

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

МОРМИЛО ЯКОВ МИХАЙЛОВИЧ

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 629.113 (075.8)

(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ РУХЛИВОСТІ ВІЙСЬКОВИХ КОЛІСНИХ МАШИН ШЛЯХОМ
ЗАСТОСУВАННЯ МІЖКОЛІСНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛІВ З ГІДРОСТАТИЧНИМ
БЛОКУВАННЯМ БЕЗ ФРИКЦІЙНИХ ДИСКІВ

(назва дисертації)

255 – Озброєння та військова техніка

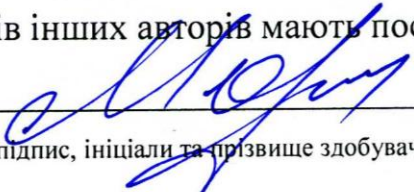
(шифр і назва спеціальності)

25 – Воєнні науки, національна безпека, безпека державного кордону

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Я.М. Морило

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Волонцевич Дмитро Олегович, доктор. техн. наук, проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Мормило Я.М. Підвищення рухливості військових колісних машин шляхом застосування міжколісних диференціалів з гідростатичним блокуванням без фрикційних дисків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 255 «Озброєння та військова техніка» (25 – Воєнні науки, національна безпека, безпека державного кордону). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2020.

Актуальність теми. Потреба в міжколісних диференціалах (МКД) виникла відразу ж після появи перших автомобілів із приводом на два колеса однієї осі. Найбільш відчутно ця потреба проявлялася при проходженні автомобілем поворотів і їзді по дорогах з нерівностями. Відсутність МКД у таких трансмісіях приводило до появи циркуляції потужності, невиправдано великого додаткового навантаження на ведучу вісь і колеса, підвищення витрати палива, великого зношування шин. З винаходом класичного конічного симетричного МКД ці проблеми були вирішені. Однак з'явилися інші проблеми, пов'язані з явищем буксування у важких дорожніх умовах. Природно, що на цей виклик нашлася велика кількість технічних рішень, які так чи інакше згладжували проблему, але не вирішували її комплексно.

В останні десятиліття з'явилися конструктивні рішення, у яких величина блокування диференціала контролюється електронікою по заданому алгоритму, а також приводи, у яких система контролю тяги управляє безпосередньо крутним моментом, що підводиться до ведучого колеса. Особливо ефективно такі рішення працюють у випадку застосування електричних або гідростатичних мотор-колес.

Однак, не дивлячись на достаток технічних рішень в області диференціального привода ведучих коліс, ефективної конструкції МКД для військових колісних машин (КМ) і повнопривідних автомобілів багатоцільового призначення (ПАБП) отримано поки не було. Існуючі конструкції або як і раніше використовують повне блокування з ручним керуванням, або базуються на диференціалах, що самоблокуються, підвищеного тертя, які не в змозі одночасно забезпечити і високу прохідність, і гарну керованість.

Тому, не дивлячись на бурхливий розвиток електронних систем керування та індивідуального електроприводу, для військових КМ і ПАБП розробка ефективного МКД із внутрішньою автоматичністю є актуальною.

Метою дисертаційної роботи є збільшення тягової динаміки колісних бронетранспортерів і ПАБП в складних дорожніх умовах при високих показниках економічності і керованості шляхом розробки і застосування МКД із гідростатичним блокуванням на базі шестеренного насосу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

– методами чисельного моделювання провести дослідження впливу структури і параметрів МКД на динаміку розгону машини в складних дорожніх умовах;

– методами чисельного моделювання провести дослідження впливу структури і параметрів МКД на опір криволінійному руху і керованість;

– оцінити теоретично і експериментально можливість реалізації гідростатичного блокування без додаткових фрикційних дисків для МКД бронетранспортера БТР-4 і визначити його необхідні технічні параметри;

– оцінити експериментально характеристики штатного кулачкового МКД бронетранспортера БТР-4 при повному вивіщуванні одного з коліс;

– визначити параметри МКД із гідростатичним блокуванням і методами чисельного моделювання провести дослідження обраних

параметрів рухливості бронетранспортера БТР-4, укомплектованого запропонованими МКД.

Наукова новизна отриманих результатів. Основними науковими результатами, які виносяться на захист, являються:

– вперше науково обґрунтована можливість створення МКД з гідростатичним блокуванням без додаткових фрикціонів на основі шестеренного насосу для колісного бронетранспортера;

– вперше запропонований енергетичний метод оцінки ефективності МКД, який на відміну від існуючих спирається на втрати не при сталому русі, а при розгоні машини в складних дорожніх умовах до заданої швидкості;

– вперше запропонований метод оцінки впливу структури і параметрів МКД на спротив криволінійному руху по дорогах з твердим покриттям, який на відміну від існуючих спирається на оцінку не тільки втрат в МКД при криволінійному русі, а й на втрати при проковзуванні коліс по дорозі і збільшення дійсного радіусу повороту за рахунок уводу коліс і їх проковзування;

– вперше експериментально отримана залежність блокувального моменту від швидкості буксування для двохрядного кулачкового МКД бронетранспортера БТР-4.

