

**В. В. ТРОЦЕНКО, А. В. НАБОКОВ, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, М. А. ТКАЧУК, І. Я. ХРАМЦОВА,
О. М. РІКУНОВ, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, А. М. КОБА**

ДИНАМІКА БОЙОВИХ МОДУЛІВ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН: МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ТА УСТАЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ

У роботі описано загальний підхід до моделювання динамічних процесів при дії імпульсних реактивних сил віддачі при здійсненні пострілів із озброєння бойових модулів. На основі розробленого підходу до аналізу динамічної реакції бойового модуля легкоброньованої машини, оснащеної малокаліберною автоматичною гарматою, на дію реактивних сил віддачі пропонується на першому етапі здійснювати якісний аналіз на спрощених моделях. Аналізується вплив одиночного пострілу та стрільби чергою на відхилення осі каналу ствола від напрямку на ціль. Для цього побудована тестова спрощена модель. Надалі на отриманих спрощених моделях результати співставляються із результатами аналізу на більш складних моделях. Введена кусочно-лінійна апроксимаційна залежність часового розподілу реактивної сили віддачі дає можливість запараметризувати такий розподіл сили одним параметром. Як свідчать результати досліджень, на характер відгуку досліджуваної динамічної системи чинить сильний вплив рівень демпфірування. Якщо рівень демпфірування високий, а частота дії імпульсів не кратна власній частоті коливань, то вплив окремих імпульсів можна розглядати ізольовано один від одного. Визначені характерні особливості перехідних та усталених режимів руху бойових модулів легкоброньованих машин. Ці якісні особливості визначають характер відгуку динамічної системи на дію одиночного імпульсу та на дію серії таких імпульсів. Такі ж особливості притаманні також і системам із великою кількістю ступенів вільності, а також системам із розподіленими параметрами.

Ключові слова: динамічна система, бойовий модуль, легкоброньована машина, перехідний процес, усталений процес, інтегрування системи диференціальних рівнянь, реактивні сили віддачі при здійсненні пострілів

**V. TROTSENKO, A. NABOKOV, A. GRABOVSKY, M. A. TKACHUK, I. KHRAMTSOVA,
O. RIKUNOV, A. VASYLIEV, A. KOBA**

DYNAMICS OF COMBAT MODULES OF LIGHTLY ARMORED VEHICLES: SIMULATION OF TRANSIENT AND STEADY PROCESSES

The work describes a general approach to dynamic processes modeling under action of pulsed reactive forces of recoil during firing shots from combat modules weapons. The combat module can be presented as a discrete system; this approach also applies to elements of drive, engine, transmission, etc. They are characterized by a local compact concentration of mass and high rigidity of the structure itself compared to the same armored hull or special elastic elements of suspension system. Then the reaction of this complex mechanical system to the action of dynamic forces is of interest. On the basis of the developed approach to analysis of the dynamic response of the combat module of a lightly armored vehicle equipped with a small-caliber automatic gun to the action of reactive recoil forces, it is proposed to carry out a qualitative analysis on simplified models at the first stage. The influence of a single shot and burst firing on the deviation of the axis of the barrel from the direction to the target is analyzed. For this, a simplified test model was built. Further, on the obtained simplified models, the results are compared with the results of the analysis on more complex models. The introduced piecewise linear approximation dependence of the time distribution of the reactive recoil force makes it possible to parametrize such force distribution with one parameter. As evidenced by the research results, the nature of the response of the studied dynamic system is strongly influenced by the damping level. If the damping level is high, and the frequency of the pulses is not a multiple of the natural oscillations frequency then the influence of individual pulses can be considered in isolation from each other. The characteristic features of the transient and stable modes of movement of lightly armored vehicles combat modules are determined. These qualitative features determine the nature of the response of the dynamic system to the action of a single pulse and to the action of a series of such pulses. The same features are also characteristic of systems with a large number of degrees of freedom, as well as systems with distributed parameters.

Keywords: dynamic system, combat module, lightly armored vehicle, transition process, steady process, integration of differential equations system, reactive recoil forces during firing shots

Вступ. Як свідчить практика бойових дій на сході та півдні України, широке розповсюдження у бойових діях мають, окрім танків, також легкоброньовані машини (ЛБМ). Такі ЛБМ останнім часом оснащуються, як правило, бойовими модулями (БМ), які споряджені малокаліберними автоматичними гарматами (МАГ).

Такі МАГ мають високий темпи стрільби (300 пострілів на хвилину). Зважаючи на значний рівень реактивних сил віддачі при здійсненні стрільби, маємо із точки зору забезпечення точності стрільби із бойового модуля динамічну систему, яка піддається дії одиночного пострілу чи серії пострілів. Відповідно, необхідно здійснювати дослідження впливу таких імпульсних та поліімпульсних сил на поведінку досліджуваної динамічної системи. Це складає напрямок досліджень, описаних у статті.

Аналіз методів дослідження реакції динамічних систем на дію зовнішніх сил. Якщо звернутися до розгляду ЛБМ із БМ як механічної системи, то слід зазначити, що такі системи мають у своєму складі континуальну та дискретну складові. Континуальна частина представлена бронекорпусом, що має розподілені інерційно-жорсткісні властивості.

Як дискретну систему можна подати бойовий модуль, елементи рушія, двигун, трансмісію тощо. Для них характерним є локальне компактне зосередження маси та висока жорсткість самої конструкції порівняно із тим же бронекорпусом чи спеціальними пружними елементами системи підресорювання. Тоді становить інтерес реакція цієї складеної механічної системи на дію динамічних сил. Цим питанням присвячені, зокрема, роботи [1–6]. Проте у силу складності самої системи та характеру динамічного впливу системного вивчення її властивостей на тепер у завершеному вигляді немає.

Так, у [4] наголошується, що проведення антитерористичної операції визначило протиріччя між існуючим та необхідним рівнем захищеності бойових броньованих машини (ББМ). Проведені експер-

© В. В. Троценко, А. В. Набоков, А. В. Грабовський,
М. А. Ткачук, І. Я. Храмцова, О. М. Рікунов,
А. Ю. Васильєв, А. М. Коба, 2022

тні опитування показують, що головними загрозами для ББМ є можливість підриву їх на мінно-вибухових пристроях та ураження гранатами РПГ. Як наслідок з визначених експертами вимог до ББМ на перспективу до 2023 р., першим і критичним є формування та виконання вимог зі стійкості до уражаючих факторів підриву.

Разом із тим існує велика кількість методів досліджень складних динамічних систем. Так, у сучасних публікаціях часто зустрічаються роботи, які використовують метод скінченних елементів (МСЕ), який реалізований у певному комерційному програмному продукті [7–16].

