_{ki} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

де  $C_{1g}$  - коефіцієнт демпфірування ґрунту [Н/м·с];  $m$  - маса машини [кг];  $n$  - кількість катків;  $z_{d\max}$  - максимально припустиме занурення гусениці в ґрунт, що залежить від характеристик ґрунту і гусениці [м];  $(x_{ai}; y_{ai}; z_{ai})$  - абсолютні координати точки торкання ґрунту для і-го катка [м];  $(x_0; y_0; z_0)$  - координати геометричного центру мас в абсолютній системі [м];  $Z$  - функція поверхні, що визначає висоту підйому кожної точки поверхні над нульовим рівнем [м]. У складі запропонованої математичної моделі руху машини розроблено методику моделювання заданої поверхні у виді тривимірної гладкої безперервної функції кожного фрагменту як квадрату зі стороною  $\Delta$ :

$$Z(x, y) = Z_{ij}(x - i\Delta, y - j\Delta); i = \lfloor x\Delta^{-1} \rfloor; j = \lfloor y\Delta^{-1} \rfloor \quad (14)$$

$$Z_{ij}(x, y) = a_{0ij} + a_{1ij}x + a_{2ij}y + a_{3ij}x^2 + a_{4ij}xy + a_{5ij}y^2 + a_{6ij}x^2y + a_{7ij}xy^2, \quad (15)$$

яка автоматизованим чином генерується на підставі координат вузлових точок топографічної сітки, що накладається на поверхню. Параметри  $a_0 \dots a_7$  визначаються з лінійної системи рівнянь (16), у яку входять висоти  $z_1 \dots z_4$  точок у вузлах кожного квадрата зі стороною  $\Delta$  і похідних  $d_{12}, d_{13}, d_{24}, d_{34}$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta & 0 & 0 & \Delta^2 & 0 & 0 \\ 1 & \Delta & \Delta & \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta^2 & \Delta^3 & \Delta^3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \Delta & 0 & \Delta^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta & 0 & 0 & \Delta^2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -2\Delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -\Delta & -2\Delta & -\Delta^2 & -2\Delta^2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ d_{12} \\ d_{13} \\ d_{24} \\ d_{34} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Приклад побудови поверхні показаний на рис. 4.

Рис. 4. Розрахункова схема та результат побудови опорної поверхні

Також у четвертому розділі наведено практичне застосування прикладних результатів дисертаційної роботи для статичного і динамічного аналізу, вибору раціональної множини передатних відносин, модифікації і розробки трансмісій транспортних засобів виробництва ВАТ "ХТЗ" і ДП "Завод ім. Малишева". Проведено порівняння даних по ходових іспитах спеціальної гусеничної машини виробництва ВАТ "ХТЗ" і результатів математичного моделювання руху цієї машини; доведено адекватність удосконалених та розроблених автором методик.

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки дослідження й навести кінцеві результати роботи:



1. Застосування безступінчастих трансмісій дозволяє підвищити ефективність вітчизняної автотракторної техніки. Аналогічні трансмісії в теперішній час використовуються на провідних машинобудівних підприємствах України.

2. Для ефективного проектування й аналізу роботи ГОМТ у складі системи “двигун-трансмісія” з’явилась необхідність розвитку існуючих розрахунково-теоретичних методик.

3. Використання РПГМ з кульовими поршнями в автотракторній техніці перспективно через їх кращі масово-габаритні показники та питому потужність, що пропускається. У дисертації розроблена аналітична математична модель РПГМ.

4. Кінцевою метою моделювання й аналізу роботи трансмісії є підвищення технічних характеристик машини в цілому. Дослідження трансмісій повинно бути пов’язано з одночасним моделюванням роботи двигуна, рушія, системи підресорювання, зовнішніх навантажень, що з’являються при русі машини.

5. Методики, що пропонуються в дисертаційній роботі, можуть бути застосовані як до колісних, так і до гусеничних машин.