Практичне значення одержаних результатів.

Проведені дослідження надали можливість розрахувати параметри шестеренного насосу для гідростатичного блокування МКД, що з незначними доробками монтується в картер головної передачі бронетранспортера БТР-4 і в змозі замінити покупний російський вузол з гіршими експлуатаційними характеристиками.

Розроблені методи оцінки ефективності диференціалів при прямолінійному розгоні в складних дорожніх умовах і при криволінійному русі по дорогах з твердим покриттям надають можливість проводити

структурно-параметричний синтез не тільки МКД, а й міжосьових диференціалів для військових КМ та ПАБП з механічною трансмісією.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження підтверджується актами про впровадження в розрахункову практику запропонованих методів оцінки ефективності МКД в ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова» та ТОВ «Машгідропривод», а також актом про впровадження в навчальний процес методів оцінки ефективності МКД в НТУ «ХПІ» при підготовці студентів за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування, спеціалізації 133.02 – Автоматизоване проектування транспортних засобів високої прохідності.

Висновки по роботі:

1) З аналізу літературних джерел був зроблений висновок про відсутність технічного рішення в області МКД, яке б забезпечувало високу прохідність (у тому числі при повному вивішуванні ведучих коліс), не погіршувало керованість, мало внутрішню автоматичність, було досить простим і дешевим у виготовленні і надійним в експлуатації.

2) Для КМ, експлуатація яких припускає можливість вивішування при русі одного або декількох коліс, у МКД для забезпечення прохідності необхідно використовувати або повне блокування, або протибуксовочні системи на базі АБС, або диференціали, що самоблокуються, з моментом, що блокує, залежним від різниці або квадрата різниці частот відносного обертання півосей і корпуса диференціала. Використання повного блокування в існуючих конструкціях вимагає або повної зупинки машини перед блокуванням / розблокуванням диференціалів або використання фрикційних дисків, блокування яких вимагає додаткового відбору потужності для їхнього втримання в замкнутому стані і які при активній експлуатації машини в складних дорожніх умовах інтенсивно зношуються. Для використання протибуксовочних систем на базі АБС на даний момент, на жаль, ми не маємо відпрацьованих достатньо надійних в умовах

військового застосування вітчизняних АБС, які могли б лягти в основу створення противобуксовочной системи. Тому доцільним є використання МКД із гідростатичним блокуванням без використання додаткових фрикційних дисків.

3) З наведеного аналізу витікає, що найбільш ефективним вхідними параметрами для більшості підходів по забезпеченню автоматичного розподілу потужності між колесами є кінематична неузгодженість швидкостей обертання ведучих коліс і положення керованих коліс.

4) При аналізі прохідності КМ, які припускають можливість вивішування при русі одного або декількох коліс, необхідно оперувати поняттям блокувального моменту диференціала, а не коефіцієнта блокування.

5) У результаті математичного моделювання і розрахунків на прикладі бронетранспортера БТР-4 були отримані значення максимальної відносної частоти обертання півосі і корпусу МКД, що може виникнути через різницю у швидкостях обертання коліс різних бортів при маневруванні на дорогах із твердим покриттям, а також залежності необхідного для забезпечення прохідності блокувального моменту МКД від частоти відносного обертання півосі і корпусу МКД. Виявлено, що оптимально блокувальний момент повинен зростати від нуля до максимального значення в 3000 Нм відповідно при зростанні відносної частоти обертання півосі і корпусу диференціалу від 80 до 115 хв^{-1} .

6) З розглянутих конструкцій МКД по динаміці розгону в складних дорожніх умовах для середніх значень коефіцієнтів пропорційності перевагу мають МКД, у яких ступінь блокування залежить від навантаження.

7) При обраних коефіцієнтах пропорційності системи для малих кутів повороту керованих коліс (до 8°) у перших трьох чвертях діапазону безпечних швидкостей і по опору повороту, і по зростанню радіуса

повороту перевагу мають МКД, у яких ступінь блокування залежить від квадрата різниці швидкостей півосей.

8) Для більших кутів повороту керованих коліс у першій половині діапазону безпечних швидкостей також перевагу мають МКД, у яких ступінь блокування залежить від квадрата різниці швидкостей півосей. Але при швидкостях, близьких до перекидання, для будь-яких кутів повороту керованих коліс їх випереджають по показниках МКД, у яких ступінь блокування залежить від навантаження.

9) Диференціали із ПБС на базі АБС найбільше доцільно використовувати при відносно невеликих значеннях дисбалансу коефіцієнтів зчеплення по бортах машини і інтегрувати їх із системами підтримки курсової стійкості, які дозволяють залежно від ситуації легко змінювати значення коефіцієнтів пропорційності (настроювання системи).

10) Для автомобілів підвищеної прохідності, експлуатація яких не припускає режими з повним вивішуванням ведучих коліс можливо ефективно використання МКД, у яких ступінь блокування залежить від навантаження.

11) Для автомобілів високої прохідності і військових КМ, при експлуатації яких можливо повне вивішування ведучих коліс, доцільне використання МКД із фрикційним моментом, що залежить від квадрата різниці швидкостей обертання півосей. Вони можуть мати високі енергетичні показники при розгоні з мінімальним негативним впливом на керованість машини і при цьому опиратися не на електронні системи керування, а на власну внутрішню автоматичність.

12) Проведені випробування показали, що сила тяги ведучого мосту із дворядним кулачковим диференціалом при повному вивішуванні одного з коліс (правого) істотно залежить від частоти обертання колеса, що буксує, і досягає максимальної величини в 1091 Н при частоті обертання колеса, що буксує, 399 хв^{-1} . Ця частота обертання відповідає обертанню

вхідного фланця ведучого мосту для руху бронетранспортера зі швидкістю 11 м/с (39,6 км/год) після чого настає заклинювання диференціала.

13) Отримані значення для сили тяги ведучого мосту із дворядним кулачковим диференціалом при повному вивішуванні одного з коліс (правого) недостатні для впевненого подолання бронетранспортером перешкод типу «яр» або «бархан» з діагональним вивішуванням і перешкод типу «рів» з послідовним вивішуванням мостів.

14) На основі шестеренного насоса із внутрішнім зачепленням можна реалізувати МКД із гідростатичним блокуванням без використання додаткових дисків тертя. Даний диференціал має квадратичну залежність блокувального (гальмівного) моменту від різниці кутових швидкостей півосі і корпусу диференціала. Це дозволяє, з одного боку, одержати практично повне блокування диференціала при буксуванні і, з іншого боку, чинити мінімальний опір повороту при маневруванні на дорогах із твердим покриттям.

15) Для бронетранспортера БТР-4 робочий об'єм шестеренного насоса із внутрішнім зачепленням, що дозволяє при блокуванні реалізувати максимальне зчеплення з дорогою колеса, яке не буксує, становить 415 см³. Такий насос успішно компонується в габаритах штатної головної передачі при заміні існуючого кулачкового диференціала на класичний відкритий диференціал з конічними шестірнями.

16) Оптимальний розрахунковий діаметр дрослюючого отвору становить 2 мм. Однак залежно від точності виготовлення елементів шестеренного насоса і сукупних об'ємних втрат ця величина повинна коректуватися експериментальним шляхом в бік зменшення.

17) Героторні насоси із циклоїдальним зачепленням були зняті з розгляду по причині складності реалізації в них високого тиску через низький коефіцієнт перекриття профілів зубів. Для синтезу МКД із внутрішньою автоматичністю, який би задовольняв вимогам і до тягової

прохідності, і до динаміки машини і одночасно не перешкоджає її криволінійному руху, остаточно прийнятий диференціал, у якому величина блокувального моменту залежить від квадрата різниці кутових швидкостей півосей.

18) МКД із моментом блокування, що залежить від навантаження (у тому числі і штатний дворядний кулачковий диференціал) досить успішно конкурують із розглянутими диференціалами з гідростатичним блокуванням по ефективності роботи в складних дорожніх умовах, але без повного вивішування одного з коліс.

19) Для МКД із гідростатичним блокуванням досить мати діаметр дроселюючого отвору більше 3 мм для безперешкодного входу бронетранспортера в поворот і криволінійного руху без істотного збільшення енерговитрат і погіршення керованості в усьому діапазоні швидкостей руху.

20) З метою одержання необхідної прохідності і динаміки руху в складних дорожніх умовах для МКД з гідростатичним блокуванням необхідно мати діаметр дроселюючого отвору не більше 1 мм.

21) Для ліквідації отриманого протиріччя пропонується ставити в шестеренний насос керований електромагнітний клапан, що у важких дорожніх умовах буде дозволяти по команді водія в будь-якому режимі руху зменшувати прохідний перетин до діаметра менш 1 мм або взагалі повністю його закривати з розрахунком на запобіжний клапан по тиску і об'ємні втрати.

Ключові слова: міжколісний диференціал, диференціал підвищеного тертя, блокувальний момент, гідростатичне блокування, шестеренний насос, енергоефективність, керованість.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у періодичних наукових виданнях, що увійшли до переліку наукових фахових видань України:

1. Волонцевич Д. О., Мормило Я. М. К вопросу определения зоны нечувствительности самоблокирующихся межколесных дифференциалов с коэффициентом блокировки, зависящим от скорости относительного вращения колес. *Механіка та машинобудування*, №1, 2016. С. 30–35.

2. Волонцевич Д. О., Мормило Я. М. К вопросу определения нагрузочных режимов блокируемых и самоблокирующихся межколесных дифференциалов военных колесных машин. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 14 (1236). С. 175-179.

3. D. Volontsevich, Ja. Mormylo, Ie. Veretennikov. Analysis of the influence of the cross-wheel differentials design on the resistance of the car curved motion. *Eastern – European Journal of Enterprise Technologies, Applied Mechanics*, №4/7 (100). 2019. P. 38–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.173968. Фахове видання України, що індексується в базі SCOPUS.

4. Мормило Я. М. Экспериментальное определение блокировочного момента двухрядного кулачкового межколесного дифференциала при полном вывешивании одного из колес. *Механіка та машинобудування*, №1, 2019. С. 90–96.

Зарубіжні публікації:

5. Ia. Mormylo. Study of the Possibility of Using Gear Pumps without Additional Friction Discs for Hydrostatic Locking of Automobile Differentials. *Mechanics, Materials Science and Engineering*, September 2018. ISSN 2412-

5954, Vol. 17 Mechanical Engineering and Physics, 8 p. DOI 10.2412/mmse.73.48.557.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Волонцевич Д. О., Мормило Я. М. К вопросу определения нагрузочных режимов блокируемых и самоблокирующихся межколесных дифференциалов военных колесных машин. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017*, 17-19 травня 2017 р. Харків, 2017. Ч. I. С.173.

7. Волонцевич Д. О., Мормило Я. М. Підвищення прохідності повнопривідних колісних машин за рахунок використання автоматичного гідростатичного блокування міжколісних диференціалів. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки"*, 11-12 жовтня 2017 року, Київ.

8. Волонцевич Д. О., Веретенников Е. А., Мормило Я. М. К вопросу расчета параметров шестеренчатого насоса для гидростатической блокировки межколесных дифференциалов военных колесных машин. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2018*, 16-18 травня 2018 р.: у 4 ч. Ч. 1. Харків : НТУ "ХП", 2018. С. 154.

9. Волонцевич Д. О., Веретенников Е. А., Мормило Я. М. Порівняльна оцінка ефективності міжколісних диференціалів, що самоблокуються, з коефіцієнтом блокування, який залежить від швидкості відносного обертання коліс. *Матеріали XVIII науково-технічної Конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах»*, 06-07 вересня 2018 р. Чернігів.

10. Волонцевич Д. О., Веретенников Е. А., Мормило Я. М. Анализ влияния конструкции межколесных дифференциалов на сопротивление криволинейному движению полноприводного автомобиля по дорогам с твердым покрытием. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019*, 15-17 травня 2019 р.: у 4 ч. Ч. I. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХП». С. 174.

11. Волонцевич Д. О., Мормило Я. М. Экспериментальное определение блокировочного момента межколесного кулачкового дифференциала бронетранспортера БТР-4 при вывешивании одного из колес. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019*, 15-17 травня 2019 р.: у 4 ч. Ч. IV. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХП». С. 324.

12. D. Volontsevych, Ie. Veretennikov, Ia. Mormylo, V. Karpov. Evaluation of the efficiency of the vehicle with various inter-wheeled differentials for different clutch conditions on sides in acceleration regime. *Proceedings of the XXVII International Scientific Conference trans&MOTAUTO'19*. Year III, Issue 1(6), Sofia, Bulgaria 2019, 91–94.

Додаткові публікації за темою дисертації:

13. Волонцевич Д. О., Мормило Я. М. К вопросу структурно-параметрического синтеза межколесного дифференциала с внутренней автоматичностью на основе гидростатической блокировки. *Механіка та машинобудування*, №1, 2019. С. 76–84.

ABSTRACT

Mormylo Ia. M. Increasing the mobility of military wheeled vehicles through the use of inter-wheel differentials with hydrostatic locking without friction disks. – Qualification scientific paper, manuscript.

Thesis for a PhD Degree in Technical science: Specialty 255 – Armament and military equipment (25 – Military sciences, national security, state border security). – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

Relevance of the topic.

The need for inter-wheel differentials (IWD) arose immediately after the appearance of the first two-wheel drive cars. Most notably, this need was manifested during turning and driving on rough roads. The absence of IWD in such transmissions caused power circulation, unreasonably large additional loads on the drive axle and wheels, increased fuel consumption and high tire wear. With the invention of the traditional symmetric bevel gear IWD, these problems were solved. However, there were other problems associated with the phenomenon of slipping in difficult road conditions. Naturally, this challenge has found a large number of technical solutions that somehow smoothed out the problem, but did not solve it comprehensively.

In recent decades, design solutions have emerged in which the differential lock is controlled electronically by a given algorithm, as well as drives in which the traction control system directly controls the input torque of the drive wheel. These solutions are especially effective for electric or hydrostatic motor wheels.

However, despite the abundance of technical solutions in the field of differential wheel drive, there is no effective IWD design for military wheeled and multi-purpose full-wheel drive vehicles. The existing designs either still use complete manual lock, or are based on SLLSD that are not able to provide high cross-country ability and good handling at the same time.

Therefore, despite the rapid development of electronic control systems and individual electric drives, the development of an efficient, internally automated IWD is topical for military wheeled and multi-purpose full-wheel drive vehicles.

The aim of the dissertation is to increase the traction dynamics of wheeled armored personnel carriers and multi-purpose full-wheel drive vehicles in difficult road conditions with high rates of economy and controllability by developing and using IWD with hydrostatic locking based on a gear pump.

To achieve this aim it is necessary to solve the following tasks:

- to study the influence of the structure and parameters of IWD on the dynamics of acceleration of the car in difficult road conditions using methods of numerical simulation;

- to study the influence of the structure and parameters of IWD on the resistance to curvilinear motion and controllability using numerical simulation methods;

- to evaluate theoretically and experimentally the possibility of implementing hydrostatic blocking without additional friction disks for the IWD of the BTR-4 armored personnel carrier and determine its necessary technical parameters;

- to evaluate experimentally the characteristics of the standard cam IWD of the BTR-4 armored personnel carrier with the full hanging of one of the wheels;

- determine the parameters of the IWD with hydrostatic blocking and conduct a study of the selected mobility parameters of the armored personnel carrier

BTR-4, equipped with the proposed IWD, using numerical simulation.

The scientific novelty of the results. The main scientific results that are submitted to the public defense are:

– for the first time, the possibility of creating an IWD with hydrostatic locking without additional friction disks based on a gear pump for a wheeled armored personnel carrier has been scientifically substantiated;

– for the first time, an energy method has been proposed for assessing the efficiency of IWD, which, unlike the existing ones, is based on losses not with constant movement, but when the vehicles is accelerated in difficult road conditions to a given speed;

– for the first time, a method is proposed for assessing the influence of the structure and parameters of IWD on the resistance to curvilinear movement on paved roads, which, in contrast to existing methods, is based not only on the assessment of losses in the IWD during curvilinear movement, but also on losses due to wheel slippage along the road and an increase in the actual radius turning due to the deviation of the wheels rolling direction and their slipping;

– The dependence of the locking moment on the slipping speed for a two-row cam IWD of the BTR-4 armored personnel carrier was experimentally obtained.

The practical significance of the results.

The studies made it possible to calculate the parameters of the gear pump for hydrostatic locking of the IWD, which, with minor changes, is mounting in the main gear housing of the BTR-4 armored personnel carrier and is able to replace the purchased Russian unit with the worst performance characteristics.

The developed methods for evaluating the effectiveness of differentials in straight-ahead acceleration in difficult road conditions and in curved motion on paved roads provide the opportunity to carry out structural-parametric synthesis of not only IWD, but also center differential for military vehicles and multi-purpose full-wheel drive vehicles with mechanical transmission.

The practical significance of the dissertation research results is confirmed by acts on the implementation of the proposed methods for evaluating the effectiveness of IWD in the design practice in the State enterprise “Kharkov

Machine Building Design Bureau named after A.A. Morozov” and LLC “Mashhydroprivod”. An act was also received on the introduction of methods for evaluating the effectiveness of IWD into the educational process of the NTU “KhPI” when preparing students for specialty 133 – Sectoral Engineering, specializations 133.02 – Automated design of cross-country vehicles.

Conclusions on the work:

1) From the analysis of literary sources, it was concluded that there is no technical solution in the field of IWD that would ensure high crossability (including with full hanging of the drive wheels), do not impair handling, have internal automatism, was quite simple and cheap to manufacture and reliable in operation.

2) For wheeled vehicles, the operation of which allows the possibility of hanging one or several wheels when moving, in the IWD, to ensure patency, it is necessary to use either full blocking, or anti-slip systems based on ABS, or self-locking differentials with a blocking moment depending on the difference or square of the difference in the frequency of relative rotation axle shafts and differential housings. The use of complete locking in existing structures requires either a complete stop of the machine before locking (unlocking) differentials or the use of friction discs, the locking of which requires additional power take-off to keep them closed and which, when the machine is actively used in difficult road conditions, wear out intensively. Unfortunately, for the use of traction control systems based on ABS, we do not have well-tested domestic ABS systems that could form the basis for the creation of a traction control system in conditions of military use. Therefore, it is advisable to use IWD with hydrostatic locking without the use of additional friction discs.

3) From the above analysis it follows that the most effective input parameter for most approaches to ensure automatic power distribution between the wheels is the kinematic inconsistency of the rotational speeds of the drive wheels and the position of the steered wheels.

4) When analyzing the patency of wheeled vehicles that allow the possibility of hanging one or several wheels when moving, it is necessary to operate with the concept of the differential locking moment, and not the blocking coefficient.

5) As a result of mathematical modeling and calculations using the BTR-4 armored personnel carrier as an example, the values of the maximum relative rotational speed of the half-axle and the IWD housing were obtained, which can occur due to the difference in the rotational speeds of the wheels of different sides when maneuvering on paved roads. Also obtained are the dependences of the blocking moment of the IWD, necessary to ensure high crossability, on the frequency of the relative rotation of the axle shaft and the housing of the IWD. It was found that the optimum blocking moment should increase from zero to a maximum value of 3000 Nm, respectively, with an increase in the relative rotational speed of the half-axle and differential housing from 80 to 115 min^{-1} .

6) Of the considered constructions of IWD on the dynamics of acceleration in difficult road conditions for average values of the proportionality coefficients, IWD have an advantage in which the degree of blocking depends on the load.

7) With the selected proportionality coefficients of the system for small steering angles (up to 8°) in the first three quarters of the safe speed range and in terms of turning resistance and increasing turning radius, IWDs have an advantage, in which the degree of blocking depends on the square of the difference in speed of the half-axles.

8) The IWD, in which the degree of blocking depends on the square of the difference of the speeds of the axle shafts, also have an advantage for large steering angles of the steered wheels in the first half of the safe speed range. But at speeds close to turning over, they are behind from IWD, in which the degree of blocking depends on the load, for any angle of rotation of the steered wheels.

9) The IWD with a traction control system based on ABS are most suitable for use with relatively small values of the imbalance of adhesion coefficients on the sides of the car and integrate them with directional stability systems that allow you to easily change the value of the proportionality coefficients (system setting) depending on the situation.

10) For off-road vehicles, the operation of which does not imply modes with full hanging of the drive wheels, it is possible to use IWD effectively, in which the degree of blocking depends on the load.

11) For off-road vehicles and military wheeled vehicles, during operation of which full hanging of the drive wheels is possible, it is advisable to use an IWD with a locking moment, which depends on the square of the difference in the speeds of rotation of the axle shafts. They can have high energy performance during acceleration with minimal negative impact on the controllability of the machine and at the same time rely not on electronic control systems, but on their own internal automation.

12) The tests showed that the traction force of the drive axle with a double-row cam differential when one of the wheels (right) is fully hung out substantially depends on the speed of the slipping wheel. It reaches a maximum value of 1091 N at a rotational speed of a slip wheel of 399 rpm. This speed corresponds to the rotation of the input flange of the drive axle for the movement of the armored personnel carrier at a speed of 11 m / s (39.6 km / h), after which the differential is jammed.

13) The obtained values for the traction force of the drive axle with a double-row cam differential with full hanging of one of the wheels (right) are insufficient for the armored personnel carrier to overcome obstacles of the “ravine” type or “dune” type with diagonal hanging and obstacles of the “moat” type with sequential suspension of bridges.

14) Based on a gear pump with internal gearing, it is possible to realize a IWD with hydrostatic locking without the use of additional friction disks. This

differential has a quadratic dependence of the locking (braking) moment on the difference in the angular velocities of the half-axle and the differential housing. This allows, on the one hand, to obtain almost complete differential blocking during slipping and, on the other hand, to provide minimal turning resistance when maneuvering on paved roads.

15) For the BTR-4 armored personnel carrier, the working volume of the gear pump with internal gearing, which allows maximum grip on the road when locking on a non-skid wheel, is 415 cm^3 . Such a pump is successfully assembled in the dimensions of the standard main gear (final drive) when replacing the existing cam differential with a classic open differential with bevel gears.

16) The optimum design diameter of the drosselling hole is 2 mm. However, depending on the accuracy of manufacture of the gear pump elements and the total volume losses, this value should be experimentally adjusted downward.

17) Cycloidal gear gerotor pumps have been discontinued due to the difficulty of realizing high pressure in them due to the low coefficient of overlap of tooth profiles. For the synthesis of IWD with internal automaticity, which would satisfy the requirements for both traction and vehicle dynamics and at the same time not impede its curvilinear movement, the differential is finally adopted, in which the value of the blocking moment depends on the square of the difference in the angular velocities of the half-axes.

18) MKD with the moment of blocking, which depends on the load (including the standard two-row cam differential), quite successfully compete with the considered differentials with hydrostatic locking in terms of operating efficiency in difficult road conditions, but without fully hanging one of the wheels.

19) For MCD with hydrostatic locking, it is enough to have a diameter of a throttling hole of more than 3 mm for an unhindered start of rotation of the armored personnel carrier and its curvilinear movement without a significant

increase in energy consumption and deterioration of controllability over the entire range of travel speeds.

20) In order to obtain the necessary cross-country ability and driving dynamics in difficult road conditions, for a MCD with hydrostatic locking, it is necessary to have a diameter of the drosselling hole of not more than 1 mm.

21) To eliminate the contradiction, it is proposed to put a controlled solenoid valve in the gear pump, which in difficult road conditions will allow, at the command of the driver, in any driving mode to reduce the bore to a diameter of less than 1 mm or even completely closing it with the pressure relief valve in mind and volumetric losses in the pump.

Keywords: inter-wheel differential, limited slip differential, blocking moment, hydrostatic locking, gear pump, energy efficiency, controllability.

LIST OF PUBLICATIONS ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published

Articles in periodicals which are included in the list of scientific professional editions of Ukraine:

1. Volontsevych D. O., Mormylo Ya. M. K voprosu opredeleniya zonyi nechuvstvitelnosti samoblokiruyuschihsia mezhkolesnyih differentsialov s koeffitsientom blokirovki, zavisyaschim ot skorosti odnositel'nogo vrascheniya koles. *Mekhanika ta mashynobuduvannia*, №1, 2016. P. 30–35.

2. Volontsevych D. O., Mormylo Ya. M. K voprosu opredeleniya nagruzochnyih rezhimov blokiruemyih i samoblokiruyuschihsia mezhkolesnyih differentsialov voennyih kolesnyih mashin. *Visnyk NTU «KhPI»*. Seriia: Transportne mashynobuduvannia. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. № 14 (1236). P. 175-179.

3. D. Volontsevich, Ja. Mormylo, Ie. Veretennikov. Analysis of the influence of the cross-wheel differentials design on the resistance of the car curved motion. Eastern – European Journal of Enterprise Technologies, Applied Mechanics, №4/7 (100). 2019. P. 38–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.173968.

4. Mormylo Ya. M. Eksperimentalnoe opredelenie blokirovochnogo momenta dvuhryadnogo kulachkovogo mezhkolesnogo differentsiala pri polnom vyiveshivanii odnogo iz koles. Mekhanika ta mashynobuduvannia, №1, 2019. P. 90–96.

Foreign publications:

5. Ia. Mormylo. Study of the Possibility of Using Gear Pumps without Additional Friction Discs for Hydrostatic Locking of Automobile Differentials. Mechanics, Materials Science and Engineering, September 2018. ISSN 2412-5954, Vol. 17 Mechanical Engineering and Physics, 8 p. DOI 10.2412/mmse.73.48.557.

Scientific works that confirm the approbation of the dissertation materials:

6. Volontsevych D. O., Mormylo Ya. M. K voprosu opredeleniya nagruzochnykh rezhimov blokiruyemykh i samoblokiruyushchysya mezhkolesnykh differentsialov voennykh kolesnykh mashyn. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : tezy dopovidei KhXV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2017, 17-19 travnia 2017 r. Kharkiv, 2017. Ch. I. P.173.

7. Volontsevych D. O., Mormylo Ya. M. Pidvyschennia prokhidnosti povnopryvidnykh kolisnykh mashyn za rakhunok vykorystannia avtomatychnoho hidrostatychnoho blokuvannia mizhkolisnykh dyferentsialiv. Materialy V Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Problemy koordynatsii voienno-tekhnichnoi ta oboronno-promyslovoi polityky v Ukraini.

Perspektyvy rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky", 11-12 zhovtnia 2017 roku, Kyiv.

8. Volontsevych D. O., Veretennykov E. A., Mormylo Ya. M. K voprosu rascheta parametrov shesterenchatogo nasosa dlya gidrostaticheskoy blokirovki mezhkolesnykh differentsialov voennykh kolesnykh mashin. Informatsiini tekhnolohii : nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : tezy dop. XXVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2018, 16-18 travnia 2018 r.: u 4 ch. Ch. 1. Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. P. 154.

9. Volontsevych D. O., Veretennykov E. A., Mormylo Ya. M. Porivnialna otsinka efektyvnosti mizhkolisnykh dyferentsialiv, shcho samoblokuiutsia, z koefitsientom blokuvannia, yakyi zalezhyt vid shvydkosti vidnosnoho obertannia kolis. Materialy XVIII naukovo-tekhnichnoi Konferentsii «Stvorennia ta modernizatsiia ozbroiennia i viiskovoi tekhniky v suchasnykh umovakh», 06-07 veresnia 2018 r. Chernihiv.

