

**А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. М. ТКАЧУК, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, М. А. ТКАЧУК, В. І. СЕРИКОВ,
В. В. ТРОЦЕНКО, А. В. НАБОКОВ, В. Ю. СОЛОВЕЙ**

БАЗОВІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН ШЛЯХОМ ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ І ПАРАМЕТРІВ БРОНЕКОРПУСІВ ЗА ДИНАМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Вітчизняні легкоброньовані машини та роботизовані бойові платформи на їх основі, як свідчить досвід бойових дій проти країни-агресора, піддаються дії інтенсивних динамічних навантажень, що мають тенденцію до постійного зростання. Це змушує звертати увагу на забезпечення більш жорстких динамічних характеристик бронекорпусів цих машин як основних силових та захисних їхніх елементів. У свою чергу, це забезпечує міцність, захищеність, точність ведення вогню із власного озброєння. Задля цього розроблюються параметричні моделі та методи, а також здійснюються дослідження задля обґрунтування такої структури і параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин та роботизованих бойових платформ на їх основі, які забезпечують їх міцність, захищеність та точність ведення вогню. Із цією метою розвиваються принципово нові підходи до аналізу та синтезу спектрів власних частот і форм коливань складних механічних систем на основі удосконалення варіаційного принципу Рейля. Обґрунтовані технічні рішення реалізуються при модернізації бронекорпусів вітчизняних машин та роботизованих бойових платформ на їх основі тощо.

Ключові слова: власні частоти коливань; бронекорпус; принцип Рейля; міцність; захищеність; динамічне навантаження

**A. GRABOVSKIY, M. M. TKACHUK, A. VASYLIEV, M. A. TKACHUK, V. SIERYKOV, V. TROTSENKO,
A. NABOKOV, V. SOLOVEI**

BASIC APPROACHES TO IMPROVING THE TACTICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF OF LIGHTLY ARMORED VEHICLES BY SUBSTANTIATING THE STRUCTURE AND PARAMETERS OF ARMORED HULLS BY DYNAMIC CHARACTERISTICS

Domestic lightly armored vehicles and robotic combat platforms based on them, as the experience of combat operations against the aggressor country shows, are subjected to intense dynamic loads that tend to grow constantly. This makes it necessary to pay attention to ensuring more rigid dynamic characteristics of the armored hulls of these vehicles as their main power and protective elements. In turn, this ensures the durability, protection, and accuracy of fire from their own weapons. To this end, parametric models and methods are being developed, and research is being conducted to substantiate the structure and parameters of the armor hulls of lightly armored vehicles and robotic combat platforms based on them, which ensure their strength, protection, and accuracy of fire. To this end, fundamentally new approaches to the analysis and synthesis of eigenfrequency spectra and waveforms of complex mechanical systems are being developed based on the improvement of the Rayleigh's variational principle. The substantiated technical solutions are implemented in the modernization of armored hulls of domestic vehicles and robotic combat platforms based on them, etc. Such knowledge and methods have, on the one hand, a fundamental nature, and, on the other hand, direct application in the field of armaments and military equipment. In addition, such knowledge is applicable to the development of new machines, equipment and devices for the energy industry, transport, technological equipment, etc. At the same time, new non-traditional materials, strengthening technologies and composite structures are naturally taken into account, used and substantiated. Accordingly, these knowledge, methods, and technologies are the basis for substantiating progressive scientific and technical solutions.

Keywords: natural vibration frequencies; armored hull; Rayleigh's principle; strength; security; dynamic load

Вступ. Важливим напрямком досліджень у бронетанкобудуванні є обґрунтування проєктних рішень бронекорпусів легкоброньованих машин (ЛБМ) та роботизованих бойових платформ на їх основі, які забезпечують їх міцність, захищеність та точність ведення вогню із власних бойових модулів. Один із проблемних аспектів при цьому – стійкість цих бронекорпусів до дії динамічних навантажень. Як свідчить досвід бойових дій за участю вітчизняних ЛБМ, навантаження на них мають тенденцію до зростання амплітуд і діапазону частот. При цьому слід відлаштовуватися як від частот, так і від форм коливань. Ця сторона проблеми визначає розроблення принципово нових методів та застосування їх до прикладних досліджень. Ще однією із сторін проблеми є інтеграція результатів досліджень у реальний процес проєктування та модернізації вітчизняних легкоброньованих машин.