Зокрема, у [7] наведено результати аналізу та систематизацію основних причин, що призводять до виникнення дефектів у зварних корпусах бойових броньованих машин легкої категорії за масою та визначення основних напрямів їм запобігання. Показано, що проблема підвищення якості та забезпечення відповідного рівня балістичної та протимінної стійкості зварних броньованих корпусів має комплексний характер, пов'язана зі зварністю застосовуваних на виробництві сталей, організацією та оснащенням зварювального виробництва та конструктивними особливостями корпусів ряду вітчизняних броньованих машин. Аналіз цих факторів надав змогу сформулювати напрями подолання проблеми, що (крім наукового розв'язання) в основному потребують управлінських і організаційних рішень.

Особливості створення та модернізації бойових колісних машин, враховуючи сучасні умови їх застосування, розглянуто у [9]. Проведено аналіз технічних характеристик існуючих зразків бойових колісних машин та на його основі визначено основні тенденції їх розвитку. Визначено, що підвищення можливостей ББМ, як правило, здійснюється за рахунок підвищення рухомості, вогневої потужності та бронезахисту. Це передбачає реалізацію принципу модульності при створенні корпусів, використанні нових матеріалів для забезпечення захищеності, різноманітності застосування бойових модулів.

У статті [11] визначено основні вимоги, які впливають на розвиток конструкцій зразків військової автомобільної техніки (ВАТ). Зокрема встановлено, що на підвищення швидкостей руху та мобільності колісної ВАТ при русі бездоріжжям загалом впливають як збільшення питомих потужностей двигунів, вибір оптимальних параметрів трансмісії, так і конструкції підвісок. Вібраційні та коливні навантаження на водія (екіпаж) зразків ВАТ під час руху бездоріжжям формують два визначальні аспекти застосування автомобілів. Перший аспект пов'язаний зі штучним обмеженням водієм максимальної швидкості руху нижче технічної максимальної через граничну межу його дискомфорту, а другий – через відповідну втому і суттєве погіршення моторики водія (екіпажу) залежно від тривалості руху бездоріжжям. Визначено тенденцію розвитку конструкцій підвісок, яка полягає у переході від залежних підвісок з нерозрізною балкою осі і жорстким взаємозв'язком кінематики підвісок правого і лівого коліс до незалежних. Такий підхід дозволяє забезпечити підвищення комфортності в русі водія і

екіпажу, а також підвищити середні швидкості руху та суттєво зменшити поперечні крени кузова. Проведено аналіз тенденцій впровадження активних і напівактивних підвісок на сучасних зразках колісної ВАТ, що дозволяє суттєво покращити комфортність екіпажу, збереженість вантажу та середні швидкості руху. За результатами досліджень встановлено необхідність переходу на довгоходові незалежні підвіски для зменшення невіднесених мас та вібронанвантаженості кузова і екіпажу.

Результати моделювання впливу вибуху на металеву конструкцію з використанням різних розрахункових методів: `LOAD_BLAST`; `LOAD_BLAST_ENHANCED`; `Arbitrary Lagrangian Eulerian`; `Particle Blast Method`; `Smooth Particle Hydrodynamics`, які реалізовані у програмі `LSDYNA`, наведені у [12]. Оцінено адекватність та точність цих методів залежно від коефіцієнта відстані до вибухової речовини. Представлені переваги та недоліки кожного методу та рекомендації щодо їх використання за результатами цього моделювання та досвіду авторів роботи.

Результати числового моделювання процесу пробиття захисних керамічних елементів з різною конструкцією наведено у [13]. Розроблено конструкції двох типів, що були виготовлені й пройшли натурні балістичні випробування 12,7-мм кулями Б-32: блок з керамічними циліндричними елементами типу «сфера – сфера» на полімерній зв'язці та мозаїчний блок, який складається з плоских керамічних елементів. Балістичні випробування підтвердили ефективність розроблених захисних керамічних елементів для захисту бойових броньованих машин від 12,7-мм куль Б-32.

У [14] наведені результати кластерного аналізу протитанкових мін Російської Федерації за обраними класифікаційними ознаками та масою вибухової речовини. Отримані групи кластерів протитанкових мін можна використовувати при формуванні вимог до рівня протимінного захисту вітчизняних бойових броньованих машин. Приведені результати порівняння моделювання процесу пробиття ударниками з різною формою головної частини гомогенної перешкоди з використанням двовимірного лагранжевого підходу (2D) та методу `Smooth Particle Hydrodynamics` (3D). Отримані результати показують можливість застосування обох підходів для моделювання пробиття ударниками гомогенних перешкод з урахуванням типу пробиття. За даними досліджень застосування методу `Smooth Particle Hydrodynamics` є більш прийнятним при дослідженні пробиття через значно меншу похибку відносно натурального експерименту та більш достовірний опис характеру різних типів пробиття.

У роботі [16] наведені результати оцінки напрямів підвищення характеристик бронетранспортера за даними опитування з використанням методу парного порівняння. Всього опитано 88 експертів. Для парного порівняння визначено дванадцять питань, що характеризують основні показники бронетранспортера: захищеність, рухомість, вогневу потужність. Крім того, експертам пропонувались питання, що стосуються загальних характеристик БТР. Отримані значення вагових коефіцієнтів показників бронетранспортера свідчать, що найбільш ва-

жливими для експертів є характеристики озброєння, захищеності (протимінний захист, захист від гранат ручних протитанкових гранатометів, захист від куль Б-32 калібру 12,7 мм) та прохідності. Отримані значення вагомості показників бронетранспортера за даними опитування з використанням методу попарного порівняння є основою для оцінки пріоритетів розвитку вітчизняних бронетранспортерів та інших машин подібного класу.

Крім того, привертають увагу також інші аспекти тактико-технічних характеристик (ТТХ) ЛБМ [17–21]. При цьому застосовуються різні моделі та методи досліджень.

Так, у роботі [19] проведено узагальнення результатів аналізу конструкцій, технології виготовлення та умов виробництва військових гусеничних та колісних машин легкої категорії за масою, а також діючих уражаючих факторів в умовах бойового застосування та методів досліджень, що свідчить про суперечності між потребами бронетанкобудування у методах проєктно-технологічного забезпечення ТТХ об'єктів бронетанкової техніки та можливостями науки. На основі розвитку методу узагальненого параметричного моделювання та поширення його на проєктно-технологічні рішення запропоновано новий підхід до забезпечення заданих ТТХ легкоброньованих машин за рахунок взаємодії та взаємовпливу конструктивних рішень, технологічних режимів та умов виробництва. При цьому вперше множина технологічних факторів залучена як така, що визначає значною мірою рівень ТТХ і як варіювана, шукана.

Незважаючи на широкий спектр існуючих методів, необхідно здійснити поетапний аналіз поведінки системи «БМ – бронекорпус ЛБМ – система підресорювання» при дії реактивних сил віддачі при здійсненні пострілів із МАГ.

Мета роботи – аналіз поведінки на прикладі простої модельної динамічної системи на дію одиночного або серії імпульсів задля визначення характеру відгуку бойового модуля на здійснення пострілів із малокаліберної автоматичної гармати.

Загальна постановка задачі. Задля вирішення сформульованої загальної проблеми моделювання поведінки бойового модуля легкоброньованої машини на дію імпульсних реактивних сил віддачі при здійсненні пострілів із МАГ в силу складності її доцільно розбити на декілька елементів. Тобто із усієї складної дискретно-континуальної системи вичленується на першому етапі більш проста система, яка у певному сенсі відтворює основні її властивості. Це дає змогу більш яскраво відтворити якісні особливості реакції такої системи при дії імпульсних сил. У цьому аспекті БМ разом із МАГ подається у вигляді спрощеної модельної системи зі сталі (рис. 1).

У свою чергу, до аналізу реакції такої системи на дію імпульсних сил віддачі теж доцільно застосовувати багатоетапний підхід.

По-перше, мова йде про реакцію динамічної системи на дію серії імпульсів протягом тривалого періоду.

По-друге, тут можна вичленити питання ударного резонансу або визначення усталеного процесу після

певної кількості пострілів.

По-третє, слід зазначити, що має значення для збереження точності стрільби поведінка системи не тільки протягом тривалого терміну $\theta \gg T$, а у й межах часового інтервалу, співставного із тривалістю дії імпульсу τ (див. рис. 2).

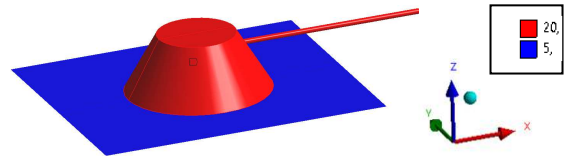


Рисунок 1 – Спрощена модель системи бойового модуля із малокаліберною автоматичною гарматою: маса БМ – 400 кг, товщини елементів (мм) позначено кольором

При цьому характер часового розподілу реактивної сили віддачі $F(t)$ зберігається тим же, що і в дійсності. Тобто $F(t)$ є послідовністю імпульсів із періодом T .

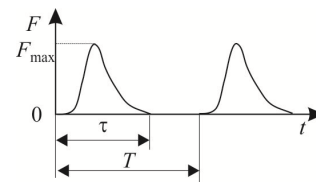


Рисунок 2 – Характер часового розподілу $F(t)$:

$$F_{\max} = 1,0 \text{ кН}$$

Дійсно, на точність здійснення пострілу із МАГ впливає, серед інших чинників, кутове розузгодження напрямку осі каналу ствола та напрямку на ціль. Крім того, важливою є кутова швидкість ствола у його русі із номінального напрямку у поточний момент вильоту снаряда. Тобто варто знати характер реакції БМ на дію сили $F(t)$ від моменту початку пострілу до його завершення.

Задача, що формується, принципово відрізняється від аналізу реакції динамічної системи на «великому» інтервалі $\theta \gg T$. У останньому випадку характер розподілу $F(t)$ не має вирішального значення для аналізу «розгойдування». Більше значення має імпульс сили $I = \int F(t)dt$. Саме він у цьому випадку формує динаміку системи протягом тривалої кількості імпульсів.

Якщо ж повернутися до поставленої у роботі задачі, то важливим є саме розподіл $F(t)$ у часі протягом здійснення пострілу. Часовий розподіл $F(t)$ визначається із розв'язання задачі внутрішньої балістики. Він залежить від типу боєзапасу та властивостей пороху у його заряді.

Таким чином, у загальному вигляді рівняння руху системи, наведеної на рис. 1, можна подати у вигляді

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f, \quad (1)$$

де M , C , K – матриці мас, демпфірування та жорсткості,

x – вектор узагальнених координат, що визначають поточний стан системи,

f – вектор навантажень, що моделює дію імпульс-

сних сил $F(t)$ у проекції на узагальнені координати x (див. рис. 2).

Рівняння (1) може бути побудоване із рівнянь Лагранжа або автоматично формується у ході побудови скінченно-елементної моделі досліджуваної системи. У роботі застосований останній варіант.

Чисельний аналіз реакції динамічної системи на дію імпульсних сил. Модельна задача аналізу реакції динамічної системи на дію імпульсних сил здійснена на прикладі системи, зображеної на рис. 3. Застосовано метод скінченних елементів.

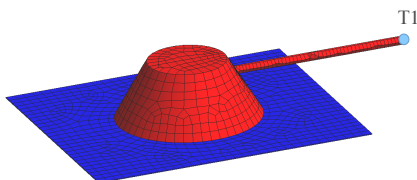


Рисунок 3 – Скінченно-елементна модель спрощеної досліджуваної системи

Для опису часового розподілу $F(t)$ застосовано низку апроксимацій, наведених на рис. 4. Тут τ_1 , τ_2 , τ – характерні моменти часу.

Основна умова, яка має виконуватися, полягає у збереженні рівності імпульсу апроксимаційної сили та сили дійсної:

$$F_{\max} \left[\tau_2 - \tau_1 + \frac{1}{2}(\tau - \tau_2 + \tau_1) \right] = \int_0^{\tau} F(t) dt. \quad (2)$$

З іншого боку, із умов внутрішньої балістики маємо

$$\int_0^{\tau} F(t) dt = m \cdot \vartheta, \quad (3)$$

де m – маса снаряда,

ϑ – швидкість вильоту снаряда у кінці пострілу.

Тоді

$$\frac{1}{2} F_{\max} (\tau + \tau_2 - \tau_1) = m \cdot \vartheta. \quad (4)$$

При такій апроксимації F_{\max} є визначеним (чи то експериментально, чи то чисельно, чи то аналітично), τ визначається тривалістю горіння порохового заряду. Отже, тривалість $(\tau_2 - \tau_1)$ однозначно визначається із (4) і є const. Тоді із двох параметрів τ_1 та τ_2 незалежним залишається один, наприклад, τ_1 . Зазвичай дійсний розподіл $F(t)$ має більш круту гілку зростання та більш полого спадну гілку. Отже, задавши безрозмірний параметр

$$\alpha = \tau_1 / \tau, \quad (5)$$

можна обмежити діапазон його варіювання: $\alpha \leq 0,5$.

Таким чином, увівши до розгляду безрозмірний час

$$\gamma = t / \tau, \quad (6)$$

можна визначити шляхом інтегрування системи (1) залежності

$$\varphi = \varphi(\alpha, \gamma), \quad \psi = \psi(\alpha, \gamma), \quad (7)$$

де φ – кутове відхилення осі каналу ствола від початкового,

ψ – кутова швидкість відхилення осі у каналі ствола від початкового напрямку.

Зокрема, як модельні параметри обрано: $m = 400$ кг, $\vartheta = 10^3$ м/с, $\tau = 10^{-2}$ с, $F_{\max} = 1 \cdot 10^3$ Н.

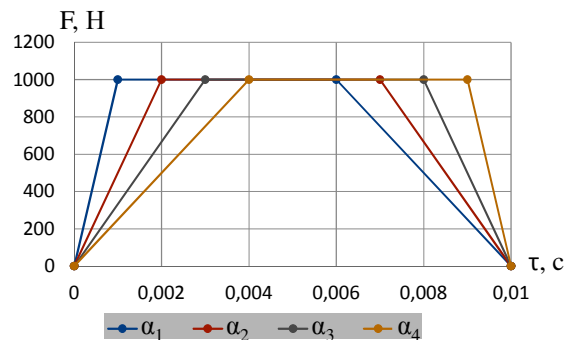
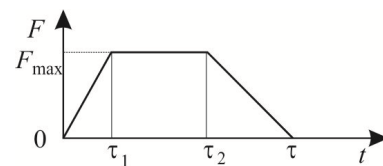


Рисунок 4 – Апроксимації часового розподілу реактивної сили віддачі $F(t)$:

$$\alpha_1 = 0,1; \quad \alpha_2 = 0,2; \quad \alpha_3 = 0,3; \quad \alpha_4 = 0,4$$

Як контрольовані параметри обрано

$$\varphi = \varphi(\alpha^0), \quad \psi = \psi(\alpha^0 / \tau), \quad (8)$$

де α^0 визначається із розв'язку «статичної» задачі

$$K \cdot X^0 = f^0, \quad (9)$$

де $f^0 = f(t_0)$, $t_0 : F(t) = \max$

Отже, можна побудувати залежності

$$\varphi = \varphi(\alpha, \gamma), \quad \psi = \psi(\alpha, \gamma). \quad (10)$$

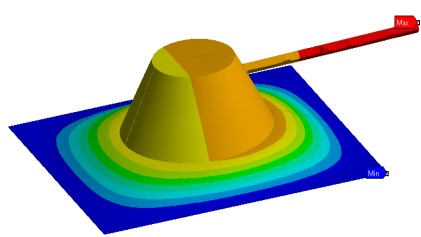
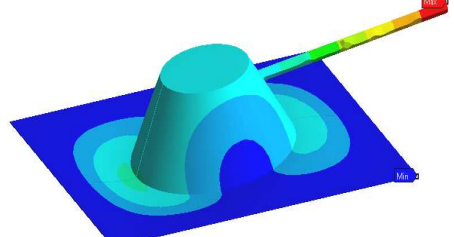
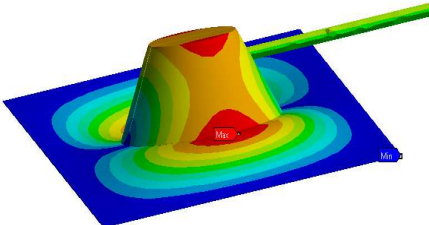
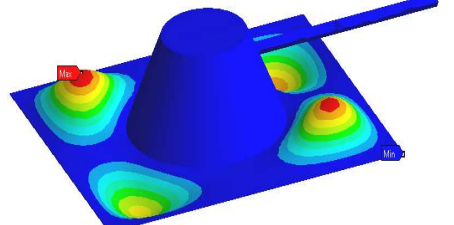
Залежність у (10) від першої координати параметрична, а друга координата описує характер часового розподілу. Ці залежності становлять інтерес при варіюванні різних параметрів системи БМ, а у частинному – також якісний характер, якій розглядається на тестовому прикладі далі.

У табл. 1–4 наведені результати чисельного моделювання динаміки БМ при варіюванні параметра α . У цьому випадку наведені «натуральні» величини, розподілені у часі t . Таким чином, отримані результати дають можливість аналізувати характер динамічного процесу у досліджуваній динамічній системі.

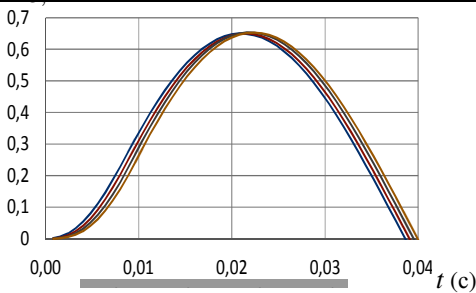
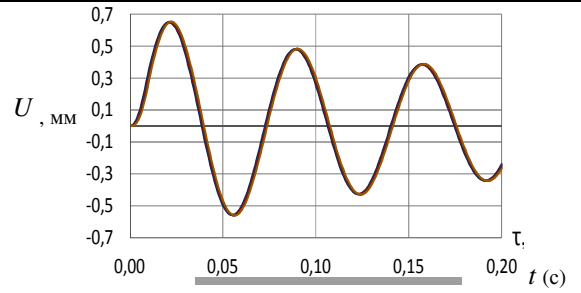
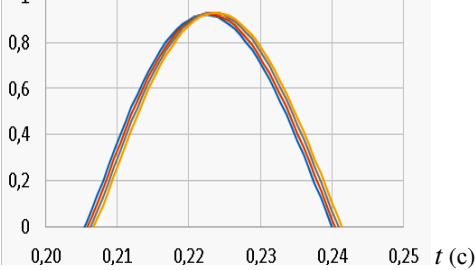
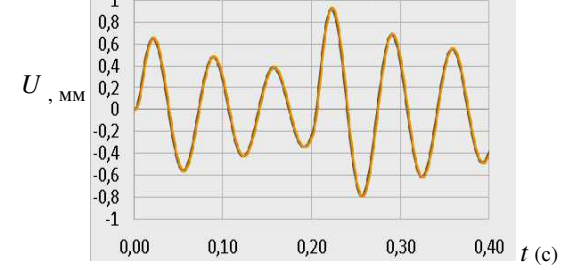
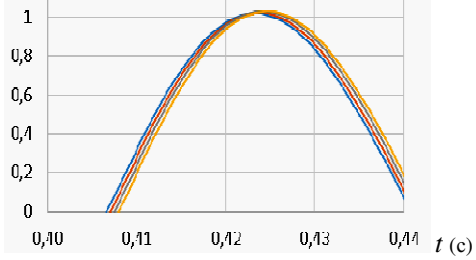
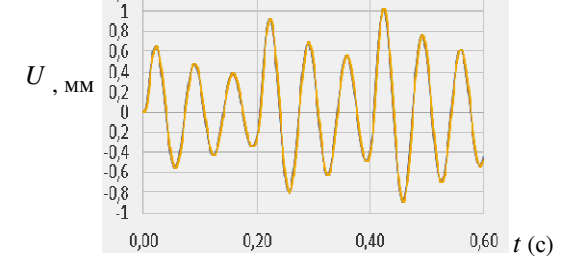
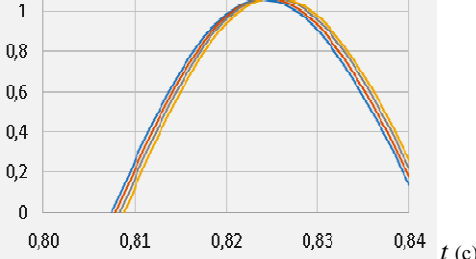
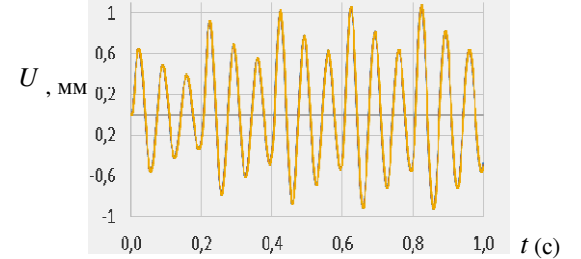
Висновки.

1. Розроблено загальний підхід до аналізу динамічної реакції бойового модуля легкоброньованої машини, оснащеної малокаліберною автоматичною гарматою, на дію реактивних сил віддачі. На першому етапі пропонується здійснювати якісний аналіз на спрощених моделях. Надалі отримані на спрощених моделях результати можна співставити із результатами аналізу на більш складних моделях.

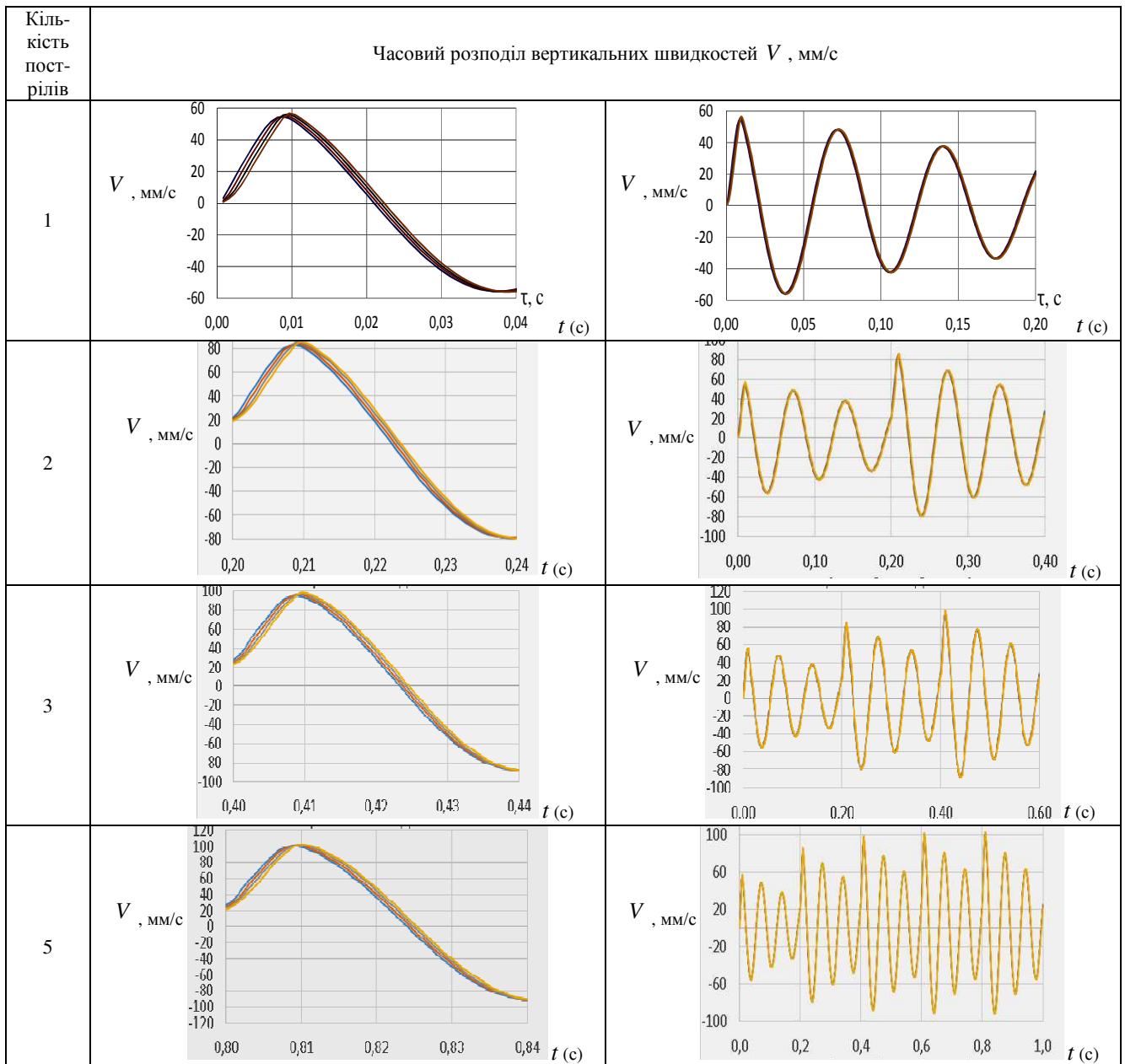
Таблиця 1 – Власні форми коливань тестової конструкції бойового модуля

Форма	Значення, Гц	Власні форми коливань	Форма	Значення, Гц	Власні форми коливань
1	9,1 1.6728 Max 1.4869 1.3011 1.1152 0.92933 0.74246 0.5576 0.37173 0.18587 0 Min		2	14,6 7.0191 Max 6.2392 5.4593 4.6794 3.8995 3.1196 2.3397 1.5598 0.7799 0 Min	
3	21,0 2.7107 Max 2.4095 2.1083 1.8071 1.5059 1.2047 0.90356 0.60237 0.30119 0 Min		4	126,3 11.282 Max 10.028 8.7745 7.521 6.2675 5.014 3.7605 2.507 1.2535 0 Min	

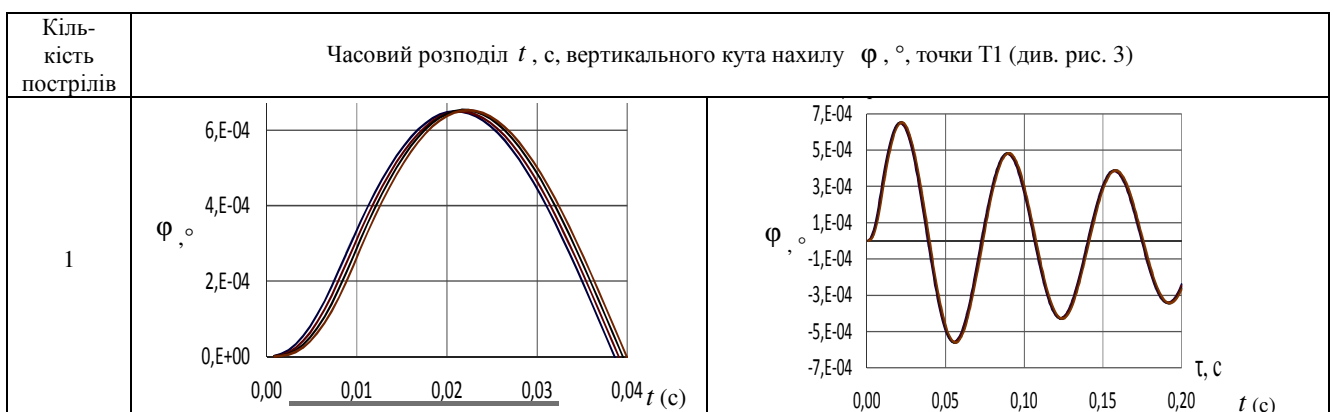
Таблиця 2 – Часовий розподіл t , с, вертикальних переміщень U , мм, точки Т1 (див. рис. 3) на різних часових інтервалах за різної кількості пострілів* (* - α_1 - α_2 - α_3 - α_4)

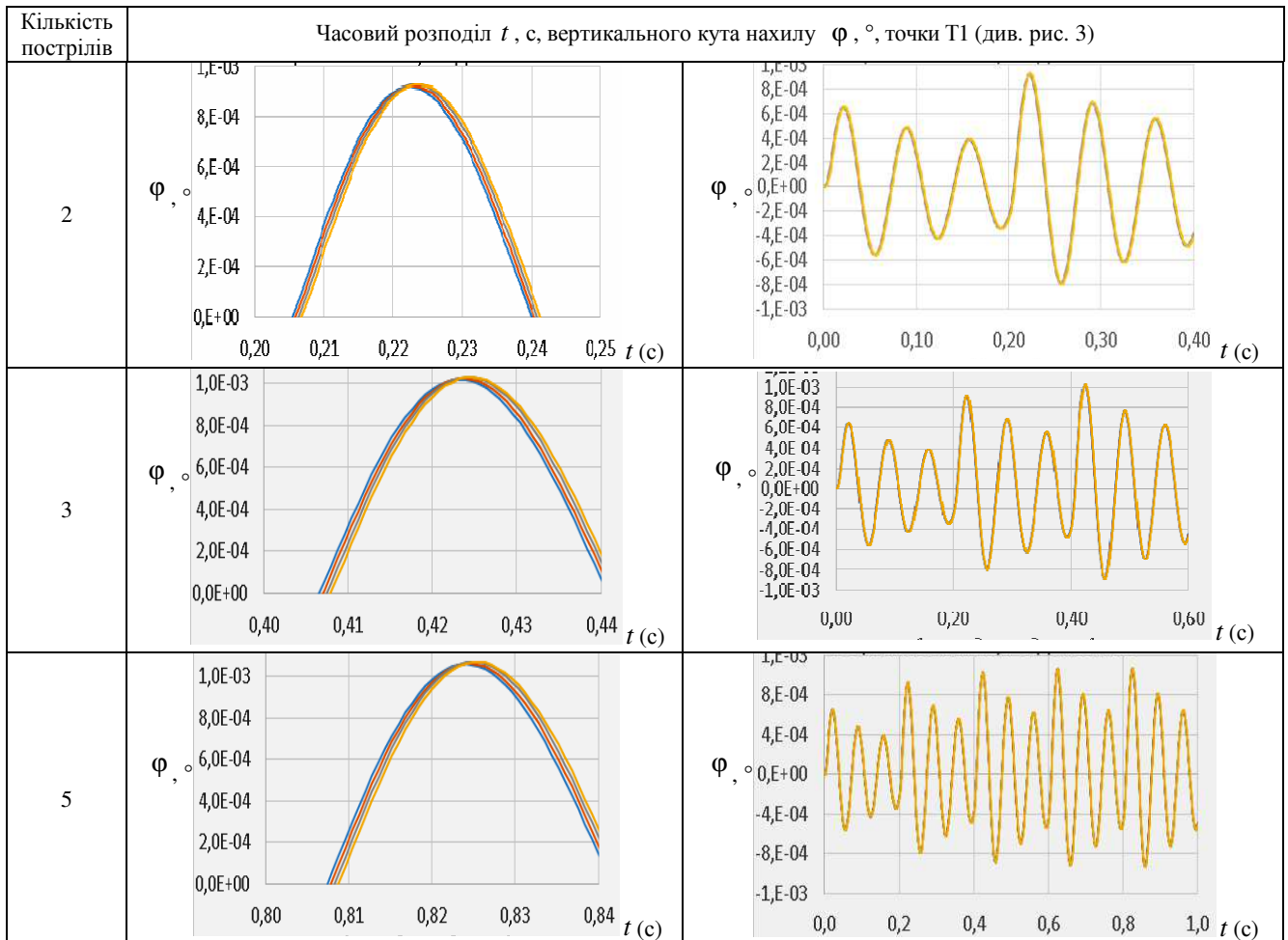
Кількість пострілів	Часовий розподіл t , с, вертикальних переміщень точки Т1 (див. рис. 3) U , мм	
1		
2		
3		
5		

Таблиця 3 – Часовий розподіл t , с, вертикальних швидкостей V , мм/с, точки Т1 (див. рис. 3) на різних часових інтервалах за різної кількості пострілів* (* - α_1 - α_2 - α_3 - α_4)



Таблиця 4 – Часовий розподіл t , с, вертикального кута нахилу φ , °, точки Т1 (див. рис. 3) на різних часових інтервалах за різної кількості пострілів* (* - α_1 - α_2 - α_3 - α_4)





2. До розгляду введена кусочно-лінійна апроксимаційна залежність часового розподілу реактивної сили віддачі. Це дає можливість запараметризувати такий розподіл сили одним параметром.

3. Як свідчать результати досліджень, на характер відгуку досліджуваної динамічної системи чинить сильний вплив рівень демпфірування. Якщо рівень демпфірування високий, а частота дії імпульсів не кратна (дольна) власній частоті коливань, то вплив окремих імпульсів можна розглядати ізольовано один від одного.

Конкретні результати, отримані на спрощеній моделі, служать для подальшої верифікації при побудові та використанні більш складної уточненої моделі.

Список літератури

- Грабовський А. В., Ткачук М. А., Мерецька К. О. [та ін.]. Вплив варійованих параметрів на власні коливання бронекорпусів легкоброньованих машин. *Механіка та машинобудування. Харків: НТУ «ХП»*. 2018. № 1. С. 65–74.
- Грабовський А. В., Ткачук М. А., Бондаренко М. О. [та ін.]. Розрахунково-експериментальні дослідження динамічних характеристик моделі макету бронекорпусу. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2019. №7 (1332). С. 47–54. doi:10.20998/2079-0775.2019.7.08.
- Васильєв А., Куценко С., Ткачук М. А., Грабовський А., Шаталов О., Волошина І., Тимофієнко В. Моделювання дії ударно-хвильового навантаження на корпусні елементи транспортних засобів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2021. № 1. С. 5–16. doi: 10.20998/2079-0775.2021.1.01
- Бісик С. П., Чепков І. Б., Васьківський М. І. [та ін.]. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2». *Озброєння та військова техніка: щокв. наук.-техн. журн. К.: ЦНДІ ОБТ ЗСУ*. 2016. №1 (9). С. 26–31.
- Бісик С. П., Чепков І. Б., Голуб В. А. та ін. Дослідження вибухового навантаження V-подібної моделі днища бойової машини. *ЦНДІ ОБТ ЗСУ. Збірник наук. праць. К.: ЦНДІ ОБТ*. 2012. Вип. 1 (22). С. 232–240.
- Бісик С. П. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машин з урахуванням зварних з'єднань. *Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України. ХНУПС ім. Кожедуба*. 2017. Вип. 3(28). С. 121–127.
- Сливінський О. А., Бісик С. П., Чепков І. Б., Васьківський М. І., Чернозубенко О. В. Проблеми виготовлення зварних бронекорпусів вітчизняних бойових броньованих машин. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 4. С. 29–38
- Katok O.A., R.V. Kravchuk, V.V. Kharchenko, M.P. Rudniits'kyi, S.P. Bisyk, L.S. Davydovs'kyi, O.A. Slyvins'kyi. Strength Assessment of Welded Joints of High-Strength Alloy Steels by Indentation Method. *Strength of Materials*. 2020/9, vol. 52, iss. 5, pp 715–721.
- Крайник Л. В., Грубель М. Г., Яльніцький О. Д. Аналіз розвитку сучасних бойових колісних машин. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. № 1 (49). С. 126–131.
- Ткачук Н. А., Заворотний А. В., Грабовський А. В. [и др.]. Аналіз чутливості вібраційних характеристик бронекорпусов к изменению проектно-технологических параметров. *Механіка та машинобудування. Харків: НТУ «ХП»*. 2017. № 1. С. 38–46.
- Манзяк М. О., Крайник Л. В., Грубель М. Г. Тенденції розвитку конструкцій підвісок військових автомобілів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 1. С. 27–35. Режим доступу: https://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_

- 2021_1_6
12. Bisyk, SP, Chepkov, IB, Vaskivskyy, MI Davydovskiy, LS, Slyvinskyy, OA. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysys. *Озброєння та військова техніка*. К.: Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, 2019. С. 22–31.
 13. Майстренко А. Л., Куш В. І., Кулич В. Г., Нешпор О. В., Бісик С. П. Підвищення захисту бойових броньованих машин від ураження 12,7-мм кулями Б-32. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 1. С. 18–23. Режим доступу: https://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2017_1_4
 14. Бісик С. П. Аналіз протитанкових мін Російської Федерації методами кластерного аналізу. *Озброєння та військова техніка*. 2018. № 2. С. 15–22
 15. Бісик С.П., Чернозубенко О.В., Сливінський О.А., Схабицький В.Р., Корбач В.Г. Порівняння ефективності підходів до числового моделювання пробиття ударником гомогенної перешкоди. *Озброєння та військова техніка*. 2017. № 3. С. 8–15.
 16. Арістархов О.М., Бісик С.П., Слюсар В.І. Оцінка вагомості показників бронетранспортера за даними опитування з використанням методу попарного порівняння. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 2. С. 42–49.
 17. Александров Е. Е., Волонцевич Д. О., Самородов В. Б. [и др.]. *Динамика транспортно-тягловых колесных и гусеничных машин*. Харьков: ХНАДУ. 2001. 640 с.
 18. Толстолуцкий В. А. *Математическое моделирование и анализ процессов в шасси колесных и гусеничных машин*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2013. 171 с.
 19. Литвиненко А.В. Общій підхід к проектно-технологическому обеспечению тактико-технических характеристик военных колесных и гусеничных машин путем обоснования параметров бронекорпусов по критериям прочности и защищенности. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2014. №29 (1072). С. 68–77.
 20. Пономарев Е. П., Васильев А. Ю. К вопросу о проведении многовариантного анализа напряженно-деформированного состояния корпуса МТ-ЛБ. *Механика и машиностроение*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2005. № 1. С. 289–294.
 21. Василенко О. В., Душенко В. В. Перспективи розвитку систем підтримання військових гусеничних і колісних машин. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХП». 2009. № 1. С. 163–174.

References (transliterated)

1. Grabovsky A. V., Tkachuk M. A., Meretska K. O. [and others] (2018). The influence of varied parameters on the self-oscillations of the armored hulls of light armored vehicles. *Mechanics and mechanical engineering*. [“Vplyv varyovanykh parametriv na vlasni kolyvannya bronekorpusiv lehkobron’ovanykh mashyn”. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*]. Kharkiv: NTU “KhPI”, no. 1, pp. 65–74.
2. Grabovsky A. V., Tkachuk M. A., Bondarenko M.O. [and others] (2019). Computational and experimental studies of the dynamic characteristics of the model of the armored hull layout. *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. [Rozrakhunkovo-eksperymental’ni doslidzhennya dynamichnykh kharakterystyk modeli maketu bronekorpusu. *Visnyk Natsional’noho tekhnichnoho universytetu “Kharkivskyy politekhnichnyy instytut”*], no. 7 (1332), pp. 47–54. doi:10.20998/2079-0775.2019.7.08.
3. Vasiliev A., Kutsenko S., Tkachuk M.A., Grabovsky A., [and others] (2021). Modeling of the effect of shock wave load on body elements of vehicles. *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. [Modelyuvannya diy udarno-khvylovoho navantazhennya na korpusni elementy transportnykh zasobiv. *Visnyk Natsional’noho tekhnichnoho universytetu “Kharkivskyy politekhnichnyy instytut”*], no. 1, pp. 5–16. doi: 10.20998/2079-0775.2021.1.01
4. Bisik S.P., Chepkov I. B., Vaskivskiy M. I. [and others] (2016). Theoretical assessment of mine resistance of the Kozak-2 multi-purpose tactical vehicle. *Armament and military equipment: every quarter. science and technology journal* [Teoretychna otsinka protyminnoyi stiykosti bahatotsil’ovoho taktychnoho avtomobilya “Kozak-2”. *Ozbroyennya ta viys’kova tekhnika*]. K.: TsNDI OVT ZSU, no. 1 (9), pp. 26–31.
5. Bisik S.P., Chepkov I. B., Holub V. A. [and others] (2012). Study of the explosive load of a V-shaped model of the bottom of a combat vehicle. TsNDI OVT of the Armed Forces of Ukraine. *Collection of sciences. works* [Doslidzhennya vybukhovoho navantazhennya V podibnoyi modeli dnyshcha boyovoyi mashyny. J. K.: TsNDI OVT, issue 1 (22), pp. 232–240.
6. Bisyk S.P. (2017). An approach to the assessment of anti-mine resistance of the hulls of armored combat vehicles taking into account welded joints. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. [Pidkhid do otsynky protyminnoyi stiykosti korpusiv boyovykh bron’ovanykh mashyn z urakhuvannyam zvarnykh z’yednan’]. KhNUPS named after Kozheduba, issue 3(28), pp. 121–127.
7. Slivinsky O.A., Bisik S.P., Chepkov I.B., Vaskivskiy M.I., Chernozubenko O.V. (2017). Problems of manufacturing welded armored hulls of domestic armored combat vehicles. *Armament and military equipment*. [Problemy vyhotovlennya zvarnykh bronekorpusiv vitchyznyanykh boyovykh bron’ovanykh mashyn. *Ozbroyennya ta viys’kova tekhnika*], no. 4, pp. 29–38
8. Katok, O.A., Kravchuk, R.V., Kharchenko, V.V., Rudnits’kyi, M.P., Bisyk, S.P. [and others] (2020). Strength Assessment of Welded Joints of High-Strength Alloy Steels by Indentation Method. *Strength of Materials*, vol. 52, iss. 5, pp 715–721.
9. Kraynyk, L. V., Grubel, M. G., Yalnytyskiy, O. D. (2017). Analysis of the development of modern combat wheeled vehicles. *Weapon systems and military equipment*. [Analiz rozvytku suchasnykh boyovykh kolisnykh mashyn. *Systemy ozbroyennya i viys’kova tekhnika*], no. 1 (49), pp. 126–131.
10. Tkachuk N. A., Zavorotny A. V., Grabovsky A. V. [and others] (2017). Analysis of the sensitivity of vibration characteristics of armored hulls to changes in design and technological parameters. *Mechanics and mechanical engineering*. [Analiz chuvstvytel’nosti vybratsyonnykh kharakterystyk bronekorpusov k yzmenenyuy proektno-tekhnolohycheskykh parametrov. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*]. Kharkiv: NTU “KhPI”, no. 1, pp. 38–46.
11. Manzyak M. O., Kraynyk L. V., Grubel M. G. Trends in the development of military vehicle suspension designs. *Weapon systems and military equipment*. [Tendentsiyi rozvytku konstruktivnykh pidvisok viys’kovykh avtomobiliv. *Systemy ozbroyennya i viys’kova tekhnika*]. 2021. No. 1. P. 27–35. – Access mode: https://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2021_1_612.12
12. Bisyk, SP, Chepkov, IB, Vaskivskyy, MI Davydovskiy, LS, Slyvinskyy, OA. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysys. *Armament and military equipment*. K.: Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine, 2019. С. 22–31.
13. Maistrenko, A. L., Kush, V. I., Kulich, V. G., Neshpor, O. V., Bisik, S. P. (2017). Increasing the protection of combat armored vehicles against damage by 12.7-mm B-32 bullets. *Armament and military equipment*. [Pidvyshchennya zakhystu boyovykh bron’ovanykh mashyn vid urazhennya 12,7-mm kuliyami B-32. *Ozbroyennya ta viys’kova tekhnika*], no. 1, pp. 18–23. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2017_1_4
14. Bisik S.P. (2018). Analysis of anti-tank mines of the Russian Federation using methods of cluster analysis. *Armament and military equipment*. [Analiz protytankovykh min Rosiys’koyi Federatsiyi metodamy klasternoho analizu. *Ozbroyennya ta viys’kova tekhnika*], no. 2, pp. 15–22
15. Bisyk, S.P., Chernozubenko, O.V., Slivinskyi, O.A., Shabytskyi, V.R., Korbach, V.G. (2017). Comparison of the effectiveness of approaches to the numerical modeling of the penetration of a homogeneous obstacle by an impactor. *Armament and military equipment*. [Porivnyannya efektyvnosti pidkhodiv do chyslovoho modelyuvannya probyttya udarnykom homohennoyi pereshkody. *Ozbroyennya ta viys’kova tekhnika*], no. 3, pp. 8–15.
16. Aristarkhov, O.M., Bisik, S.P., Slysar, V.I. (2019). Evaluation of the importance of the indicators of the armored personnel carrier according to the survey data using the method of pairwise comparison. *Armament and military equipment*. [Otsinka vahomosti pokaznykh bronetransportera za danymy opytuvannya z vykorystannyam metodu poparnoho porivnyannya. *Ozbroyennya i viys’kova tekhnika*], no. 2, pp. 42–49.
17. Aleksandrov, E.E., Volontsevich, D.O., Samorodov, V.B. [and others] (2001). *Dynamics of wheeled and tracked transport vehicles*. [Dynamyka transportno-tyahovykh kolisnykh y husenychnykh mashyn] Kharkiv: HNADU. 640 p.

18. Tolstolutsy, V. A. (2013). *Mathematical modeling and analysis of processes in the chassis of wheeled and tracked machines*. [Matematycheskoe modelyrovanye y analiz protsessov v shassy kolesnykh y husenychnykh mashyn]. Kharkiv: NTU "KhPI", 171 p.
19. Lytvynenko A.V. (2014). A general approach to the design and technological provision of tactical and technical characteristics of military wheeled and tracked vehicles by substantiating the parameters of armored hulls according to the criteria of strength and protection. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. [Obshchyy podkhod k proektno-tekhnolohycheskomu obespechenyyu taktyko-tekhnicheskyykh kharakterystyk voennykh kolesnykh y husenychnykh mashyn putem obosnovanyua parametrov bronekorpusov po kryteryam prochnosti y zashchyschennosti. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "Kharkivs'kyu politekhnichnyy instytut"*]. Kharkiv: NTU "KhPI", no. 29 (1072), pp. 68–77.
20. Ponomarev, E. P., Vasiliev, A. Yu. (2005). To the question of conducting a multivariate analysis of the stress-strain state of the MT-LB hull. *Mechanics and mechanical engineering*. [K voprosu o provedenyyu mnohovaryantnoho analiza napryazhenno-deformirovannoho sostoyannya korpusa MT-LB. *Mekhanika y mashynostroenye*]. Kharkiv: NTU "KhPI", no. 1, pp. 289–294.
21. Vasylenko, O. V., Dushchenko, V. V. (2009). Prospects for the development of suspension systems for military tracked and wheeled vehicles. *Mechanics and mechanical engineering*. [Perspektyvy rozvytku system pidresoryuvannya viys'kovykh husenychnykh i kolisnykh mashyn. *Mekhanika ta mashynobuduvannya*]. Kharkiv: NTU "KhPI", no. 1, pp. 163–174.

Надійшла (received) 22.06.2022

Відомості про авторів / About the Authors

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; тел.: (093)829-70-05; e-mail: vvoova1102@ukr.net

Набоков Анатолій Володимирович / Nabokov Anatoly – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; тел.: (057)707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org

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>; e-mail: andrej8383@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

Храмцова Ірина Яківна / Khramtsova Iryna – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9506-790X>; тел.: (057)7076901; e-mail: iyakhram@gmail.com

Рікунов Олег Миколайович / Rikunov Oleh – полковник, кандидат технічних наук, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри «Технічного та тилового забезпечення», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7581-7531>; e-mail: rikunov317@ukr.net

Васильєв Антон Юрійович / Vasyliiev 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>; тел.: (057)7076166, e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org

Коба Андрій Миколайович / Andrii Koba – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; e-mail: a.skoba89@gmail.com