10. Volontsevych D. O., Veretennykov E. A., Mormylo Ya. M. Analiz vliyaniya konstruksii mezhkolesnykh differentsialov na soprotivlenie krivolineynomu dvizheniyu polnoprivodnogo avtomobilya po dorogam s tverdym pokrytiem. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2019, 15-17 travnia 2019 r.: u 4 ch. Ch. I. / za red. prof. Sokola Ye.I. Kharkiv: NTU «KhPI». P. 174.

11. Volontsevych D. O., Mormylo Ya. M. Eksperimentalnoe opredelenie blokirovochnogo momenta mezhkolesnogo kulachkovogo differentsiala bronetransportera BTR-4 pri vyiveshivani i odnogo iz koles. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2019, 15-17 travnia 2019 r.: u 4 ch. Ch. IV. / za red. prof. Sokola Ye.I. Kharkiv: NTU «KhPI». P. 324.

12. D. Volontsevych, Ie. Veretennikov, Ia. Mormylo, V. Karpov. Evaluation of the efficiency of the vehicle with various inter-wheeled differentials for different clutch conditions on sides in acceleration regime. Proceedings of the XXVII International Scientific Conference trans&MOTAUTO'19. Year III, Issue 1(6), Sofia, Bulgaria 2019, 91–94.

Published works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

13. Volontsevych D. O., Mormylo Ya. M. K voprosu strukturno-parametrycheskoho synteza mezhkolesnoho dyfferentsyala s vnutrennei avtomatychnostiu na osnove hydrostatycheskoi blokyrovky. Mekhanika ta mashynobuduvannia, №1, 2019. P. 76–84.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	12
1.1 Міжколісні диференціали – основні визначення, поняття коефіцієнта блокування.....	12
1.2 Класифікація, аналіз основних конструкцій і характеристик існуючих автомобільних міжколісних диференціалів.....	16
1.3 Аналіз літературних даних і постановка завдання.....	34
1.4 Висновки по розділу 1.....	39
РОЗДІЛ 2. ФОРМУВАННЯ ВИМОГ ДО ВЕЛИЧИНИ БЛОКУВАЛЬНОГО МОМЕНТУ, ЩО ЗАЛЕЖИТЬ ВІД ШВИДКОСТІ АБО КВАДРАТУ ШВИДКОСТІ ВІДНОСНОГО ОБЕРТАННЯ ПІВОСІ І КОРПУСУ ДИФЕРЕНЦІАЛА.....	41
2.1 Визначення необхідної зони нечутливості міжколісних диференціалів до відносного обертання півосей.....	41
2.2 Визначення мінімально припустимого блокувального моменту міжколісних диференціалів залежно від швидкості відносного обертання півосей.....	47
2.3 Висновки по розділу 2.....	53
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ РІЗНИХ МІЖКОЛІСНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛІВ.....	55
3.1 Постановка задачі чисельного моделювання руху повнопривідної колісної машини з різними типами міжколісних диференціалів	55

3.1.1	Постановка задачі при аналізі динаміки розгону і економічності для прямолінійного руху в складних дорожніх умовах.....	57
3.1.2	Постановка задачі при аналізі економічності і керованості для криволінійного руху по дорогах із твердим покриттям.....	58
3.2	Структура математичної моделі.....	60
3.3	Результати порівняльного аналізу динаміки розгону і економічності для прямолінійного руху в складних дорожніх умовах.....	69
3.4	Результати порівняльного аналізу економічності і керованості при криволінійному русі на дорогах із твердим покриттям.....	75
3.5	Висновки по розділу 3.....	81
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ МІЖКОЛІСНОГО ДИФЕРЕНЦІАЛА ДЛЯ БРОНЕТРАНСПОРТЕРА БТР-4 З ГІДРОСТАТИЧНИМ БЛОКУВАННЯМ БЕЗ ДОДАТКОВИХ ДИСКІВ ТЕРТЯ.....		
4.1	Експериментальне визначення сили тяги одного мосту бронетранспортера БТР-4 при повному вивішуванні одного з коліс.....	84
4.2	Теоретичне визначення робочого об'єму шестеренного насоса для забезпечення заданого блокувального моменту.....	89
4.3	Експериментальне визначення блокувального моменту на шестеренному насосі.....	92
4.4	Розрахунок необхідного робочого об'єму шестеренного насоса для гідростатичного блокування міжколісного диференціала бронетранспортера.....	93

4.5	Визначення параметрів рухливості бронетранспортера БТР-4 з міжколісними диференціалами, що мають гідростатичне блокування без додаткових дисків тертя.....	96
4.6	Перевірка можливості компонування міжколісних диференціалів, що мають гідростатичне блокування без додаткових дисків тертя, у мосту бронетранспортера БТР-4...104	
4.7	Висновки по розділу 4.....	105
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	108
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113
	ДОДАТКИ.....	132