6. Використання запропонованих методик дозволяє ще на етапі проектування виявити та усунути недоліки в конструкції трансмісії, а також обґрунтовано вибрати раціональні параметри, що забезпечують максимальну ефективність транспортного засобу.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Самородов В.Б., Рогов А.В. Объектно-ориентированный подход к моделированию трансмиссий в области транспортного машиностроения // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Серия НРСТ. Новые решения в современных технологиях. – Харьков: Харьковский государственный политехнический университет. – 1999. – №66. – С. 48-53.

(здобувачем розроблена структура і функціональна схема програмної реалізації методики матричного аналізу трансмісій)

2. Самородов В.Б., Рогов А.В. Результаты математического моделирования сложной динамической системы двигатель – гидрообъемно-механическая трансмиссия – колесный трактор // Тракторная энергетика в растениеводстве. Сборник научных трудов. – Харьков: Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства. – 2001. – Вып. 4. – С. 109-117.

(здобувачем отримані результати математичного моделювання трактора з ГОМТ)

3. Самородов В.Б., Волонцевич Д.О., Рогов А.В. Уточненная методика определения потерь в планетарных механизмах передач и результаты ис-

следования потоков мощностей в гидрообъемно-механических трансмиссиях // Интегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – 2001. – № 4. – С. 76-83.

(здобувачем отримані результати моделювання роботи трансмісії з використанням поточної методики визначення втрат у планетарних механізмах)

4. Самородов В.Б., Рогов А.В. Результаты исследования характера нелинейности регулировочных характеристик при наиболее быстрейшем разгоне мобильных гусеничных машин с гидрообъемно-механическими трансмиссиями // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. - Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. Відділення механіки та машинобудування Академії наук Вищої школи України. – 2002. – №1. – С. 65-71.

(здобувачем отримані результати моделювання розгону транспортних засобів з ГОМТ з різними регульовальними характеристиками)

5. Самородов В.Б., Рогов А.В. Результаты параметрического синтеза гидрообъемно-механической трансмиссии гусеничной машины // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. Відділення механіки та машинобудування Академії наук Вищої школи України. – 2001. – №1, 2. – С. 151 – 159.

(здобувачем проведено дослідження впливу конструктивних параметрів на технічні характеристики ГОМТ)

6. Самородов В.Б., Рогов А.В., Ярмак Н.С. Математическое моделирование гидромеханических потерь и КПД в быстроходных гидрообъемных машинах с шаровыми поршнями // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. Сборник научных трудов. Тематический выпуск “Динамика и прочность машин”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2002.– №10. – Т.2. – С.165-172.

(здобувачем розроблена програмна реалізація диференціальної математичної моделі втрат в РПГМ та проведено її порівняння з експериментальними даними)

7. Самородов В.Б. Рогов А.В. Эффект выпукло-вогнутых регулировочных характеристик гидрообъемно-механических трансмиссий, обеспечивающих наиболее быстрый разгон гусеничных машин // Интегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – 2002. – № 2. – С. 70-76.

(здобувачем отримані результати моделювання динаміки розгону транспортних засобів з ГОМТ з різною формою регульовальних характеристик ГОП)

8. Самородов В.Б., Рогов А.В. Введение понятия базисных динамических матриц тормозных элементов трансмиссий и результаты моделирования динамики торможения транспортного средства // Вісник Кременчуцького

державного політехнічного університету. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: Кременчуцький державний політехнічний університет. – 2002. – Вип. 3/2002(14). – С. 42-45.

(здобувачем розроблені базисні матриці гальмівних елементів та отримані результати моделювання гальмування транспортних засобів)

9. Самородов В.Б., Бурлыга М.Б., Рогов А.В. Результаты математического моделирования двухпоточной ГОМТ колесного трактора класса 0,9 // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. Сборник научных трудов. Тематический выпуск “Автомобиле- и тракторостроение”. – Харьков: Национальный технический университет “ХПИ”. – 2002. – № 10. – Т. 1. – С. 17 – 22.

(здобувачем отримані результати моделювання роботи колісного трактора з ГОМТ)

10. Самородов В.Б., Рогов А.В. Принцип и алгоритм работы системы управления транспортным средством с гидрообъемно-механической трансмиссией // Тракторная энергетика в растениеводстве. Сборник научных трудов. – Харьков: Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства. – 2002. – Вып. 5. – С. 218 – 227.

