

**І. П. ГРЕЧКА, М. М. ТКАЧУК, В. І. СЕРИКОВ, М. А. ТКАЧУК, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ,
Г. В. ТКАЧУК, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, О. С. ЛЬОЗНИЙ, С. О. ГОЛЕНКО**

БАЗОВІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ЗВ'ЯЗАНИХ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СТАНІВ У ЕЛЕМЕНТАХ РАДІАЛЬНОПОРШНЕВИХ ГІДРОПЕРЕДАЧ

У цій роботі визначено загальні методологічні підходи до аналізу взаємозв'язаних фізико-механічних процесів та станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач. Ключовими характеристиками зазначених підходів є, по-перше, узагальнений параметричний опис різноманітних процесів і станів у гідропередачах, а по-друге, побудова інтегрованих задач моделювання цих взаємопов'язаних фізичних процесів. Така інтеграція відрізняється від традиційного підходу, який передбачає послідовне розв'язання окремих незалежних задач, що дає можливість створювати більш адекватні математичні моделі робочих процесів у гідропередачах та обґрунтовувати прогресивні технічні рішення. Зокрема, розглянуті у комплексі та взаємодії низка процесів і станів. Увага приділена кінематиці та динаміці руху елементів гідропередач. Також важливим є аналіз контактної взаємодії та напружено-деформованого стану елементів гідропередач. Серед визначальних – процеси гідродинаміки робочої рідини у робочих об'ємах гідропередач. При загальному описі математичних моделей досліджуваних процесів і станів у гідропередачах були визначені основні змінні станів і фактори, що виступають як основа для формування більш детальних моделей у рамках подальших досліджень. Оцінено ключові величини, які використовуються в розрахункових моделях процесів та станів у гідропередачах, що дає можливість здійснити їх класифікацію за ступенем значущості. Установлено, що ігнорування окремих етапів дослідження може призводити до значних похибок у результатах розрахунків порівняно із поведінкою реальних об'єктів. Таким чином, розроблена комплексна модель процесів і станів у елементах радіальнопоршневих передач, з одного боку, є достатньо повною, оскільки охоплює усі значущі аспекти функціонування цих передач. З іншого боку, із неї недоцільно вилучати окремі частини. Отже застосований підхід дав можливість побудувати базову математичну модель процесів і станів, яка збалансована за критеріями адекватності та складності.

Ключові слова: зв'язаний фізико-механічний процес, напружено-деформований стан, контактна взаємодія, радіальнопоршнева гідрооб'ємна передача, танкова трансмісія, метод скінченних елементів

**I. HRECHKA, M. M. TKACHUK, V. SIERYKOV, M. A. TKACHUK, A. GRABOVSKIY, H. TKACHUK,
A. VASILIEV, O. LOZNYI, S. HOLENKO**

BASIC APPROACHES TO ANALYSIS OF RELATED PHYSICAL-MECHANICAL PROCESSES AND STATES IN ELEMENTS OF RADIAL HYDRAULIC TRANSMISSIONS

This work defines general methodological approaches to the analysis of interrelated physical and mechanical processes and states in the elements of radial-piston hydraulic transmissions. The key characteristics of these approaches are, firstly, a generalized parametric description of various processes and states in hydraulic transmissions, and secondly, the construction of integrated modeling problems of these interconnected physical processes. Such integration differs from the traditional approach, which involves the sequential solution of separate independent problems, which allows to create more corresponding mathematical models of work processes in hydraulic transmissions and to substantiate progressive technical solutions. In particular, there were a number of processes and states considered in the complex and interaction. Special attention is devoted to the kinematics and dynamics of movement of hydraulic transmission elements. Also important is the analysis of contact interaction and the stress-strain state of hydraulic transmission elements. Among the determinant one's – the processes of hydrodynamics of the working fluid in the working volumes of hydraulic transmissions. In the general description of the mathematical models of the processes and states under study in hydraulic transmissions, the main state variables and factors were determined, which serve as the basis for the forming of more detailed models within the framework of further research. The key dimensions, that used in the calculation models of processes and states in hydraulic transmissions were evaluated, which makes it possible to classify them according to the degree of significance. It has been established that neglecting individual stages of the research can lead to significant errors in the calculation results compared to the behavior of real objects. Thus, the developed comprehensive model of processes and states in the elements of radial-piston transmissions, on the one hand, is sufficiently complete, as it encompasses all significant aspects of the functioning of these transmissions. On the other hand, it is impractical to remove individual parts from it. Therefore, the applied approach made it possible to build a basic mathematical model of processes and states, balanced by the criteria of adequacy and complexity.

Keywords: connected physico-mechanical process, stress-strain state, contact interaction, radial-piston hydro volume transmission, tank transmission, finite element method

Вступ. Натепер у техніці військового та цивільного призначення широкого розповсюдження набули гідрооб'ємні передачі ГОП [1]. Серед них, на протипагу широко вивченим аксіальним, значно меншу увагу приділено радіальнопоршневим гідропередачам [2]. Зокрема, для оснащення перспективних танкових трансмісій розроблені варіанти радіальнопоршневої гідропередачі ГОП-900 [3]. Ця передача – із кульковими поршнями. Відповідно, значну роль відіграють умови міцності та характер контактної взаємодії кулькових поршнів із біговою доріжкою цієї ГОП [4]. Разом із тим ці питання не вичерпують множину процесів і станів, які реалізуються у процесі роботи ГОП-900 та які впливають на її технічні характеристики. Отже, ці процеси і стани потребують аналізу задля

установлення відповідних закономірностей та обґрунтування на цій основі певних рекомендацій стосовно проєктно-технологічних рішень, що визначають технічні характеристики гідропередачі на етапі розроблення та модернізації. Ця проблематика сформувала напрямки досліджень, опісані у роботі.

Аналіз конструкцій, моделей та методів досліджень процесів і станів у гідромашинах різних типів.

Аналіз конструкцій та розрахунків гідропередач. У роботі [5] розроблено фізико-математичні моделі планетарного гідромотора, які дозволяють моделювати процеси, що відбуваються

© І. П. Гречка, М. М. Ткачук, В. І. Сериков, М. А. Ткачук,
А. В. Грабовський, Г. В. Ткачук, А. Ю. Васильєв,
О. С. Льозний, С. О. Голенко, 2025

в робочих умовах. Розроблено розрахункову схему та математичний апарат для визначення тиску та витоків напірної рідини в зазорі, утвореному торцевими поверхнями розподільників, які дають змогу досліджувати зміну робочих параметрів гідродвигуна. Вивчаючи особливості розподільчої системи серійного гідромотора, встановлено, що незначні коливання прохідної частини (до 3%) викликають досить значні (до 71%) коливання тиску. Це спричиняє втрати рідини, що проходить через гідромотор, до 10% і коливання кутової швидкості вихідного вала – до 11%. Відсутність перепадів тиску в напірній лінії розподільної системи модернізованого гідромотора забезпечує стабільність його робочих параметрів. Результати проведених досліджень дають змогу прогнозувати зміни робочих параметрів планетарних гідромоторів, що працюють у складі гідропривода, на етапі проектування.

У роботі [6] здійснено дослідження, спрямоване на підвищення енергоефективності самохідної техніки в аграрному секторі, в основному за рахунок покращення гідропривода вихідних характеристик активних робочих органів. Гідропривод з планетарними гідромашинами є поширеним компонентом сільськогосподарської техніки. Результати попередніх досліджень показали, що під час експлуатації планетарних гідромашин зазор між роторами часто перевищував критичне значення, що призводило до нестандартних змін вихідних параметрів системи. Передбачалося, що вирішення цієї проблеми дозволить стабілізувати вихідні характеристики планетарних гідравлічних машин. Для цього була розроблена фізична модель взаємного руху роторів з урахуванням зазору між ними, а також схема їхнього руху. На основі цієї моделі отримано математичні залежності зміни кутової швидкості роторів орбітальних гідромоторів. Характер змін вихідних параметрів підтверджено результатами теоретичних досліджень, що виявили зниження кутової швидкості, об'ємного та загального коефіцієнта корисної дії.