Аналіз існуючих моделей та методів дослідження та забезпечення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин. Провідні вітчизняні наукові школи в галузі озброєння та військової техніки (ОВТ) суттєво просунулися у напрямку розвитку системного підходу до забезпечення Збройних сил України сучасними їх зразками із високими тактико-технічними характеристиками (ТТХ) [1–10].

Зокрема, мова йде про ЦНДІ озброєння і військової техніки Збройних сил України, Національний університет оборони, Національну академію сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного тощо. У роботах багатьох вчених [1–4] цих закладів увага приділена обґрунтуванню, з одного боку, вимог до ТТХ бойових машин, а з іншого – варіантам забезпечення таких характеристик. У цих напрямках здійснені значні просування у напрямках підвищення захищеності від дії чинників ураження, стійкості, рухливості тощо [1–4].

Разом із тим слід зазначити, що прагнення поліпшити певні компоненти ТТХ, як правило, вступає у протиріччя із можливістю зберегти чи поліпшити інші компоненти. Відповідно, потребують розвитку розробки та дослідження, які дають можливість розглядати ту чи іншу бойову машину у цілому комплексі проєктних рішень, режимів бойового застосування та характеристик діючих чинників ураження. Відповідно, у створюваних моделях, зокрема, найбільш відповідальних та навантажених елементів, слід

© А. В. Грабовський, М. М. Ткачук, А. Ю. Васильєв,
М. А. Ткачук, В. І. Сериков, В. В. Троценко,
А. В. Набоков, В. Ю. Соловей, 2024

інтегрувати процеси і стани, що у них реалізуються. Також варто розробити механізм варіювання проектних рішень та зовнішніх впливів на ці елементи. Так, із точки зору сучасних вимог до бронекорпусів ЛБМ та роботизованих бойових платформ на їх основі, необхідно визначити реакцію процесів у них не тільки на зміну навантажень, але й на варіювання проектних рішень. Тобто, мова має йти і про фізичну суть процесів і станів, і про аспект проектного опису, і про технологію виготовлення, експлуатацію та бойове застосування. Якраз у цих напрямках, а також у їх об'єднанні на єдиній методологічній основі здійснені саме розробки та дослідження авторів [11–15] на розвиток підходів [1–4] досягли певного прогресу.

Що стосується саме аналізу динамічних характеристик складних конструкцій, то у цьому напрямку здійснено розвиток за двома напрямками, що розходяться.

Перший із них спрямований на аналітичні підходи, наприклад, із застосуванням варіаційного принципу Релея [5–7]. Проте область його ефективного застосування обмежена, як правило, системами із декількома ступенями вільності.

З іншого боку (другий напрямок), для аналізу динаміки складних систем добре адаптовані чисельні методи, зокрема, метод скінченних елементів та інші методи [8–10]. Проте вони не пристосовані до варіативного аналізу процесів і характеристик.

Отже, потрібен підхід, який поєднує переваги цих значаних напрямків. І у цьому напрямку автори [11–15] розробили основи такого підходу на розвиток підходів [5–10].

Таким чином, у руслі проблеми, що виникла у області механіки, машинознавства і озброєння та військової техніки, підходи авторів [11–15], напрацювання та результати досліджень переважають аналогічні досягнення інших дослідників. Це створило підґрунтя для досягнення кінцевих високоефективних результатів, у цьому випадку – бронекорпусів легкоброньованих машин та роботизованих бойових платформ із високими ТТХ.