(здобувачем розроблений алгоритм системи керування ГОМТ та отримані результати моделювання її функціонування)

11. Самородов В.Б., Рогов А.В., Бурлыга М.Б., Самородов Б.В. Критический обзор работ в области тракторных гидрообъемно-механических трансмиссий // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. Сборник научных трудов. Тематический выпуск “Автомобиле- и тракторостроение”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2003. – №4. – С. 3 – 19.

(здобувачем проведений огляд розрахунково теоретичних методів аналізу та синтезу сучасних трансмісій з метою постановки задач дослідження)

12. Самородов В.Б., Рогов А.В., Бурлыга М.Б. Методика плотной упаковки матричных систем, моделирующих работу гидрообъемно-механических трансмиссий // “Автомобильный транспорт”. Сборник научных трудов. – Харьков: Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. – 2003. – Вып. 13. – С. 91 – 98.

(здобувачем розроблена методика щільного упакування формальних силових невідомих в повних матричних моделях ГОМТ та проаналізована її ефективність)

13. Самородов В.Б., Рогов А.В. Математическое моделирование динамики движения гусеничного трактора в общем случае неравномерного поворота на произвольной поверхности // Тракторная энергетика в растениеводстве. Сборник научных трудов. – Харьков: Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства. – 2003. – Вып. 6. – С. 150-162.

(здобувачем розроблена методика моделювання нерівномірного руху транспортного засобу по заданій довільній поверхні та одержані результати моделювання)

14. Самородов В.Б., Рогов А.В., Бурлыга М.Б. Математическая модель и результаты моделирования гидрообъемного механизма поворота трактора ХТЗ-200 // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: Кременчуцький державний політехнічний університет. – 2003. – №4/2003(21). – С. 96 - 101.

(здобувачем розроблена математична модель ГОМП та отримані результати моделювання повороту гусеничного трактора)

15. Рогов А.В. Матричный анализ трансмиссий, в состав которых входят обгонные муфты // Вестник Национального технического университета "ХПИ". Сборник научных трудов. Тематический выпуск "Автомобиле- и тракторостроение". – Харьков: Национальный технический университет "ХПИ". – 2004. – № 16. – С. 51 – 57.

16. Рогов А.В., Ярмач Н.С., Истратов А.В. Математическая модель гидромеханических и объемных потерь в перспективной гидрообъемной передаче ГОП-900 // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". Відділення механіки та машинобудування Академії наук Вищої школи України. – 2004. – №2. – С. 200 - 214.

(здобувачем розроблена аналітична математична модель втрат в РПГМ)

## АНОТАЦІЯ

**Рогов А.В. Развитие методов расчета систем "двигун-трансмисія" автомобилей і тракторів. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 - автомобілі та трактори. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2006.

Дисертація присвячена розвитку методів математичного моделювання статичних і динамічних режимів роботи технічних систем "двигун-трансмисія" і видачі практичних рекомендацій з раціональної множини передатних відносин і кінематичної схеми трансмісії.

Удосконалено методики статичного і динамічного аналізу системи "двигун-трансмисія", динамічного аналізу руху транспортного засобу для нерівномірного повороту по тривимірній поверхні. Розроблено аналітичну математичну модель об'ємних і механічних втрат у радіально-поршневих ГОП із кульовими поршнями, структурну схему і конструктивні параметри ГОМТ; обрані раціональні передатні відносини редукторів і об'єм ГОП для спеціальних гусеничних машин.

**Ключові слова:** ступінчаста механічна, гідрооб'ємно-механічна трансмісія, гідрооб'ємний механізм повороту, матричний аналіз систем "двигун-

гун-трансмiсія", радіально-поршневі гідрооб'ємні передачі, аналітична математична модель об'ємних і механічних утрат, збільшення технічних характеристик автотракторної техніки.

## АННОТАЦІЯ

**Рогов А.В. Развитие методов расчета систем “двигатель-трансмиссия” автомобилей и тракторов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2006.

Диссертация посвящена развитию методов математического моделирования статических и динамических режимов работы сложных технических систем “двигатель-трансмиссия” и разработке практических рекомендаций по определению рационального множества передаточных отношений и кинематической схемы трансмиссии, обеспечивающей высокую эффективность, экономичность и эргономичность транспортных средств.