У роботі [3] на основі аналізу еволюції конструкцій, а також розробки нових матеріалів і технологій у сфері об'ємних аксіально- та радіальнопоршневих гідромашин показано прогрес у підвищенні їх технічних характеристик завдяки збільшенню робочого тиску й частоти обертання, а також адаптації до умов високотемпературних режимів експлуатації. Завдяки впровадженню інноваційних антифрикційних матеріалів і високоточних верстатних технологій обробки деталей, у радіальнопоршневих багатоциклових гідромоторах вдалося здійснити перехід від паркування до пар ковзання, що значно зменшило радіальні габарити та масу системи при одночасному підвищенні частоти обертання. Іншим важливим досягненням є перехід на торцеві, більш герметичні гідророзподільники замість цапфових, що дозволило підвищити об'ємний коефіцієнт корисної дії (ККД) гідромоторів. Для перспективних швидкісних гідропередач з

кульками-поршнями розроблено рекомендації щодо вибору сталей та контролю їх виробництва з використанням методів матеріалознавства. Запропоновано також виготовлення кульок-поршнів із керамічних матеріалів, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності таких систем.

У роботі Hutsol T. [7] описано дослідження, присвячені застосуванню енергоефективних гідромоторів у ходових модулях мехатронних систем для різних типів самохідних машин, зокрема будівельних, дорожніх, комунальних, сільськогосподарських, залізничних тощо. Зазначені роботи мають широке застосування в різних галузях європейської економіки і можуть сприяти практичній реалізації принципів «Європейської зеленої угоди». В результаті проведених досліджень були розроблені розрахункові схеми та математичний апарат, які дозволяють визначити оптимальне зусилля в зоні контакту рухомого та нерухомого розподільників. Для оцінки геометричних параметрів ступінчастих поверхонь цих розподільників, що забезпечують утворення масляної плівки в зоні контакту, розроблено структурно-функціональну схему математичної моделі, яка дає можливість отримати кількісну оцінку приросту продуктивності системи розподілу. За результатами досліджень встановлено, що при раціональному проектуванні елементів розподільної системи, за рахунок зменшення зусилля затискання на 3–5 %, витік через торцевий зазор зменшується на 26 %. Це зменшення витoku в контактній зоні дає можливість підвищити продуктивність розподільної системи на 2,4 % завдяки зростанню об'ємного ККД, що досягається за рахунок зниження втрат. Метою даної роботи є обґрунтування оптимальних геометричних параметрів елементів розподільчої системи, які забезпечують підвищення ефективності використання планетарного гідромотора шляхом дослідження робочих процесів, що відбуваються в його розподільчій системі.

Одним із важливих науково-практичних напрямів є дослідження, присвячені ходовим модулям, зокрема роботам Bulgakov V. та ін. [8], що орієнтовані на використання вискоефективних гідромоторів у відповідних системах.

Основними компонентами планетарної гідравлічної машини (ГМ), що забезпечують її ефективну роботу, є система роторів [6, 9] та система розподілу [10, 11]. Система роторів включає зовнішній ротор 10, оснащений вставними зубцями (роликами) 1, та внутрішній ротор 2, що утворюють гіпоциклоїдне зачеплення (рис. 1) [6]. Система розподілу складається з рухомого розподільника 3 та нерухомого розподільника 6. До складу системи розподілу також входять вал 9 і передня кришка 11, що забезпечують подачу та відведення робочої рідини.

Основним недоліком планетарних гідромашин (ПГМ) є нерівномірність їх вихідних характеристик, що виникає через гідравлічні та

об'ємні втрати в системі розподілу. Ці втрати зумовлені нераціональною конструкцією елементів розподільної системи, геометричні параметри яких визначають необхідне зусилля для забезпечення постійного контакту між рухомих і нерухомих розподільниками. Забезпечення стабільного та якісного контакту між дистриб'юторами є ключовим чинником стабілізації вихідних характеристик ПГМ.

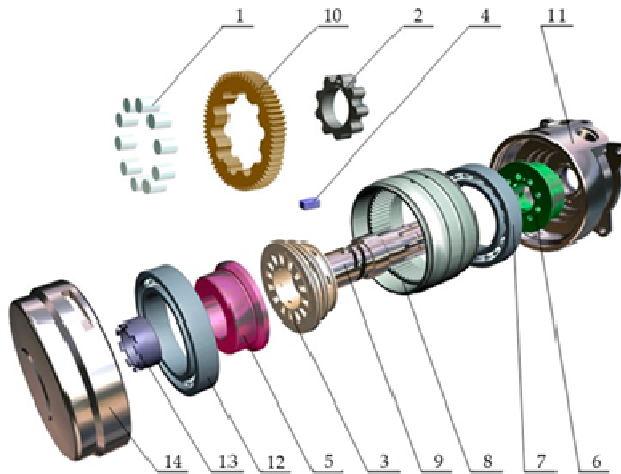


Рисунок 1 – Планетарний гідромотор:

1 – зубці (ролики), 2 – внутрішній ротор, 3 – рухомий розподільник, 4 – шпонка, 5 – шочка, 6 – нерухомий розподільник, 7 і 12 – радіально-упорні шарикопідшипники, 8 – тіло, 9 – вал, 10 – внутрішній ротор, 11 – передня кришка, 13 – гайка, 14 – задня кришка [6]

Отже, дослідження робочих процесів у стиковій системі розподілу ПГМ планетарного типу з метою обґрунтування оптимальних геометричних параметрів елементів системи гідророзподілу, що сприятимуть підвищенню ефективності використання ПГМ, є нагальним завданням.

У роботі [12] розглянуто можливості застосування методів гідродинамічних розрахунків у гідравлічних машинах із використанням програмних пакетів CFD. Для підвищення продуктивності роторно-планетарного насоса запропоновано модель навантаження, яка дає можливість визначити розподіл тиску в кожній із робочих камер [13]. Однак варто зазначити, що подача робочої рідини та принцип дії планетарних гідромашин (ПГМ) орбітального типу відрізняються від гідравлічних машин з планетарним ротором.

Проаналізувавши наявні наукові публікації з метою обґрунтування досліджуваного питання на основі сучасного стану знань, можна стверджувати, що публікації українських дослідників, таких як А. Панченка, А. Волошиної, С. Кюрчева, є актуальними та становлять основне джерело інформації щодо розрахунку, проектування та експлуатації планетарних (орбітальних) гідравлічних машин, починаючи з 2018 року.

У роботі Alrefo I. F. та ін. [14] розроблено метод згладжування робочих поверхонь статора і ротора з використанням комп'ютерного

моделювання для усунення впливу ротора на статор під час їх взаємодії. Метою статті є вирішення проблеми заклинювання роторно-планетарних машин, яке виникає внаслідок самоіндукованого вихору зворотного сухого тертя, що утворюється при взаємодії системи ротор/статор. Пропонується усунути цей недолік шляхом вдосконалення геометрії робочих поверхонь ротора та статора.

В основі роботи роторних і планетарних механізмів лежить взаємодія ротора і статора, що є однією з основних проблем стабільності та безпеки обертових машин. Тип тертя в таких системах має вирішальне значення для прогнозування реакцій поворотної системи [15].

Аналіз здійснених досліджень дає підстави для висновку, що методи розрахунку не охоплюють усі аспекти роботи гідропередач. Зокрема необхідно здійснити аналіз методів аналізу напружено-деформованого стану елементів гідропередач та інших конструкцій.

Аналіз методу скінченних елементів як базового при дослідженні напружено-деформованого стану елементів конструкцій. Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) сприяє поліпшенню якості, міцності та безпеки, зокрема, бойових броньованих машин. Так, метою роботи [16] є детальне дослідження явища вибуху та оцінка реакції конструкцій, виготовлених із сендвіч-панелей, на вибухове навантаження. Для моделювання динамічної реакції конструкції на вибухи використовується метод скінченних елементів. Явне моделювання та аналіз здійснюються за допомогою програмного забезпечення ABAQUS CAE. Для визначення вибухового навантаження на нижню обшивку панелі, що тестується на типовій броньованій машині, застосовується код симуляції повітряного вибуху. Структурний аналіз включає оцінку переміщень, напружень за критерієм фон-Мізеса та внутрішньої кінетичної енергії. Для моделювання розглядаються три варіанти вибухових навантажень, що дає можливість більш детально порівняти відгуки конструкцій. Аналізуються три різні варіанти конструкцій та матеріалів, зокрема стільникові та гофровані геометричні моделі, а також матеріали з м'якої сталі, середньовуглецевої сталі та легваної сталі. Отримані результати відкривають перспективи для розробки керівних принципів проектування легких конструкційних армуючих елементів.

Наукові дослідження, що використовують МСЕ для аналізу процесів і станів у елементах бойових броньованих машин (ББМ), зазвичай охоплюють кілька ключових аспектів. Один з основних напрямів цих досліджень полягає у моделюванні напружено-деформованого стану. У цьому контексті вчені розробляють складні МСЕ-моделі для оцінки напружень та деформацій у різних конструктивних елементах ББМ. Це включає моделювання пластичних деформацій матеріалів, їх руйнування під дією вибухових навантажень або ударів, а також врахування неоднорідностей матеріалів, що значно

впливає на поведінку конструкцій у реальних умовах експлуатації.

У статті [17] розглянуто суть нанотрибологічних процесів у матеріалах, що взаємодіють у зразках деталей, з використанням методів апарату поверхневих сил, із скануючої тунельної та атомно-силової мікроскопії. Обґрунтування механізмів виникнення цих процесів здійснюється за допомогою методів молекулярної динаміки та класичної контактної механіки. Особлива увага приділяється дослідженню сухого адгезійного тертя та безконтактного динамічного тертя в трибоконтактах, а також фізичним процесам, що відбуваються в зоні «прилипання-ковзання», адгезійним ефектам та іншим факторам, що впливають на тертя. Проаналізовано вплив бічних та нормальних сил, що діють на зонд. Зонд розглядається як сукупність точкових частинок із зосередженою масою і багатоатомною структурою матеріалу. Контакт та переміщення зонда по поверхні зразка вивчаються в контексті системи «зонд-поверхня», де мінімізується потенційна енергія, враховуються бокове навантаження, а також консервативні й дисипативні сили.

Ефект «прилипання-ковзання» детально обґрунтовано за допомогою апарату поверхневих сил, а атомна періодичність цього ефекту пояснюється через модель утворення і розриву адгезійних зв'язків та модель «атом-магніт». Показано, що закономірності процесів «прилипання-ковзання» можуть бути описані через параметри напружень зсуву та питомої роботи адгезії.

Дослідження також встановило суттєвий зв'язок між процесами тертя і адгезії. Визначено кореляцію між макроскопічними значеннями поверхневої енергії матеріалів і їх модулем зсуву для однорідних контактів.

На основі виявлених адгезійних ефектів та ефекту «прилипання-ковзання» можна управляти силами тертя та створювати умови, що сприяють мінімізації тертя, що, у свою чергу, забезпечує підвищену зносостійкість трибологічних з'єднань деталей, їх надійність та максимальну ефективність функціонування машин і механізмів.

У роботі Aulin V. V. та ін. [18] досліджено напружено-деформований стан поверхневого шару деталей під час застосування триботехнологій обкатки та відновлення.

У дослідженні Marchenko D. D. та Matvyeyeva K. S. [19] представлені експериментальні дослідження та статистичні моделі, що описують вплив різних режимів обробки на якість поверхневого шару та циклічну довговічність армованих деталей машин. Встановлено, що на ефект зміцнення, виснаження запасу пластичності металу та утворення залишкових напружень значною мірою впливають ефективний зазор різця, натяг та радіус профілю ролика. Результати показали, що комбінована обкатка забезпечує високу циклічну довговічність зміцнених деталей, що витримують багатоциклові втомні навантаження до 8 млн циклів, що в 3,5 рази перевищує довговічність неармованих деталей і в

1,5 рази – деталей, зміцнених поверхневою пластичною деформацією. Дослідження також показали, що максимальна циклічна довговічність деталі досягається при мінімальних значеннях ефективного зазору різця, максимальних значеннях радіусу профілю ролика та ефективному натягу ролика 0,6 мм, що відповідає ступеню вичерпання запасу пластичності при обробці розмірно-сумісною прокаткою ($\Psi \approx 0,65$).

На основі теоретичних та експериментальних результатів розроблено методику та алгоритм проектування технології обробки розмірною комбінованою обкаткою. Окрім того, створено комп'ютерну програму, яка дає можливість за заданими режимами обробки оцінювати якість поверхневого шару та циклічну довговічність деталі, а також оптимізувати режими обробки для досягнення заданих характеристик. Розроблений технологічний процес зміцнювальної обробки деталей машин комбінованою мірною обкаткою дає можливість формувати стискаючі залишкові напруження в поверхневому шарі деталі, що підвищує продуктивність праці до 2 разів при збереженні або покращенні заданих параметрів якості поверхневого шару.

У статті Marchenko D. D. та ін. [20] проведено огляд інформаційних матеріалів, що стосуються ефективності поверхневої пластичної деформації з метою підвищення зносостійкості тертєвих пар. Аналіз показав, що значний вплив на підвищення зносостійкості деталей має стабілізація зусиль кочення, а також оптимальні режими кочення елементів, що взаємодіють через ролики.

У роботі [21] розглянуті методи аналізу напружено-деформованого стану елементів радіальнопоршневих гідропередач з урахуванням контактної взаємодії. Для цього були розроблені модифікації методу граничних елементів. Проведено аналіз впливу кількості циліндрів на напружено-деформований стан блоку циліндрів, а також вивчено вплив профілю бігової доріжки на розподіл контактної тиску в зоні спряження з кульовим поршнем. Здійснено дослідження впливу різних профілів бігової доріжки на характер розподілу та величину контактної тиску. Отримані дані стали основою для розробки рекомендацій щодо обґрунтування проектних параметрів елементів радіальнопоршневих гідропередач.

У роботі [22] розглянуті розрахункові схеми для математичного моделювання елементів, що працюють у складі гідрооб'ємної передачі, а також математичні моделі для оцінки напружено-деформованого стану цих елементів. Використовуючи розроблене програмне забезпечення, була знайдена оптимальна форма внутрішньої геометрії робочих каналів блоку розподільників цапф гідропередачі, яка забезпечує необхідну міцність та жорсткість блоку, а також сприяє зниженню втрат потужності під час роботи гідропередачі.

У роботі [23] описана радіально-поршнева гідравлічна трансмісія з кулько-поршнями ГОП-

900. Вона складається із насоса та гідромотора. Робочий об'єм – 680 см^3 , максимальна частота обертання гідромотора до 3100 хв^{-1} , тиск до 32 МПа, вихідна потужність до 700 кВт.

У роботі [24] здійснено аналіз компонентів гідравлічної системи трансмісії самохідної машини з точки зору розподілу теплової енергії в процесі роботи при режимах транспортування та максимального навантаження. В результаті аналізу були визначені напрямки руху теплової енергії в межах внутрішніх та зовнішніх контурів гідравлічної системи. Також отримано залежності силових та кінематичних параметрів роботи системи в залежності від режимів навантаження та теплового стану окремих її елементів. Отримані результати мають практичне значення для кращого розуміння теплової поведінки гідравлічного приводу та можуть бути використані для розробки методичних підходів до вибору обладнання для системи охолодження.

Слід зазначити, що гідропередачі знайшли застосування у бронетехніці. Так, є позитивний досвід їх використання у Бредлі [25].

Зокрема, привертає увагу модернізований варіант автомобіля Bradley, розроблений компанією BAE Systems за контрактом з армією США в рамках стратегії модернізації бойових машин сухопутних військ і допомагає забезпечити готовність військ бронетанкових бригад бойових груп.

Модифікація серії A4 передбачає установку нового 8-циліндрового дизельного двигуна Cummins VTA903E-T675 потужністю 675 кінських сил, нової гідравлічної трансмісії HMPT-800-3ECB, що дає можливість встановити на M2A4 Bradley Iron Fist Light Decoupled (IFLD) (система активного захисту бронетехніки, розроблена ізраїльською компанією Elbit Systems).

Як зазначають в компанії, нова версія Bradley є найкращою системою бойової машини у світі [25], яка оснащена новітньою оцифрованою електронікою для оптимальної обізнаності про ситуацію, підключення до мережі та спілкування в бойовій групі бронетанкової бригади.



Рисунок 2 – Загальний вигляд Bradley M2A4 та гідравлічної трансмісії Allison

Bradley M2 може оснащуватися також восьмициліндровим чотиритактним V-подібним турбодизелем VTA-903T виробництва фірми Cummins Engine Company. Потужність двигуна складає 500 л. с. при 2600 об/хв. Крутний момент дорівнює $1390 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при 2350 об/хв.

У єдиному блоці з двигуном встановлено гідромеханічну трансмісію HMPT-500, що випускається компанією General Electric. Трансмісія має три фіксовані передачі вперед і одну назад, дає можливість плавно змінювати тягове зусилля та радіус повороту на кожній передачі залежно від рівня опору руху та положення педалі «газу». Електромеханогідравлічна система забезпечує автоматичне перемикавання передач. Для полегшення запуску в холодну погоду є фрикційна муфта, що роз'єднує двигун і трансмісію. Підведення потужності до бортових редукторів, що знаходяться у виступах нижнього лобового листа, здійснюється за допомогою гідрооб'ємної передачі. Місткість паливних баків 662 літри. Запас ходу шосе – 480 км.

Гідрооб'ємна передача у Bradley – це складна система, яка відповідає за передачу потужності від двигуна до коліс та інших механізмів бойової броньованої машини M2 Bradley. Ця передача має гідравлічну систему, яка керує роботою трансмісії та інших систем машини.

Гідрооб'ємна передача у Bradley складається з наступних основних компонентів:

гідравлічна система включає в себе насос, розподільник, циліндри та інші гідравлічні елементи, які створюють потік рідини для керування рухом та іншими функціями машини;

трансмісія – механічна трансмісія, що використовується для передачі потужності від двигуна до коліс та гусениць, керується гідравлічною системою;

керування – гідравлічна система керування включає в себе рульові циліндри для керування кермом, а також інші циліндри для керування рухом інших механізмів;

холостий хід, система гідропроводу дозволяє заблокувати трансмісію та інші механізми у холостому ході для економії палива або забезпечення безпеки;

захист від перегріву, гідрооб'ємна передача має систему охолодження, яка запобігає перегріву рідини в системі під час тривалої роботи.

Гідрооб'ємна передача у Bradley є ключовою складовою системи керування та передачі потужності та допомагає забезпечити його ефективну та надійну роботу.

У гідрооб'ємній передачі в Bradley використовується гідравлічна система, яка включає в себе насос, гідравлічний мотор (або циліндр) та гідравлічний розподільник. Насос приводиться в рух двигуном і створює потік гідравлічної рідини під високим тиском. Цей потік рідини подається до гідравлічного мотора, де він використовується для створення обертального моменту для приводу коліс або гусениць. Рухливий момент може бути регульований шляхом зміни потоку гідравлічної рідини або тиску в системі.

Як засвідчив здійснений аналіз, натеper відсутній комплексний підхід до досліджень процесів і станів у гідропередачах. Це стримує формування їх прогресивних технічних рішень.

Відповідно, потрібне створення теоретичних основ таких розробок.

Особливу актуальність цій проблемі надає той факт, що в Україні розроблено унікальну гідропередачу для оснащення перспективних трансмісій важких транспортних засобів спеціального призначення. Проте, повного і, головне, комплексного вирішення проблем, що при цьому постали [1–4, 21–23, 26], на тепер не існує.

Мета роботи – розроблення базових підходів до аналізу зв'язаних фізико-механічних процесів і станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач та ілюстрація їх застосовності на окремих напрямках досліджень стосовно елементів гідропередачі ГОП-900 для оснащення перспективних танкових трансмісій.

Завдання досліджень:

1) створення методологічних основ аналізу зв'язаних фізико-механічних процесів і станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач;

2) експрес-аналіз чинників, які впливають на процеси і стани в елементах гідропередачі ГОП-900;

3) ілюстративний аналіз застосування базових підходів до аналізу зв'язаних фізико-механічних процесів і станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач.

Створення методологічних основ аналізу зв'язаних фізико-механічних процесів і станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач на прикладі ГОП-900. Якщо звернутися до конструкції радіальнопоршневої гідропередачі ГОП-900 [3] (рис. 3), то можна зробити висновок, що її функціонування визначають такі процеси і стани:

A_1 – кінематика елементів, поєднаних у систему «блок циліндрів (БЦ) (ротор) – кулькові поршні (КП) – статорне кільце (СК) із біговою доріжкою (БД)» (рис. 4).

A_2 – динаміка КП при русі у циліндрах та перекочуванні по БД під дією тиску робочої рідини (РР) на стороні гідромотора (ГМ) (або навпаки – на стороні насоса (Н));

A_3 – контактна взаємодія (КВД) КП із БД під дією системи діючих сил;

A_4 – гідродинамічні, перехідні та усталені процеси у РР при переході між областями високого та низького тиску (ВТ та НТ відповідно) та перебування у цих областях;

A_5 – напружено-деформований стан (НДС) та міцність КП під дією навантажень;

A_6 – номінальний тиск в областях ВТ і НТ та регульовально-керуючий сигнал (ексцентриситет СК відносно осі вала ротора);

A_7 – силові потоки та швидкості (визначають рівень потужності) у системі «двигун – система керування – трансмісія – рушій» (рис. 4).

У системі процесів і станів A_1 – A_7 реалізуються взаємозв'язки між ними. Це спонукає розглядати їх як певну систему зв'язаних процесів і станів, тобто застосовувати системний підхід. Разом із тим, вичленивши підсистему A_1 – A_5 , дію A_6 , A_7 можна розглядати (із певною мірою

адекватності та точності) як задані зовнішні відносно цієї підсистеми умови.

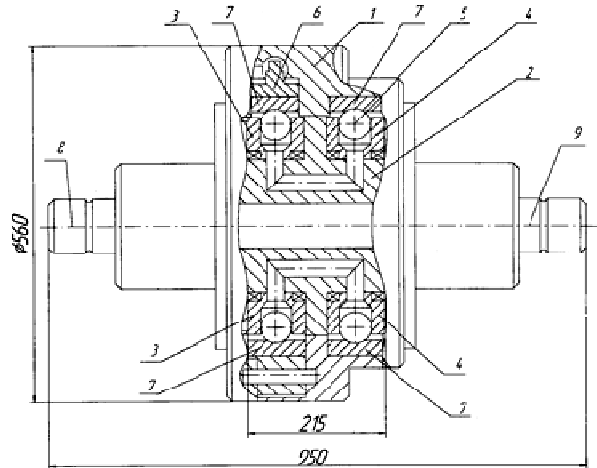


Рисунок 3 – Гідропередача ГОП-900 із кульковими поршнями [21]: 1 – корпус; 2 – блок цапфових розподільвачів; 3 – блок циліндрів насоса (ротор); 4 – блок циліндрів гідромотора (ротор); 5 – кульковий поршень; 6 – статор насоса; 7 – обойми (бігові доріжки) насоса та гідромотора; 8 і 9 – вхідний і вихідний вали гідропередачі

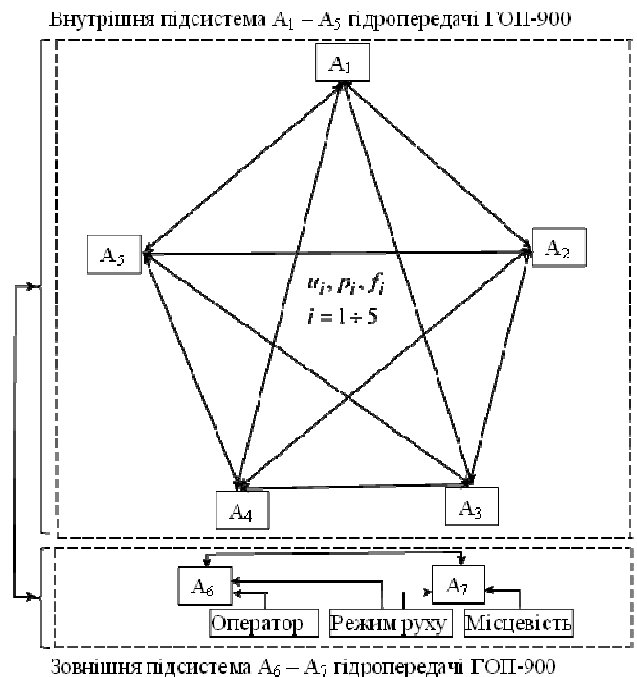


Рисунок 4 – Взаємозв'язок та взаємовплив процесів і станів A_i у досліджуваній гідропередачі ГОП-900

Такий підхід дещо спрощує досліджувану систему, проте не робить її (підсистему) набором ізольованих процесів і станів. Навпаки, саме у цій підсистемі A_1 – A_5 якраз і діють сильні взаємозв'язки. Отже, постає проблема визначення зв'язаних процесів і станів у досліджуваній підсистемі A_1 – A_5 .

Мотивуючись зв'язаністю та багатофакторністю досліджуваної підсистеми для опису процесів і станів у ній доцільно залучати метод узагальненого параметричного моделювання

(МУПІМ) процесів і станів у складних системах [26].

Відповідно, маємо узагальнений параметричний опис досліджуваної підсистеми в операторному вигляді:

$$L(u, P, f, t) = 0, \quad (1)$$

де $L = \bigcup_i L_i$ – оператор процесів і станів, що поєднує

частинні оператори L_i , відповідні A_i ;

$u = \bigcup_i u_i$ – масив змінних станів, що об'єднує

змінні u_i , відповідні A_i ;

$P = \bigcup_i P_i$ – масив узагальнених параметрів, що

складаються із підмасивів P_i , котрі визначають окремі процеси і стани A_i ;

$f = \bigcup_i f_i$ – масив навантажень (аналогічно –

складається із підмасивів f_i , які відповідають A_i);

t – час.

Тут $i = 1-5$ – номери процесів і станів у досліджуваній підсистемі $A_1 - A_5$.

Таким чином, досліджуються процеси і стани, що записуються у операторному вигляді:

$$L_i(u_i, P_i, f_i, t) = 0, \quad (2)$$

Між конкретними A_i діють зв'язки на рівні змінних стану u_i , навантажень f_i та узагальнених параметрів P_i (див. рис. 4).

Гідропередача має масив технічних характеристик

$$T = \bigcup_k T_k(P, u), \quad k = 1, \dots, N_T \quad (3)$$

де T_k – окремі їх компоненти;

N_T – кількість цих компонент.

Для цих компонент T_k можливі різні вимоги типу

$$T_k \rightarrow \max \quad (4)$$

або

$$\tilde{T} = \sum_k \gamma_k T_k \rightarrow \max, \quad (5)$$

де γ_k – вагові коефіцієнти окремого компонента T_k у комплексному показнику $\tilde{T}$.

За частинні критеріальні характеристики можуть слугувати: потужність, ККД, робочий об'єм, довговічність, габаритні розміри тощо.

З іншого боку, на окремі характеристики процесів і станів H_m існують обмеження типу

$$H_m(u, P) \leq [H_m], \quad (6)$$

де $[H_m]$ – рівень m -го обмеження.

Таким чином, формується у загальному вигляді задача досягнення критеріїв (4), (5) та обмежень (6) за задоволення систем рівнянь (1). Це задача обґрунтування узагальнених параметрів P за

заданими критеріями та обмеженнями. Можливі й інші постановки задач:

аналізу

$$u = u(f, P = \text{const}, t); \quad (7)$$

параметричного аналізу

$$T = T(f = \text{const}, P); \quad (8)$$

чутливості

$$\nabla_f T = \frac{\partial T}{\partial f}; \nabla_P T = \frac{\partial T}{\partial P} \quad (9)$$

тощо.

Співвідношення (1) – (9) описують задачі аналізу зв'язаних процесів і станів у елементах гідропередачі та синтезу її прогресивних технічних рішень в узагальненому параметричному просторі.

Експрес-аналіз чинників, які впливають на процеси і стани в елементах гідропередачі ГОП-900. У розрізі окремих процесів і станів A_i ($i = 1 - 5$) можна здійснити експрес-аналіз найбільш значущих для них чинників.

1. Так, для A_1 (кінематика елементів, поєднаних у систему «БЦ (ротор) – КП – БД СК») важливими параметрами є радіуси ротора R_p та статора R_c , а також ексцентриситет e у розташуванні центрів БЦ та СК (рис. 5). Кінематична змінна – кут поточного повороту БЦ відносно умовного початкового $\varphi = \omega t$, де ω – кутова швидкість обертання ротора (за

нерівномірному руху $f = \int_0^t \omega dt$). При цьому КП

здійснює декілька рухів. Його центр переміщується по колу із центром, що співпадає із центром статора та з радіусом $(R_c - r)$, де r – радіус поршня. Крім того, поршень здійснює зворотно-поступальний рух у циліндрі ротора. Лінійне зміщення $\delta = \delta(\varphi)$. Також поршень обертається навколо свого центру так, що це узгоджено із його коченням по БД СК. Із урахуванням цього у точках контакту КП із внутрішньою стінкою циліндрів Н або ГМ відбувається проковзування зі швидкістю

$$v = \dot{\delta} \pm \Omega \cdot r,$$

де Ω – частота обертання поршня навколо власного центру (знаки $\pm$ – залежно від того, це Н чи ГМ).

Враховуючи, що у реальних конструкціях виконується співвідношення

$$e < r, \quad r \ll R_p, \quad r \ll R_c, \quad (10)$$

для кінематичних характеристик можна записати приблизні співвідношення, які, проте, годяться для оцінок рівнів цих величин (рис. 5):

$$\delta \approx e \cdot \cos \varphi, \quad \dot{\delta} \approx -e \cdot \omega \sin \varphi; \quad (11)$$

$$\gamma \approx \frac{e}{R_c - r} \sin \varphi = Ke \sin \varphi; \quad (12)$$

$$\psi = \gamma + \varphi; \quad (13)$$

$$\dot{\psi} = \dot{\gamma} + \dot{\varphi} \text{ (при } \omega = \text{const} = \omega + Ke \cdot \omega \cos \varphi); \quad (14)$$

$$\ddot{\psi} = \ddot{\gamma} + \ddot{\phi} \quad (\text{при } \omega = \text{const} \quad \ddot{\psi} = -Ke \cdot \omega^2 \sin \phi). \quad (15)$$

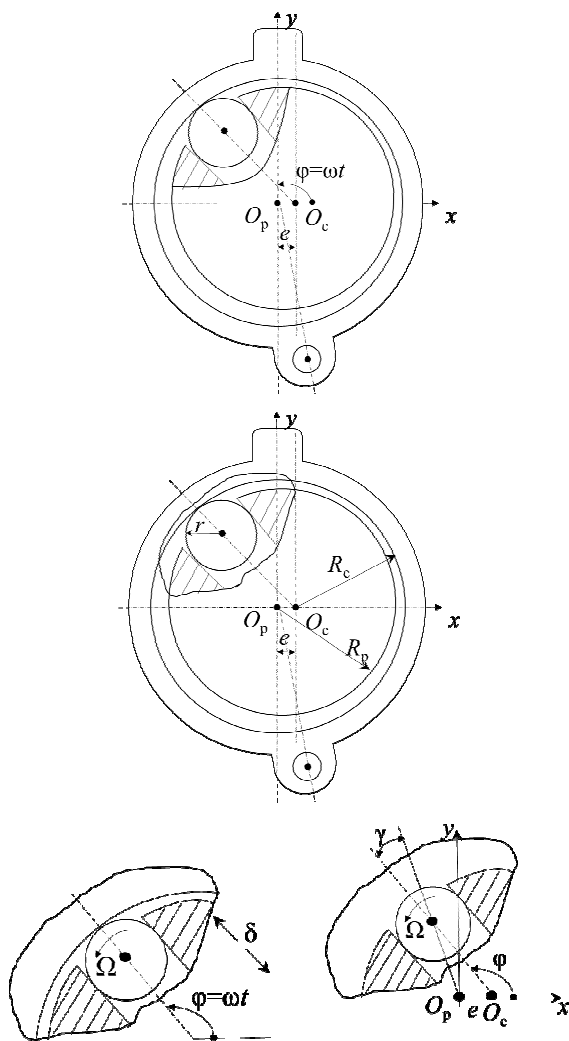


Рисунок 5 – До кінематики гідропередачі

Із аналізу співвідношень (10) – (15) випливає, що навіть за рівномірного обертання ротора у системі координат, пов'язаній із статором, рух по колу постійного радіуса відбувається із нерівномірною кутовою швидкістю $\dot{\psi}$. При цьому реалізується, окрім нормального

$$a_n = \dot{\psi}^2 (R_c - r); \quad a_n = \omega^2 (R_c - r)(1 + \omega Ke \cos \phi) \quad (16)$$

ще й кутове прискорення

$$a_\tau = \ddot{\psi} (R_c - r); \quad a_\tau = -\omega^2 r Ke \sin \phi. \quad (17)$$

Тут, враховуючи, що $Ke \ll 1$, видно що

$$|a_n| \gg |a_\tau|. \quad (18)$$

А₂. Динаміка КП при русі у циліндрах та перекочуванні по БД під дією тиску робочої рідини на стороні гідромотора (або навпаки – на стороні насоса).

Із урахуванням кінематичних співвідношень (10)–(15) рівняння рівноваги КП мають вигляд (із точністю до величин першого порядку малості)

(рис. 6)

$$\begin{cases} N_c + N_p \cdot \sin \gamma \approx m \dot{\psi}^2 (R_c - r) + F \cdot \cos \gamma \\ N_p \cdot \cos \gamma \approx F \cdot \sin \gamma \\ T_c \approx T_p, \max T_c = K_c \cdot N_c; \max T_p = K_p \cdot N_p. \end{cases} \quad (19)$$

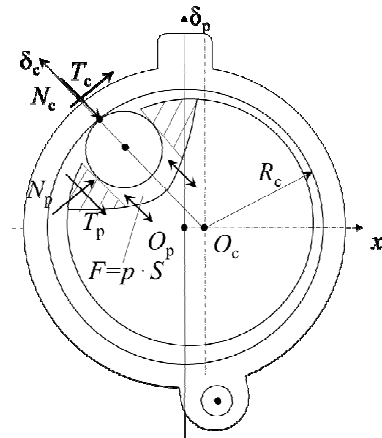


Рисунок 6 – Динаміка руху кульового поршня

Тут слід зазначити, що з урахуванням того, що коефіцієнти тертя у з'єднаннях КП із ротором k_p і статором k_c малі, справедливі оцінки

$$T_p \ll N_p, \quad T_c \ll N_c, \quad N_p \ll N_c. \quad (20)$$

Таким чином, на аналіз контактної взаємодії передаються силові фактори, які мають рівень, що визначається із системи рівнянь (19).

А₃. Контактна взаємодія КП із БД під дією системи діючих сил.

Із станів аналізу А₁ та А₂ на етапі А₃ визначаються умови контактної взаємодії (рис. 7):

$$u_c^v + u_n^v < \delta_{cn}, \quad (21)$$

$$u_p^v + u_n^v < \delta_{pn}, \quad (22)$$

$$q_c \geq 0: \int_{S_{nc}} q_c dS = N_c, \quad (23)$$

$$q_c \geq 0: \int_{S_{np}} q_p dS = N_p. \quad (24)$$

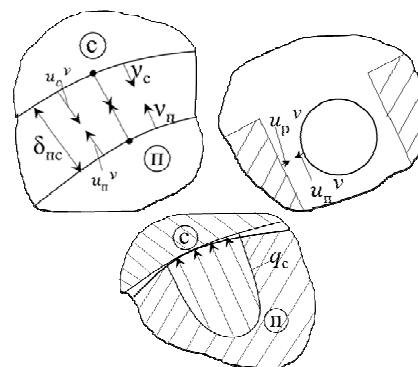


Рисунок 7 – Умови контактної взаємодії

Тут (21), (22) – кінематичні умови контакту,

сформульовані відносно поршня (u_p^v), статора (u_c^v) та ротора (u_r^v). Між цими поверхнями початковий зазор визначається розподілами $\delta_{сп}$ та $\delta_{рп}$ відповідно.

Умови (23), (24) відображають статичну еквівалентність розподілених невід'ємних тисків інтегрально силам взаємодії КП зі статором та ротором відповідно.

Для розв'язання системи рівнянь та нерівностей (21)–(24) потрібно розробити відповідний математичний апарат.

А₄. Гідродинамічні перехідні та усталені процеси у робочій рідині при переході між областями високого та низького тиску та перебування у цих областях.

При роботі радіальнопоршневої гідропередачі ГОП-900 у кожному циліндрі у підпоршневому об'ємі реалізується два режими:

- перехідні (при вході/виході із області високого/низького тиску у системі ГОП);
- усталені (при русі у областях високого/низького тиску у віддалені від моментів входу/виходу із них).

Відповідно, на усталених режимах діє номінальний робочий тиск p_n^0 (до рівня 35 МПа). На перехідних режимах

$$P_n = k_n p_n^0, \quad (25)$$

де k_n – деякий коефіцієнт пульсації тиску. Для його визначення необхідно розв'язати задачу про гідродинамічні перехідні процеси у циліндрі ГОП.

А₅. Напружено-деформований стан та міцність КП під дією навантажень.

Визначальним чинником при аналізі міцності елементів ГОП є їх НДС. Для визначення НДС елементів ГОП необхідно залучити систему співвідношень

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right); \frac{\partial \dot{\sigma}_i}{\partial x_j} + \dot{\rho}_i = 0; \dot{\sigma}_{ij} = C_{ij} \dot{\epsilon}_{ke}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3. \quad (26)$$

Тут рівняння теорії пружно-пластичного НДС сформовані у припущеннях (швидкостях) компонент вектору переміщень точок елементів u та тензорів деформацій ϵ та напружень σ . При цьому тензор модулів прирівнюють $C = C(u, \epsilon, \sigma, \dot{\sigma})$.

Для системи рівнянь (26) граничні умови формуються із урахуванням аналізу контактної взаємодії.

А₃. Контактна взаємодія КП із БД під дією системи діючих сил та гідродинаміки А₅.

Таким чином, сформована задача про аналіз НДС елементів ГОП стає не тільки складною, але і зв'язаною. Для її розв'язання необхідно розробити нові підходи, моделі та методи.

Важливою обставиною при аналізі напружено-деформованого стану та контактної взаємодії кулькових поршнів із БД є витоки робочої рідини по зазорах між ними. Слід підкреслити, що у постановці,

яка пропонується, приймається до уваги розподіл зазору не у номінальних геометричних формах цих зазорів, як у традиційних підходах, а в актуальному деформованому стані під дією навантажень. Якраз в цьому полягає взаємозв'язок та взаємовплив задач гідродинаміки та механіки деформівного твердого тіла.

У цілому, підсумовуючи викладені підходи та співвідношення, а також їх попередній експрес-аналіз [1, 2, 4, 21, 22, 26], можна зазначити, що у результаті окреслені загальні методологічні засади аналізу зв'язаних фізико-механічних процесів і станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач.

Висновки

1. У роботі окреслено загальні підходи до аналізу зв'язаних фізико-механічних процесів і станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач. Основні особливості цих підходів полягають, по-перше, у єдиному узагальненому параметричному описі різних процесів і станів у гідропередачі, а, по-друге, – у формуванні зв'язаних задач моделювання цих зв'язаних різномірних фізичних процесів. Таким чином, такі відмінності від традиційних підходів (тобто таких, які передбачають послідовне розв'язання низки незв'язаних задач) створюють переваги у створенні адекватних математичних моделей робочих процесів у гідропередачах, а також у обґрунтуванні їх прогресивних технічних рішень.

2. При попередньому загальному описі математичних моделей досліджуваних процесів і станів у гідропередачах визначено множину основних змінних станів та чинників. Вони є основою при формуванні більш докладних математичних моделей цих процесів і станів у ході подальших досліджень.

3. Здійснені оцінки окремих величин, що фігурують у розрахункових моделях процесів і станів у досліджуваних гідропередачах, що дає можливість здійснити їх ранжирування за мірою значущості.

Ці оцінки, зокрема, базуються на результатах попередніх досліджень [1–4, 21–23, 26], у яких викладені результати аналізу окремих процесів і станів, що протікають у такого типу передачах. Разом із тим, ці попередні дослідження мають частинний характер, і їх результати варто розглядати як початкові наближення. Проте вже ці дані, попри їх обмеженість, свідчать про необхідність подальших досліджень, причому – комплексних за охоптом процесів і станів у гідропередачах подібного типу.

У подальшому планується розвинути та втілити розроблені базові підходи до аналізу зв'язаних фізико-механічних процесів і станів у елементах радіальнопоршневих гідропередач.

Список літератури

1. Контактна механіка тіл із урахуванням нелінійних властивостей поверхневих та проміжних шарів: монографія / Ткачук М. М. Видання друге. Дніпро: Видавець Обдмко Ольга Станіславівна, 2023. 255 с.
2. Бібік Д. В. Синтез геометрії робочого каналу та її вплив на продуктивність гідрооб'ємної передачі типу ГОП-900.

- Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР. 2019. № 7 (1332). С. 8–12. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.7.02>
3. Аврунін Г. А., Глушкова Д. Б. (2023) Еволюція пар тертя в об'ємних гідромашинах завдяки досягненням у матеріалознавстві та технологіях. *Вісник ХНАДУ*, Вип. 103. С. 94–103. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.94>
 4. Ткачук М. М. Мікромеханічні моделі та методи осереднення властивостей матеріалів мережевої структури та проміжних шарів контактуючих тіл [Електронний ресурс] : дис. ... докт. техн. наук : спец. 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла / ТКАЧУК Микола Миколайович; Національна академія наук України Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України. Харків, 2019. 464 с.
 5. Kiurchev S., Luzan P., Zasiadko A., Radionov H., Boltianska N. Influence of the flow area of distribution systems on changing the operating parameters of planetary hydraulic motors. 2021. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. № 1021. P. 012037. doi:10.1088/1757-899X/1021/1/012037
 6. Panchenko A., Voloshina A., Sadullozoda S., Panchenko I., Mitin V. (2023) The changes in the output parameters of planetary hydraulic machines with the increase in the gap between their rotors. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 540–551. http://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_51
 7. Hutsol T. (2023) European Green Deal: Improving the Efficiency of Using Planetary Hydraulic Machines. *Energies*. 16(18), 6481. <https://doi.org/10.3390/en16186481>
 8. Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V., Adamchuk V., Kaminskiy V. (2021) Experimental investigation of plow-chopping unit. *Agriculture*. 11(1), 30. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010030>
 9. Panchenko A., Voloshina A., Luzan P., Panchenko I., Volkov S. (2021) Kinematics of motion of rotors of an orbital hydraulic machine. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1021, 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012045>
 10. Panchenko A., Voloshina A., Panchenko I., Pashchenko V., Zasiadko A. (2021) Influence of the shape of windows on the throughput of the planetary hydraulic motor's distribution system. In *DSMIE 2021: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*, LNME. 2, 146–155. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_15
 11. Voloshina A., Panchenko A., Boltynskiy O., Panchenko I., Titova O. (2018) Justification of the kinematic diagrams for the distribution system of a planetary hydraulic motor. *Int. J. Eng. Technol.* 7, 6–11. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19544>
 12. Rezvaya K., Krupa E., Shudryk A., Drankovskiy V., Makarov V. (2018) Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems*, 18308004. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559548>
 13. Volkov G., Smirnov V. (2019) Computation and structural methods to expand feed channels in planetary hydraulic machines. *J. Phys. Conf. Ser.* 1210, 012131. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1210/1/012131>
 14. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Miroshnyk O. (2023) Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Scientific Bulletin of the National Mining University*. 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
 15. Yang Y., Tang J., Chen G., Yang Y., Cao D. (2021) Rubimpact investigation of a single-rotor system considering coating effect and coating hardness. *Journal of Vibration Engineering Technologies*. 9(3), 491–505. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00243-0>
 16. Mubarak M. A. H., Prabowo A. R., Muttaqie T., Muhyat N. Dynamic Structural Assessment of Blast Wall Designs on Military-Based Vehicle Using Explicit Finite Element Approach / *Hindawi. Mathematical Problems in Engineering*. V. 2022. Article ID 5883404, 22 p. <https://doi.org/10.1155/2022/5883404>
 17. Aulin V. V., Tykhyi A. A., Kuzyk O. V., Lysenko S. V., Hryniv A. V., Zhylova I. V., Livitskiy O. M. Justification of the effect of the regularities of the flow of nanotribological processes in the materials of joint parts on the increase of wear resistance, reliability and efficiency of the functioning of machines and mechanisms / *Problems of Tribology*, V. 28, No 4/110-2023, P. 66–75. <https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/932/1383>
 18. Aulin V. V., Lysenko S. V., Hryniv A. V. [and others]. The stressed-deformed state of the surface layer of parts during the implementation of tribotechnologies of run-in and recovery. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences: coll. of science pr.* – Kropyvnytskyi: National Technical University, 2019. – Issue 1 (32). – P. 103–113.
 19. Marchenko D.D., Matveyeva K.S. (2022) Study of the Stress-Strain State of the Surface Layer During the Strengthening Treatment of Parts / *Problems of Tribology*. 27, 3/105, 82–88. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-82-88>
 20. Marchenko D.D., Artyukh V.A., Matveyeva K.S. (2020) Analysis of the influence of surface plastic deformation on increasing the wear resistance of machine parts. *Problems of Tribology*. 25, 2/96, 6–11. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-96-2-6-11>
 21. Ткачук М. М., Грабовський А. В., Ткачук М. А., Хлань О.В., Саверська М. С., Ткачук Г.В. Експериментальне дослідження контактної взаємодії кульового поршня радіальної гідропередачі з профільованою біговою доріжкою // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР, 2019, № 7 (1332). С. 132–147. Режим доступу: http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2019_7.pdf
 22. Ткачук М. М., Гречка І. П., Сериков В. І., Грабовський А. В., Вейлер В. С., Ткачук М. А., Лозний О. С., Ткачук Г. В., Коба А. М. (2024) Аналіз напружено-деформованого стану контактуючих елементів гідропередач для перспективних танкових трансмісій за варіювання та збурення форми поверхонь та властивостей матеріалів тіл. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Зб. наук. праць. Серія: Машинознавство та САПР. №1. С. 101–120. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.1.11>
 23. Samorodov V., Avrunin G. (2021) Solution of the problem of calculating the leakage working fluid in eccentric gap of the ball piston pair hydraulic fluid power machine. *Bulletin of the National Technical University «KhPI»*. Series: Hydraulic machines and hydraulic units, №1, P. 81–87. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/97af714e-2916-4755-977a-5829048f92f4/content>
 24. Шевцов В. М., Резва К. С.. Аналіз теплового стану складових гідравлічних систем в складі трансмісій самохідних машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. : Автомобіле- та тракторобудування = *Bulletin of the National Technical University «KhPI»*. Ser. : Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – № 1. – С. 53–60. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.1.07>
 25. M2 Bradley. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/M2_Bradley
 26. Tkachuk M. M., Zinchenko O., Grabovskiy A., Tkachuk M. A., Sierykov V., Domina N., Hrechka I. Contact interaction of bodies along congruent surfaces. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics* This link is disabled. 2024 (17), P. 32–43. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue17.4>

References (transliterated)

1. Kontaktna mekhanika til iz urakhuvanniam nelineiniykh vlastyivostey poverkhnelykh ta promizhnykh shariv: monohrafiia / Tkachuk M. M. Vydannia druhe. Dnipro: Vydavets Obdymko Olha Stanislavivna, 2023. 255 s.
2. Bibik D. V. Syntez heometrii robochoho kanalu ta yii vplyv na produktyvnist hidroobiemnoi peredachi typu HOP–900. *Visnyk NTU «KhPI»*. Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR. 2019. № 7 (1332). S. 8–12. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2019.7.02>
3. Avrunin H. A., Glushkova D. B. (2023) Evoliutsiia par tertia v obiemnykh hidromashynakh zavdiaky dosiahnenniam u materialoznavstvi ta tekhnolohiiakh. *Visnyk KhNADU*, Vyp. 103. S. 94–103. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.94>
4. Tkachuk M. M. Mikromekhanichni modeli ta metody oserednennia vlastyivostey materialiv merezhevoi struktury ta promizhnykh shariv kontaktuiuchykh til [Elektronnyi resurs] : dys. ... dokt. tekhn. nauk : spets. 01.02.04 – mekhanika deformivnoho tverdoho tila / TKACHUK Mykola Mykolaiovych; Natsionalna akademiia nauk Ukrainy Instytut problem mashynobuduvannia im. A.M. Pidhornoho NAN Ukrainy. Kharkiv, 2019. 464 s.
5. Kiurchev S., Luzan P., Zasiadko A., Radionov H., Boltianska N. Influence of the flow area of distribution systems on changing the operating parameters of planetary hydraulic motors. 2021. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. №

1021. P. 012037. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012037>
6. Panchenko A., Voloshina A., Sadullozoda S., Panchenko I., Mitin V. (2023) The changes in the output parameters of planetary hydraulic machines with the increase in the gap between their rotors. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 540–551. http://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_51
 7. Hutsol T. (2023) European Green Deal: Improving the Efficiency of Using Planetary Hydraulic Machines. *Energies*, 16(18), 6481. <https://doi.org/10.3390/en16186481>
 8. Bulgakov V., Aboltins A., Beloiev H., Nadykto V., Kyurchev V., Adamchuk V., Kaminskiy V. (2021) Experimental investigation of plow-chopping unit. *Agriculture*, 11(1), 30. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010030>
 9. Panchenko A., Voloshina A., Luzan P., Panchenko I., Volkov S. (2021) Kinematics of motion of rotors of an orbital hydraulic machine. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1021, 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012045>
 10. Panchenko A., Voloshina A., Panchenko I., Pashchenko V., Zasiadko A. (2021) Influence of the shape of windows on the throughput of the planetary hydraulic motor's distribution system. In *DSMIE 2021: Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*, LNME, 2, 146–155. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_15
 11. Voloshina A., Panchenko A., Boltynskiy O., Panchenko I., Titova O. (2018) Justification of the kinematic diagrams for the distribution system of a planetary hydraulic motor. *Int. J. Eng. Technol.* 7, 6–11. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19544>
 12. Rezvaya K., Krupa E., Shudryk A., Drankovskiy V., Makarov V. (2018) Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems*, 18308004. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559548>
 13. Volkov G., Smirnov V. (2019) Computation and structural methods to expand feed channels in planetary hydraulic machines. *J. Phys. Conf. Ser.* 1210, 012131. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1210/1/012131>
 14. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Miroshnyk O. (2023) Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
 15. Yang Y., Tang J., Chen G., Yang Y., Cao D. (2021) Rubimpact investigation of a single-rotor system considering coating effect and coating hardness. *Journal of Vibration Engineering Technologies*, 9(3), 491–505. <https://doi.org/10.1007/s42417-020-00243-0>
 16. Mubarak M. A. H., Prabowo A. R., Muttaqie T., Muhayat N. Dynamic Structural Assessment of Blast Wall Designs on Military-Based Vehicle Using Explicit Finite Element Approach / *Hindawi. Mathematical Problems in Engineering*, V. 2022, Article ID 5883404, 22 p. <https://doi.org/10.1155/2022/5883404>
 17. Aulin V. V., Tykhyi A. A., Kuzyk O. V., Lysenko S. V., Hrynkyv A. V., Zhylova I. V., Livitskyi O. M. Justification of the effect of the regularities of the flow of nanotribological processes in the materials of joint parts on the increase of wear resistance, reliability and efficiency of the functioning of machines and mechanisms / *Problems of Tribology*, V. 28, No 4/110-2023, P. 66–75. <https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/932/1383>
 18. Aulin V. V., Lysenko S. V., Hrynkyv A. V. [and others]. The stressed-deformed state of the surface layer of parts during the implementation of tribotechnologies of run-in and recovery. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences: coll. of science pr.* - Kropyvnytskyi: National Technical University, 2019. – Issue 1 (32). – P. 103–113.
 19. Marchenko D.D., Matvyeyeva K.S. (2022) Study of the Stress-Strain State of the Surface Layer During the Strengthening Treatment of Parts / *Problems of Tribology*, 27, 3/105, 82–88. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-82-88>
 20. Marchenko D.D., Artyukh V.A., Matvyeyeva K.S. (2020) Analysis of the influence of surface plastic deformation on increasing the wear resistance of machine parts. *Problems of Tribology*, 25, 2/96, 6–11. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-96-2-6-11>
 21. Tkachuk M. M., Grabovskiy A. V., Tkachuk M. A., Khlan O.V., Saverska M. S., Tkachuk H.V. Eksperymentalne doslidzhennia kontaktnoi vzaємodii kulovoho porshnia radialnoi hidroporedachi z profilovanoi bihovoio dorizhkoiu // *Visnyk NTU «KhPI»*. Seria: Mashynoznavstvo ta SAPR, 2019, № 7 (1332). C. 132–147. http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2019_7.pdf
 22. Tkachuk M. M., Hrechka I. P., Sierykov V. I., Grabovskiy A. V., Veiler V. S., Tkachuk M. A., Loznyi O. S., Tkachuk H. V., Koba A. M. (2024) Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu kontaktuiuchykh elementiv hidroporedach dlia perspektivnykh tankovykh transmisii za variuvannia ta zburennia formy poverkhon ta vlastyvostei materialiv til. *Visnyk NTU «KhPI»*. Zb. nauk. prats. Seria: Mashynoznavstvo ta SAPR. №1, S. 101–120. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.1.11>
 23. Samorodov V., Avrunin G. (2021) Solution of the problem of calculating the leakage working fluid in eccentric gap of the ball piston pair hydraulic fluid power machine. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Hydraulic machines and hydraulic units*, №1, P. 81–87. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/97af714e-2916-4755-977a-5829048f92f4/content>
 24. Shevtsov V. M., Riezva K. S. Analiz teplovoho stanu skladovykh hidravlichnykh system v skladi transmisii samokhidnykh mashyn. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Automobile and Tractor Construction : zb. nauk. pr. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. – № 1. – S. 53–60. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.1.07>
 25. M2 Bradley. https://uk.wikipedia.org/wiki/M2_Bradley.
 26. Tkachuk M. M., Zinchenko O., Grabovskiy A., Tkachuk M. A., Sierykov V., Domina N., Hrechka I. Contact interaction of bodies along congruent surfaces. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics* This link is disabled. 2024 (17), P. 32–43. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue17.4>

Надійшла (received) 11.04.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Гречка Ірина Павлівна / Hrechka Iryna – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4907-9170>; e-mail: girinar7@gmail.com

Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola M. – доктор технічних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри інформаційних технологій та систем колісних і гусеничних машин імені О.О. Морозова; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

Сериков Володимир Іванович / Sierykov Volodymyr – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: SerikovVI@tmm-sapr.org.

Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A. – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Теорія і системи

автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Грабовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andriy – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Ткачук Ганна Володимирівна / Tkachuk Hanna – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології та системи колісних і гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0435-1847>; e-mail: TkachuckAV@tmm-sapr.org.

Васильєв Антон Юрійович / Vasiliev Anton – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Льозний Олег Сергійович / Loznyi Oleg – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; e-mail: s1708@tmmsapr.org

Голенко Сергій Олександрович / Holenko Serhii – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0009-0009-3078-2473>; e-mail: serjgolenko@gmail.com