Зокрема, для вирішення проблеми проектного забезпечення ТТХ ЛБМ та роботизованих бойових платформ шляхом обґрунтування раціональних технічних рішень бронекорпусів здійснено розроблення принципово нового підходу до аналізу чутливості спектру власних частот і форм їх коливань до варіювання проектних параметрів [11–15]. Для цього розвинено варіаційний метод Релея, поширивши його не тільки на власні частоти, але й на власні форми коливань. Крім того, введені до розгляду, окрім традиційних, ще і власні форми напружень, які відображають динамічну міцність бронепанелей бронекорпусів. Також розвинено метод узагальненого параметричного моделювання складних систем. Він дає можливість, зокрема, визначити чутливість динамічних характеристик бронекорпусів до варіювання їхньої структури і параметрів. До того ж, що важливо, цей метод забезпечує можливість цілеспрямованого

поліпшення поточних варіантів бронекорпусів за критеріями міцності та захищеності. Частково на цій базі здійснено розв'язання задач визначення варіантів посилення бронекорпусів вітчизняних машин серії МТ-ЛБ, БТР-70УМ, БТР-3. Разом із тим практика бойових дій у протидії країні-агресору свідчить про різке зростання динамічних навантажень на бронекорпуси вітчизняних бронемашин. Тому необхідні прикладні дослідження, спрямовані на підвищення ТТХ ЛБМ та роботизованих бойових платформ на їх основі за рахунок поліпшення проектних рішень бронекорпусів із огляду на сучасні вимоги та умови дії чинників ураження та режимів бойового застосування. Якраз такі дослідження передбачені до здійснення та опису у роботі. Результати таких досліджень напряму інтегруються у проектні рішення вітчизняних бронекорпусів.

Мета роботи – розроблення базових підходів до обґрунтування проектних рішень бронекорпусів легкоброньованих машин та роботизованих бойових платформ на їх основі із підвищеними тактико-технічними характеристиками за критеріями міцності, захищеності та точності ведення вогню на основі дослідження та коригування динамічних характеристик бронекорпусів і відлаштування від небезпечних резонансних режимів навантаження.

Основні завдання:

1) розвиток та узагальнення методу узагальненого параметричного моделювання у напрямку аналізу динамічних процесів при варіюванні проектних рішень бронекорпусів ЛБМ та роботизованих бойових платформ;

2) розвиток варіаційного принципу Релея та його поширення на аналіз динамічних властивостей бронекорпусів як складних механічних систем у поєднанні із методом скінченних елементів;

3) розроблення загальних підходів до дослідження реакції власних частот і форм коливань конструкцій на варіювання проектних параметрів.

Базовий підхід, методи, засоби та особливості досліджень. Підхід до проведення досліджень полягає у тому, що бронекорпус ЛБМ та роботизованої бойової платформи, на відміну від традиційних систем, розглядається як поєднання дискретної та континуальної частин. Дискретна частина моделює дію елементів систем підресорювання агрегатів та систем, розміщених усередині бронекорпуса, а також бойового модуля із малокаліберною автоматичною гарматою. Континуальна частина – це власне конструкція бронекорпусу, яка складається із бронепанелей, що з'єднані зварними швами у єдине ціле. При цьому задача аналізу полягає у визначенні реакції такої складеної системи на динамічні впливи. Задача ж синтезу формулюється як визначення таких варіантів конструкції бронекорпусу, які забезпечують міцність, захищеність при дії чинників ураження та точність ведення вогню із штатного озброєння. Таким чином, у єдиному підході об'єднуються фізичні процеси, з одного боку, проектна модель об'єкту, - з іншого, а також характеристики діючих чинників ураження та

режими бойового застосування легкоброньованих машин.

Що стосується математичної бази досліджень, то вона полягає у розвитку варіаційного принципу Релея на новий клас об'єктів – бронекорпус як дискретно-континуальну динамічну систему. Основні напрямки розвитку цього принципу полягають у новому поданні простору узагальнених координат досліджуваної динамічної системи, що переводить задачу пошуку умовних екстремумів функції Релея до визначення безумовних екстремумів модифікованої функції. Окрім того, здійснюється апроксимація не тільки спектра власних частот, але й спектра власних форм коливань досліджуваної системи в околі розв'язків, тобто екстремумів функції Релея.

На етапі чисельної реалізації мова йде про розвиток методу скінченних елементів у конкретній предметній області. При цьому підхід, який пропонується, дає можливість поєднати у єдиному засобі досліджень, з одного боку, універсальні програмні комплекси, а з іншого, – спеціалізовані модулі. Перші надають можливості широкого та глибокого функціоналу досліджень. Другі націлюють та адаптують ці можливості на новий специфічний клас об'єктів – бронекорпуси ЛБМ.

У кінцевому підсумку підхід, що створюватиметься у ході досліджень, поєднує три нових аспекти:

1) поєднання у моделі об'єкту досліджень фізичної та проєктної підмоделей, а також режимів бойового застосування та характеристик чинників ураження;

2) розвиток методу визначення спектру власних частот і форм коливань на основі нової форми подання функції Релея та переходу до пошуку безумовних, а не умовних її екстремумів;

3) розвиток та адаптація методу скінченних елементів до дослідження нового класу об'єктів – бронекорпусів ЛБМ та роботизованих бойових платформ.

За структурою дослідження передбачають:

1) теоретичні розробки стосовно розвитку, узагальнення та адаптації методу узагальненого параметричного моделювання на бронекорпуси ЛБМ та роботизованих бойових платформ;

2) удосконалення математичної моделі аналізу та коригування спектрів власних частот і форм коливань бронекорпусів ЛБМ та роботизованих бойових платформ на основі розвитку варіаційного принципу Релея;

3) створення спеціалізованого програмно-модельного комплексу як засобу чисельних досліджень динамічних характеристик бронекорпусів ЛБМ.

Здійснені розробки стануть основою для комплексу досліджень, на базі яких будуть отримані нові знання про динамічні властивості складних механічних просторових систем, зокрема, ЛБМ та роботизованих бойових платформ. Ці знання відобразатимуть також закономірності залежності зміни спектрів власних частот і форм коливань при варіюванні структури і параметрів бронекорпусів. Це

– дуже важлива інформація, оскільки для таких тонкостінних бронекорпусів власні частоти коливань набагато нижчі, ніж у важких бойових броньованих машин. При цьому частоти збурень, зокрема, від дії реактивних сил віддачі при здійсненні пострілів чергою із малокаліберних автоматичних гармат, навпаки, набагато вищі. Тобто мова йде про діапазон власних частот коливань у десятки Герц та про частоти збурення – у цьому діапазоні. У результаті на біларезонансних режимах може втрачатися міцність бронекорпусів та привноситися недопустиме збурення у канали наведення зброї. Якраз ці знання стануть базою при проєктуванні, підготовці виробництва і модернізації нових та існуючих бронекорпусів ЛБМ та роботизованих бойових платформ на їх основі. Задля отримання нових знань про новий клас динамічних систем розроблений новий удосконалений метод, який базується на модифікації варіаційного принципу Релея. Цей метод розширюється на новий клас об'єктів – дискретно-континуальні системи. Зазначені знання та метод слугують базою для обґрунтування проєктних рішень бронекорпусів ЛБМ із підвищеними ТТХ. На їх основі підвищується їхня міцність, захищеність та точність ведення вогню із високотемпового та високоімпульсного озброєння. Так, сучасні тенденції у галузі розробки нових бойових модулів із малокаліберними автоматичними гарматами призводять до застосування такого озброєння калібром 30 мм і вище, із темпом стрільби 300÷1000 пострілів на хвилину та вище, піковою силою віддачі 60 кН та вище [16–19]. Якщо у перспективних бойових модулях буде застосовано регульований темп стрільби, то необхідно здійснювати відлаштування від широкого діапазона резонансних частот. Відповідно, без масиву необхідних знань та удосконаленого методу обґрунтувати прогресивні варіанти бронекорпусів сучасних ЛБМ неможливо, оскільки достатньо важко відлаштувати окремі власні частоти та форми навіть від фіксованих частот збурення, а від широкого діапазону – практично неможливо на традиційній базі. Тобто дослідження, що стають можливими на створеній методологічній базі, є не просто позитивними, а необхідними у створенні нових та вдосконаленні існуючих бронекорпусів. Нові знання, які плануються до отримання, базуються на фундаментальних властивостях динамічних систем. Зокрема, мова йде про екстремальні властивості функції Релея. Отже, пропонується розроблення нового подання цієї функції, яке рельєфно відтіняє такі її властивості. Більш того, при цьому природним чином вдасться визначити чутливість динамічних систем до варіювання параметрів.

Якраз такі знання та методи мають, з одного боку, фундаментальний характер, а, з іншого, – пряме прикладне застосування у галузі озброєння та військової техніки. Окрім того, такі знання застосовні до розроблення нових машин, обладнання та пристроїв для енергетичної галузі, транспорту, технологічного устаткування тощо. При цьому природним чином ураховуються та застосовуються і обґрунтовуються нові нетрадиційні матеріали,

технології зміцнення та композитні структури. Відповідно, ці знання і методи та технології є основою для обґрунтування прогресивних науково-технічних рішень.

Висновки. Здійснені та описані у роботі базові підходи до підвищення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин шляхом обґрунтування структури і параметрів бронекорпусів за динамічними характеристиками дають підстави для таких висновків та узагальнень.

1. Основним досягненням здійснених розробок є створення принципово нового системного підходу до аналізу динамічних характеристик нового класу – дискретно-континуальних систем, зокрема, бронекорпусів ЛБМ та роботизованих бойових платформ на їх основі. Для цього задіяно, розвинено та адаптовано метод узагальненого параметричного моделювання, скінченних елементів та варіаційний принцип Релея. Розроблено новий метод параметризації динамічних систем, який, на відміну від традиційної форми, зводить задачу визначення власних частот і форм складних систем до проблеми пошуку не умовних, а безумовних екстремумів функції Релея. На цьому етапі прогноуються тенденції зміни спектрів власних частот і форм. Для цього, на відміну від робіт [5–8], застосовуються не аналітичні або чисельні методи, а чисельно-аналітичні. Тобто, на основі модифікації варіаційного принципу Релея визначаються закони зміни власних частот і форм коливань у вигляді апроксимаційних аналітичних залежностей. А на наступному етапі чисельними методами визначаються коефіцієнти цих апроксимаційних залежностей.

2. Що стосується прямого застосування чисельних методів, і у першу чергу – метод скінченних елементів [9, 10], то принциповим аспектом наведених положень є те, що при їх застосуванні, на відміну від традиційних чисельних методів, визначаються тільки обмежена кількість коефіцієнтів чутливості, а сама структура шуканих закономірностей – наперед прогнозована та відома. Це різко скорочує обсяг необхідних обчислень за збереження їхньої точності.

3. З іншого боку, на протигагу аналітичним підходам [5–8], відсутні обмеження стосовно складності досліджуваного об'єкту як із точки зору складу і структури, так і просторового розподілу інерційно-жорсткісних характеристик. Яскравим прикладом є якраз клас таких конструкцій як бронекорпуси легкоброньованих машин.

4. Якщо звернути увагу на дослідження елементів озброєння та військової техніки [1–4], то наведені положення привносять у ці дослідження науково обґрунтовану системність. Тобто, на відміну від існуючих підходів, у цій предметній області формується структура наукової бази знань про той чи інший об'єкт чи клас об'єктів, наприклад, бронекорпуси ЛБМ. Це створює переваги із точки зору формування бази знань створюваних віртуальних комп'ютерних моделей їхніх елементів, яка є основою для обґрунтування прогресивних рішень за різко знижені терміни та вартість.

5. Що стосується практичного аспекту, то, як свідчить досвід бойових дій проти країни-агресора, одну із найважливіших ролей у ході ведення бойових дій відіграють легкоброньовані машини. Разом із тим до цих машин ставляться усе зростаючі вимоги. Зокрема, зростають характеристики чинників ураження, підвищуються режими бойового застосування (калібр озброєння, темпи стрільби, могутність боєприпасів тощо). Відповідно, від бронекорпусів, які є основним силовим та захисним елементом легкоброньованих машин, вимагається висока динамічна міцність та жорсткість. Проте сучасні бронекорпуси не можуть просто масштабуватися у розмірах і товщинах бронепанелей у силу того, що їх власні частоти і форми коливань попадають у небезпечний режим збудження. Це може призводити до втрати міцності, захищеності та точності ведення вогню. Відтак, потрібне не довільне, а науково обґрунтоване посилення бронепанелей та внутрішньої силової структури, диференційоване за окремими елементами.

Зокрема, за рахунок упровадження результатів розроблюватимуться рекомендації стосовно зміцнення перспективних бронекорпусів із нових матеріалів на основі здійснених розробок та досліджень, які забезпечують рівень напружень у них, суттєво нижчий, ніж у попередників. Окрім того, це створює можливості зниження збурення у каналах наведення і стабілізації озброєння бойових модулів легкоброньованих машин за рахунок зменшення збудливості пружних коливань бронекорпуса. Також може підвищитися темп стрільби із малокаліберних автоматичних гармат без зниження точності ведення вогню.

Список літератури

1. Чепков І. Б., Олійник І. І., Коробченко С. О. Процесний підхід в управлінні повним життєвим циклом озброєння та військової техніки на засадах програмно-проектного менеджменту. *Озброєння та військова техніка*. 2021. № 4. С. 3–11.
2. Чепков І. Б., Зубарев В. В., Тютюнюк В. П. Новітня стратегія національної безпеки України введена в дію: на черзі оновлення воєнної та військово-технічної політики. *Озброєння та військова техніка*. 2020. № 3. С. 3–12.
3. Davydovskiy L., Bisyk S., Hutov I., Lilov I., Kuprinenko A., Yalnytskyi O. (2020). Optimization of the parameters of the energy absorbing element of the armored combat vehicle's seat in the conditions of explosive loading. *TRANS & MOTAUTO WORLD*, vol.5(2), pp. 45–47.
4. Slyvinsky O.A., Bisyk S.P., Tonkushina K.D. (2019). Analysis of phase transformations in heat-affected welding zone of alloyed high-strength steels. *Технологические системы*, no. № 1, pp. 50–59.
5. Zhaolong Yu., Jørgen Amdahl. (2023). A Rayleigh-Ritz solution for high order natural frequencies and eigenmodes of monopile supported offshore wind turbines considering tapered towers and soil pile interactions. *Marine Structures*, vol. 92, pp. 103482. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103482>.
6. Yusuke Mochida, Sinniah Ilanko (2021). On the Rayleigh-Ritz Method, Gorman's Superposition Method and the exact Dynamic Stiffness Method for vibration and stability analysis of continuous systems. *Thin-Walled Structures*, vol. 161, pp. 107470. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107470>.
7. Ali Ebrahimi-Mamaghani, Hoda Sarparast, Masoud Rezaei (2020). On the vibrations of axially graded Rayleigh beams under a moving load. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 84, pp. 554–570. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.04.002.1>.
8. Ming Cong, Yun-bo Zhou, Ming Zhang, Xiao-wang Sun, Cheng Chen, Cheng Ji. (2021). Design and optimization of multi-V

- hulls of light armoured vehicles under blast loads. *Thin-Walled Structures*, vol. 168, pp. 108311. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108311>.
9. Chupryna V. M., Dmytriiev V. A., Chupryna V. M. (2022). Modeling the strength of the rear suspension of the specialized armored vehicle “Novator”. *Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ*, no. 1(11), pp. 4–12
 10. Felipe Barbosa dos Santos, Marcos dos Santos. (2022). Choice of armored vehicles on wheels for the Brazilian Marine Corps using PrOPPAGA. *Procedia Computer Science*, vol. 199, pp. 301–308
 11. Atroshenko O., Tkachuk M., Martynenko O., Tkachuk M., Saverska M., Hrechka I., Khovansky S. (2019). The Study of Multicomponent Loading Effect on Thin-Walled Structures With Bolted Connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7(97), pp. 15–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154378. <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/154378>
 12. Bondarenko M., Tkachuk M., Grabovskiy A., Hrechka I. Substantiation of thin-walled structures parameters using nonlinear models and method of response surface analysis. *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 44, pp. 32–43, 2019. <https://www.scientific.net/JERA>
 13. Грабовський А. В., Ткачук М. А., Шуть О. Ю., Ліпейко А. І., Цендра Г. В., Шевченко А. В., Лозний О. С., Мосницька Д. В., Чала Ю. С. Аналіз тенденцій впливу параметрів корпусів транспортних засобів спеціального призначення на власні частоти і форми коливань. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, серія: *Машинознавство та САПР*. 2020. № 1. С. 19–27. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/47041>
 14. Грабовський А. В., Ткачук М. А., Шуть О. Ю., Ліпейко А. І., Цендра Г. В., Шевченко А. В., Лозний О. С., Мосницька Д. В., Чала Ю. С. Аналіз тенденцій впливу параметрів корпусів транспортних засобів спеціального призначення на власні частоти і форми коливань. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2020. № 1. С. 19–27. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/47041>
 15. Мормило Я., Жадан В. О., Данильченко В., Ткачук М. М., Грабовський А. В., Троценко В. В., Набоков А. В., Рікунов О. М., Ткачук М. А., Васильєв А., Деревянкін Р., Коба А. Моделі динаміки та напружено-деформованого стану елементів перехідної силової конструкції підбаштового листа легкоброньованих машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2023. № 1. С. 44–52. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/274948>
 16. <https://uk.wikipedia.org/wiki/2%D0%9072>
 17. <https://www.ukrmilitary.com/2015/09/ztm1.html>
 18. <https://www.ukrmilitary.com/2015/09/ztm2.html>
 19. https://ru.wikipedia.org/wiki/30-%D0%BC%D0%BC_%D0%BF%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B0_2%D0%9042
- References (transliterated)**
1. Chepov I. B., Oliinyk I. I., Korobchenko S. O. (2021). Protseyni pidkhid v upravlinni povnym zhyttievym tsykлом ozbroiennia ta viiskovoї tekhniki na zasadakh prohramno-proiektnoho menezhmentu. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, no. 4, pp. 3–11.
 2. Chepov I. B., Zubariev V. V., Tiutiunyyk V. P. (2020). Novitnia stratehiia natsionalnoi bezpeky Ukrainy vvedena v diiu: na cherzi onovlennia voiennoi ta viiskovo-tekhnichnoi polityky. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, no. 3, pp. 3–12.
 3. Davydovskiy L., Bisyk S., Hutov I., Lilov I., Kuprinenko A., Yalnytyskiy O. (2020). Optimization of the parameters of the energy absorbing element of the armored combat vehicle's seat in the conditions of explosive loading. *TRANS & MOTAUTO WORLD*, vol.5(2), pp. 45–47.
 4. Slyvinskyu O.A., Bisyk S.P., Tonkushina K.D. (2019). Analysis of phase transformations in heat-affected welding zone of alloyed high-strength steels. *Технологические системы*, no. 1, pp. 50–59.
 5. Zhaolong Yu., Jørgen Amdahl. (2023). A Rayleigh-Ritz solution for high order natural frequencies and eigenmodes of monopile supported offshore wind turbines considering tapered towers and soil pile interactions. *Marine Structures*, vol. 92, pp. 103482. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103482>.
 6. Yusuke Mochida, Sinniah Ilanko (2021). On the Rayleigh-Ritz Method, Gorman's Superposition Method and the exact Dynamic Stiffness Method for vibration and stability analysis of continuous systems. *Thin-Walled Structures*, vol. 161, pp. 107470. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107470>.
 7. Ali Ebrahimi-Mamaghani, Hoda Sarparast, Masoud Rezaei (2020). On the vibrations of axially graded Rayleigh beams under a moving load. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 84, pp. 554–570. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.04.002.1>.
 8. Ming Cong, Yun-bo Zhou, Ming Zhang, Xiao-wang Sun, Cheng Chen, Cheng Ji. (2021). Design and optimization of multi-V hulls of light armoured vehicles under blast loads. *Thin-Walled Structures*, vol. 168, pp. 108311. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108311>.
 9. Chupryna V. M., Dmytriiev V. A., Chupryna V. M. (2022). Modeling the strength of the rear suspension of the specialized armored vehicle “Novator”. *Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОБТ*, no. 1(11), С 4–12
 10. Felipe Barbosa dos Santos, Marcos dos Santos. (2022). Choice of armored vehicles on wheels for the Brazilian Marine Corps using PrOPPAGA. *Procedia Computer Science*, vol. 199, pp. 301–308
 11. Atroshenko O., Tkachuk M., Martynenko O., Tkachuk M., Saverska M., Hrechka I., Khovansky S. (2019). The Study of Multicomponent Loading Effect on Thin-Walled Structures With Bolted Connections. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (97), pp. 15–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154378. <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/154378>
 12. Bondarenko M., Tkachuk M., Grabovskiy A., Hrechka I. Substantiation of thin-walled structures parameters using nonlinear models and method of response surface analysis. *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 44, pp. 32–43, 2019. <https://www.scientific.net/JERA>
 13. Hrabovskiy A. V., Tkachuk M. A., Shut O. Yu., Lipeiko A. I., Tsendra H. V., Shevchenko A. V., Lozny O. S., Mosnitska D. V., Chala Yu. S. (2020). Analiz tendentsii vplyvu u parametriv korpusiv transportnykh zasobiv spetsialnoho pryznachennia na vlasni chastoty i formy kolyvan. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: *Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 19–27. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/47041>
 14. Hrabovskiy A. V., Tkachuk M. A., Shut O. Yu., Lipeiko A. I., Tsendra H. V., Shevchenko A. V., Lozny O. S., Mosnitska D. V., Chala Yu. S. (2020). Analiz tendentsii vplyvu parametriv korpusiv transportnykh zasobiv spetsialnoho pryznachennia na vlasni chastoty i formy kolyvan. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: *Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 19–27. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/47041>
 15. Mormylo Ya., Zhadan V. O., Danylchenko V., Tkachuk M. M., Hrabovskiy A. V., Trotsenko V. V., Nabokov A. V., Rikunov O. M., Tkachuk M. A., Vasylyev A., Dereviiankin R., Koba A. (2023). Modeli dynamiky ta napruzhenno-deformovanoho stanu elementiv perekhidnoi sylovoi konstruktsii pidbашtovooho lysta lehkobronovanykh mashyn. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: *Mashynoznavstvo ta SAPR*, no. 1, pp. 44–52. <http://misapr.khpi.edu.ua/article/view/274948>
 16. <https://uk.wikipedia.org/wiki/2%D0%9072>
 17. <https://www.ukrmilitary.com/2015/09/ztm1.html>
 18. <https://www.ukrmilitary.com/2015/09/ztm2.html>
 19. https://ru.wikipedia.org/wiki/30-%D0%BC%D0%BC_%D0%BF%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B0_2%D0%9042

Надійшла (received).30.01.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Грабовський Андрій Володимирович / Grabovskiy Andrey – 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>; тел.: (057)7076166, e-mail: andrej8383@gmail.com

Ткачук Микола Миколайович / Tkachuk Mykola M. – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4753-4267>, тел.: (057)7076902, e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org.

Васильєв Антон Юрійович / Vasyliev 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: Obra.in.urchin@gmail.com

Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A. – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@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 теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: SerikovVI@tmm-sapr.org

Троценко Володимир Володимирович / Trotsenko Volodymyr – підполковник, Військовий інститут танкових військ при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», ст. викладач кафедри «Експлуатація, озброєння та військова техніка», м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org

Набоков Анатолій Володимирович / Nabokov Anatoliy – аспірант, «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна, e-mail: avnabokov@gmail.com

Соловей Вадім Юрійович / Solovei Vadim – Начальник служби безпілотних систем Східного ОТО, м. Харків, Україна; e-mail: tma@tmm-sapr.org