Обосновано, что наиболее перспективными характеристиками обладают гидрообъемно-механические трансмиссии и гидрообъемные механизмы поворота. Применение таких трансмиссий требует использования соответствующих расчетных методик, позволяющих в сжатые сроки проанализировать несколько различных вариантов конструктивного исполнения трансмиссий с целью выбора рационального и повышения таким образом технических характеристик транспортного средства в целом.

Также обосновано применение радиально-поршневых гидрообъемных передач пониженного рабочего объема в составе бесступенчатых трансмиссий как более перспективных с точки зрения удельной передаваемой мощности, массово-габаритных показателей и компоновки трансмиссий.

Разработаны новые методики статического и динамического анализа системы “двигатель-трансмиссия”, позволяющие охватить более широкий спектр исследуемых трансмиссий с учетом включения в их состав новых структурных элементов, а также повысить эффективность процесса исследования за счет снижения ранга полных матричных математических моделей трансмиссии с применением методики плотной упаковки формальных силовых неизвестных. На основе исходной дифференциальной математической модели объемных и гидромеханических потерь в радиально-поршневых гидрообъемных передачах с шариковыми поршнями разработана аналитическая математическая модель данных потерь с последующей идентификацией эмпирических коэффициентов на основе полученных экспериментальных данных. Доказано, что применение радиально-поршневых ГОП с шариковыми поршнями для автотракторной техники требует исследования КПД гидромашин одинакового рабочего объема, но с различными конструктивными параметрами. Установлено, что наибольшим КПД обладают радиально-поршневые

гидрообъемные передачи с минимальным количеством поршней и максимально возможным диаметром шариков и эксцентриситетом.

Усовершенствованы и дополнены методики динамического анализа движения транспортного средства для общего случая неравномерного поворота по заданной трехмерной поверхности с учетом динамики системы поддрессорования, колебательного движения корпуса машины.

На основании полученных в диссертации результатов исследования разработана структурная схема и конструктивные ГОМТ для лесотехнического трактора класса 1,4 производства ГП “Завод им. Малышева”, выбраны рациональные передаточные отношения редукторов и объем ГОП для специальных гусеничных машин производства ОАО “ХТЗ им. С. Орджоникидзе” и перспективного трактора с гидрообъемным механизмом поворота ХТЗ-200, а также исследованы тяговые и скоростные характеристики данных машин.

**Ключевые слова:** ступенчатая механическая трансмиссия, гидрообъемно-механическая трансмиссия, гидрообъемный механизм поворота, матричный анализ систем “двигатель-трансмиссия”, радиально-поршневые гидрообъемные передачи, аналитическая математическая модель объемных и механических потерь, повышение эффективности математического моделирования систем “двигатель-трансмиссия”, увеличение технических характеристик автотракторной техники.

## ABSTRACT

**Rogov A. Developing calculating methods of system “engine-transmission” for automobiles and tractors. – Manuscript.**

Thesis for a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.22.02 – automobiles and tractors. – Kharkiv National Automobile-Highway University, Kharkiv, 2006.

Thesis is devoted to developing methods of mathematical modeling of static and dynamic work mode of technical systems “engine-transmission”. Recommendations for numerity of rational gear ratios and cinematic scheme of transmission obtaining have been suggested.

New methodics of static and dynamic analysis of system “engine-transmission” including new structure elements and non-uniform turn on a three-dimensional surface are developed. Analytic mathematical model of volume and mechanic losses in radial-piston hydrostatic transmissions with spherical pistons is developed. Calculation methodic of turn resistance moments for the case of different and changing in time reactions under machine propulsion rolls is introduced.

**Key words:** step mechanic, hydrostatic-mechanical transmission, hydrostatic turn mechanism, matrix analysis of systems “engine-transmission”, radial-piston hydrostatic transmissions, analytic mathematical model of volume and mechanic losses, autotractors’ technical characteristics raising.

**Рогов Андрій Володимирович**

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМ  
“ДВИГУН-ТРАНСМІСІЯ” АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук