

**А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, М. М. ТКАЧУК, І. О. ВОЛОШИНА, О. С. ЛЬОЗНИЙ,  
М. А. ТКАЧУК, І. Я. ХРАМЦОВА, О. В. КОХАНОВСЬКА, Є. В. ПЕЛЕШКО, А. В. НАБOKOВ,  
В. В. ТРОЦЕНКО**

### **БРОНЕКОРПУСИ ВІТЧИЗНЯНИХ БРОНЕТРАНСПОРТЕРІВ: КОМП'ЮТЕРНЕ ТА МАКЕТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

На етапі проектних досліджень бронекорпусів легкоброньованих машин важливим є визначення спектру їх власних частот коливань та власних форм коливань. Із цією метою зазвичай застосовується метод скінченних елементів. При цьому необхідно обґрунтувати параметри скінченно-елементної моделі, які забезпечують прийнятний рівень точності чисельного моделювання динамічних властивостей такого типу конструкцій. Із цією метою залучаються дані паралельно здійснюваних чисельних та експериментальних досліджень макету бронекорпусу бронетранспортера. Сам макет верхньої проекції бронекорпусу виготовлено у відповідному масштабі. Матеріал – листовая сталь. Цей макет піддано динамічному збудженню на вібростенді. Фіксуються резонансні частоти збудження, а також власні форми коливань. Також здійснено ударно-імпульсне збудження макета бронекорпуса. Відгук на це збудження фіксується за допомогою акселерометрів. Надалі із цих осцилограм визначається спектр власних частот коливань. Паралельно здійснюється чисельне моделювання власних частот коливань і власних форм коливань макету бронекорпусу. Надалі результати чисельних і експериментальних досліджень порівнюються. Шляхом варіювання параметрів скінченно-елементної моделі досягається задовільна відповідність результатів чисельних розрахунків та експериментальних вимірювань. Зокрема, визначаються: прийнятний тип скінченних елементів, що застосовуються; кількість скінченних елементів, необхідна для задоволення точності чисельного моделювання динамічних властивостей конструкцій подібного типу; зони рекомендованого згущення-розрідження сітки скінченних елементів тощо. За результатами досліджень установлені параметри скінченно-елементних моделей, які можуть бути застосовані для дослідження динамічних процесів і властивостей натурних бронекорпусів легкоброньованих машин.

**Ключові слова:** легкоброньована машина, макет, власна частота коливань, спектр власних частот коливань

**А. В. ГРАБОВСКИЙ, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ, Н. Н. ТКАЧУК, И. А. ВОЛОШИНА, О. С. ЛЁЗНИЙ,  
Н. А. ТКАЧУК, И. Я. ХРАМЦОВА, О. В. КОХАНОВСКАЯ, Е. В. ПЕЛЕШКО, А. В. НАБOKOВ,  
В. В. ТРОЦЕНКО**

### **БРОНЕКОРПУСА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ БРОНЕТРАНСПОРТЕРОВ: КОМПЬЮТЕРНОЕ И МАКЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

На этапе проектных исследований бронекорпусов легкобронированных машин крайне важно определение спектра их собственных частот колебаний и собственных форм колебаний. С этой целью обычно применяется метод конечных элементов. При этом необходимо обосновывать параметры конечно-элементной модели, обеспечивающие приемлемый уровень точности численного моделирования динамических свойств такого типа конструкций. С этой целью привлекаются данные параллельно осуществляемых численных и экспериментальных исследований макета бронекорпуса бронетранспортера. Сам макет верхней проекции бронекорпуса изготовлен в соответствующем масштабе. Материал – листовая сталь. Этот макет подвержен динамическому возбуждению на вибростенде. Фиксируются резонансные частоты возбуждения и собственные формы колебаний. Также осуществлено ударно-импульсное возбуждение макета бронекорпуса. Отклик на это возбуждение фиксируется с помощью акселерометров. В дальнейшем из этих осциллограмм определяется спектр собственных частот колебаний. Параллельно осуществляется численное моделирование собственных частот колебаний и форм колебаний макета бронекорпуса. В дальнейшем результаты численных и экспериментальных исследований сравниваются. Путем варьирования параметров конечно-элементной модели достигается удовлетворительное соответствие результатов численных расчетов и экспериментальных измерений. В частности, определяются: приемлемый тип применяемых конечных элементов; количество конечных элементов, необходимое для удовлетворения точности численного моделирования динамических свойств конструкций подобного типа; зоны рекомендуемого сгущения-разрежения сетки конечных элементов и т.п. По результатам исследований установлены параметры конечно-элементных моделей, которые могут быть применены для исследования динамических процессов и свойств натурных бронекорпусов легкобронированных машин.

**Ключевые слова:** легкобронированная машина, макет, собственная частота колебаний, спектр собственных частот колебаний

**A. GRABOVSKIY, A. VASYLIEV, M. M. TKACHUK, I. VOLOSHYNA, O. LOZNYI, M. A. TKACHUK,  
I. KHRAMTSOVA, O. KOKHANOVSKA, Ye. PELESHKO, A. NABOKOV, V. TROTSSENKO**

### **ARMORED HULLS OF DOMESTIC ARMORED PERSONNEL CARRIERS: COMPUTER AND MOCK-UP MODELING OF DYNAMIC PROPERTIES**

At the stage of design research of armored bodies of lightly armored vehicles it is extremely important to determine the range of their natural frequencies and natural forms of oscillation. For this purpose, the finite element method is usually used. It is necessary to substantiate the parameters of the finite element model, which provide an acceptable level of accuracy of numerical modeling of dynamic properties of this type of structures. For this purpose, data from parallel numerical and experimental studies of the mock-up of the armored hull of the armored personnel carrier are used. The mock-up of the upper projection of the armored hull is made in the appropriate scale. The material is sheet steel. This mock-up is subjected to dynamic excitation on a vibrating table. Resonant excitation frequencies are recorded, as well as the natural vibration forms. Shock-pulse excitation of the armored hull's mock-up was also performed. The response to this excitation is recorded using accelerometers. Then, the spectrum of natural vibration frequencies is determined from these oscillograms. In parallel, numerical modeling of natural frequencies and natural vibration forms of the armored hull's mock-up is carried out. After that, the results of numerical and experimental studies are compared. By varying the parameters of the finite element model, a satisfactory correspondence between the results of numerical calculations and experimental measurements is achieved. In particular, the following are determined: the acceptable type of used finite elements; the number of finite elements required to satisfy the accuracy of numerical modeling of the dynamic properties of similar structures; zones of the recommended thickening-rarefaction of a grid of finite elements, etc. According to the research results, the parameters of finite-element models have been established, which can be used to study the dynamic processes and properties of full-scale armored hulls of lightly armored vehicles.

**Keywords:** lightly armored vehicle, mock-up, natural frequency, spectrum of natural vibration frequencies

**Вступ.** Сучасні легкоброньовані машини (ЛБМ) є одним із найбільш затребуваних компонентів

© А. В. Грабовський, А. Ю. Васильєв, М. М. Ткачук, І. О. Волошина, О. С. Льозний, М. А. Ткачук, І. Я. Храмцова, О. В. Кохановська, Є. В. Пелешко, А. В. Набоков, В. В. Троценко, 2022

озброєння Збройних сил України та інших армій світу. Ці тенденції підтверджені досвідом бойових дій у різних конфліктах, зокрема, у східних областях України. Відповідно, зростають вимоги до рівня тактико-технічних характеристик цих машин, зокрема, до потужності та ефективності озброєння, до ступеня захищеності від дії ураження, до рухливості тощо. Зважаючи на те, що елементи сучасних ЛБМ є, у більшості своїй, тонкостінними елементами, а силові впливи на них мають динамічний характер із широким частотним спектром зусиль збудження, то неминуче на перший план при їх проектуванні, підготовці виробництва та модернізації висувається проблема забезпечення відповідних динамічних характеристик найбільш навантажених та відповідальних деталей, вузлів та систем легкоброньованих машин. У першу чергу мова йде про власні частоти та форми коливань задля відлаштування від резонансних режимів. Оскільки вони, ці елементи, у свою чергу, є тілами складної форми, то аналітичні методи аналізу власних частот та форм коливань для цієї мети непридатні. Експериментальні ж методи є занадто ресурсовитратними та займають значні часові терміни.

Щодо чисельних методів, то одним із найбільш потужних серед них є метод скінченних елементів, реалізований у вигляді програмних комплексів ANSYS, Femap, Abaqus тощо. Проте ці комплекси у силу універсальності не адаптовані до низки проблемних питань тієї чи іншої предметної області. Зокрема, це стосується такої чутливої галузі як бронетанкобудування.

Таким чином, існуючі розробки потребують розвитку та адаптації до проблемних аспектів при створенні ЛБМ. При цьому слід зазначити, що існуючі можливості програмних комплексів не завжди покривають потреби практики, зокрема, із точки зору визначення тенденцій зміни власних частот (ВЧК) та власних форм коливань (ВФК) складних об'єктів. Супутньою проблемою є обґрунтування параметрів скінченно-елементних моделей, які придатні для моделювання динамічних процесів, власних частот коливань та власних форм коливань натурних зразків бронекорпусів ЛБМ із прийнятним рівнем точності. Задля цього у роботі звертається увага на розрахунково-експериментальне моделювання макетів бронекорпусів.

**Аналіз проектних рішень бронекорпусів сучасних легкоброньованих машин та методів аналізу динамічних властивостей та процесів у цих корпусах.** Бронекорпуси сучасних ЛБМ мають розроблятися та виготовлятися на основі широкої множини критеріїв та обмежень. Це, зокрема, окрім загальних тенденцій [1–10], ще й питання захищеності [11–20], рухливості [21, 22], озброєності [23–25], а також технологічні аспекти, які супроводжують виготовлення бронекорпусів [26–29].

На перелічені критерії та обмеження накладаються сучасні тенденції проектування бронекорпусів ЛБМ, переважно у вигляді просторових зварних конструкцій [30–32]. Отже, на етапі розробки необхідно дослідити динамічні процеси та властивості тонкостінних зварних конструкцій, у першу чергу, – ВЧК та ВФК [33, 34]. Задля цього залучаються різні моделі ті методи [35–46].

Ці моделі та методи мають певні недоліки та переваги. Однак у кінцевому підсумку питання про достовірність чисельного моделювання може бути вирішене тільки на основі порівняння із даними експериментальних досліджень [47–49]. Зокрема, на ранніх етапах досліджень раціональним є використання розрахунково-експериментальних досліджень, здійснюване на макетних зразках виробів (або їхніх фрагментів) [49–53]. Такий підхід, попри суттєву економію часу та коштів, забезпечує також і баланс точності та оперативності при дослідженнях уже проектних зразків натурних бронекорпусів.

У роботі на розвиток підходів [49–52] поставлене та описане розв'язання задачі розрахунково-експериментального дослідження ВЧК та ВФК верхньої проекції бронекорпусу ЛБМ саме на прикладі макетного зразка.

*Мета роботи* – здійснення розрахунково-експериментальних досліджень верхньої проекції бронекорпусу БТР-80 задля обґрунтування параметрів чисельних моделей, які є прийнятними для визначення ВЧК та ВФК натурних бронекорпусів ЛБМ.

**Макетне моделювання елементів бронекорпусу.** Як уже зазначалося, сучасні дослідження у більшості випадків виконуються за допомогою чисельних методів із застосуванням комп'ютерного моделювання [53]. Такий підхід дає можливість отримувати велику кількість даних про досліджуваній об'єкт, кількість яких суттєво перевершує обсяг, одержуваний при виконанні експерименту. Більш того, такі розрахунки виконуються для «ідеалізованої» конструкції, тобто припускається, що матеріал, з якого виготовляється об'єкт, буде без дефектів, усі зварні шви – «ідеальними», листи – однієї товщини тощо. Однак такі методи моделювання можуть призвести до помилкових результатів, що може бути пов'язане із постановкою задачі, а саме: неврахування фізичних ефектів, неправильний вибір типу аналізу або застосування лінійних моделей замість нелінійних. Для верифікації чисельних моделей застосовуються розрахунково-експериментальні методи [49–52] (див. вище). Суть цих методів полягає у тому, що окремі розрахункові моделі перевіряються експериментальним шляхом для верифікації та коригування чисельних досліджень. Ці методи на початкових етапах можуть виконуватися на макетах, а перед етапом запуску виробу у серію – на реальних зразках.

У цій роботі для здійснення експерименту розглянуто верхній пояс корпусу бронетранспортера як його найбільш навантажену частину. Верхній пояс (верхня проекція) корпусу є зварною тонкостінною просторовою конструкцією і складається із підбаштового, передніх, бічних і задніх листів, верхньої частини моторно-трансмійного відділення. Ескізи креслення макету для його виготовлення наведено на рис. 1. Макет корпусу виготовлений із листів металу (сталь 3) товщиною 1,5 мм методом зварювання і має наступні габаритні розміри: довжина – 810 мм, ширина – 310 мм, висота – 33 мм. Маса виготовленої конструкції дорівнює 3,3 кг. Зовнішній вигляд макета фрагмента корпусу БТР-80 представлений на рис. 2.

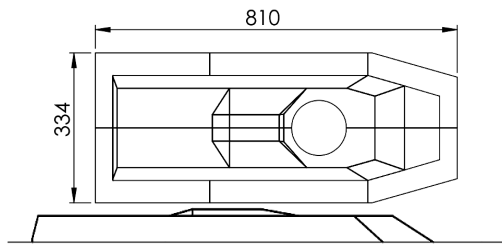


Рисунок 1 – Ескізи креслення макету верхньої проекції корпусу БТР-80

У той же час була створена геометрична модель у системі SolidWorks. Виготовлений макет верхньої проекції корпусу БТР-80 (рис. 2) та геометрична модель (рис. 3) певним чином відповідають у масштабі реальній конструкції.

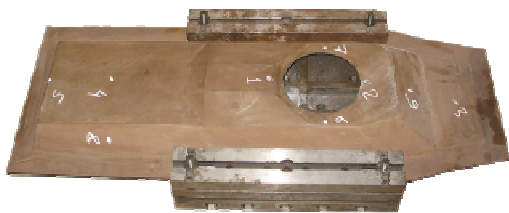


Рисунок 2 – Макет фрагменту корпусу БТР-80 із заданими місцями кріплення датчика

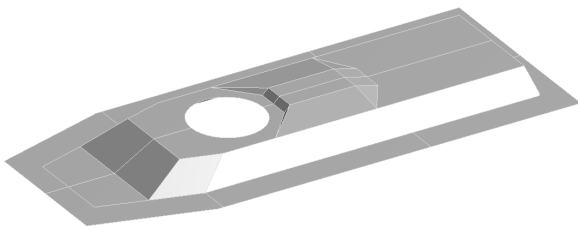


Рисунок 3 – Поверхнева геометрична модель макету у пакеті SolidWorks

Побудовані моделі використані для подальшого розрахунково-експериментального дослідження.

**Методика розрахунково-експериментальних досліджень.** Для верифікації моделей запропоновано виконати аналіз перехідних динамічних процесів від імпульсного навантаження та аналіз власних частот коливань і власних форм коливань для моделі макету верхньої проекції корпусу бронетранспортеру БТР-80. Ці дослідження виконані за допомогою експериментальних методів, з одного боку, та шляхом чисельного розрахунку методом скінченних елементів, – з іншого.

Експериментальні дослідження склалися із трьох етапів:

- 1) дослідження перехідних динамічних процесів від імпульсного навантаження;
- 2) дослідження перехідних динамічних процесів від імпульсного навантаження із варійованою масою «башти» (тобто її макету);
- 3) дослідження власних частот і власних форм від високочастотного навантаження вібратором.

Для першого етапу експериментальних досліджень макет верхньої проекції корпусу БТР-80 був закріплений у спеціальному обладнанні для його фіксації. Обладнання та елементи фіксації динамічних характеристик зображені на рис. 4, 5. Імпульсне

навантаження здійснювалося за допомогою прогумованого ударника.

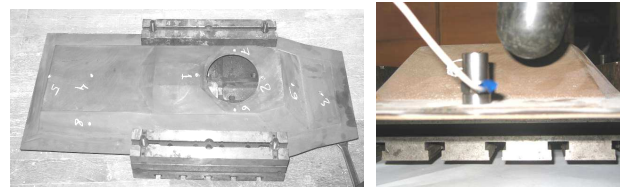


Рисунок 4 – Модель верхньої частини корпусу БТР-80, закріплена у спеціальному обладнанні



Рисунок 5 – Фіксація динамічних процесів у макеті

Фіксація прискорень у макеті здійснювалася аналізатором спектру вібрацій та спеціальним датчиком ДН-3-М1 (рис. 6).



Рисунок 6 – Аналізатор спектра вібрацій та датчик ДН-3-М1

Варіювання маси башти здійснювалося за допомогою набірних металевих пластин, кожна з яких – масою 0,5 кг. Пластини закріплювалися за допомогою металевого штифта та гайки, як показано на рис. 7.



Рисунок 7 – Приклад моделювання башти (на наведеному рисунку маса «башти» 1 кг)

На другому етапі експериментальних досліджень макет був використаний для аналізу власних форм і частот. Макет був закріплений на станині і збуджувався на низькій частоті за допомогою віброприскорювача (рис. 8). Фіксація власних форм здійснювалася шляхом позначення вузлових ліній частинками сухого піску, розсипаного поверхнею макета.

При дослідженні макету чисельними методами була здійснена спроба імітації експерименту. Макет досліджувався методом скінченних елементів, сітка яких наведена на рис. 9.

Для імітації імпульсного навантаження була використана схема навантаження, аналогічна

експерименту (рис. 10). А саме, в місцях установки датчика додавався цифровий датчик, а у місці удару задавалась імпульсна сила (згідно графіка на рис. 10).



Рисунок 8 – Макет моделі верхньої частини корпусу БТР-80, закріплений на станині із прикріпленим віброприскорювачем для збудження коливань

Аналіз власних частот і власних форм коливань виконано на тій самій скінченно-елементній моделі (СЕМ) (див. рис. 9), з аналогічними закріпленнями.

**Результати дослідження динамічних характеристик макету бронекорпусу.** Згідно з описаною вище методикою були виконані експериментальні дослідження верхньої проекції

макету корпусу бронетранспортеру БТР-80. Результати були записані у вигляді текстового масиву, після чого подані у графічній формі і наведені на рис. 11–22.

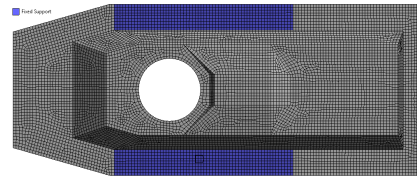


Рисунок 9 – Скінченно-елементна модель із граничними умовами

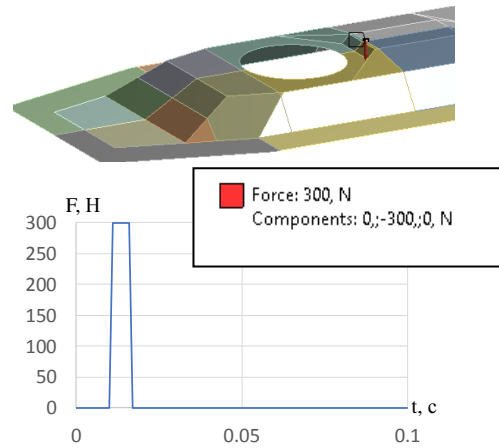


Рисунок 10 – Силове імпульсне навантаження при чисельному розрахунку

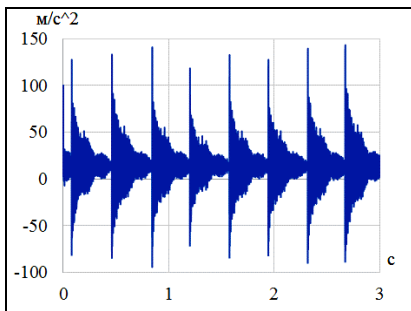


Рисунок 11 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 1 із відкритим верхом на інтервалі 3 с

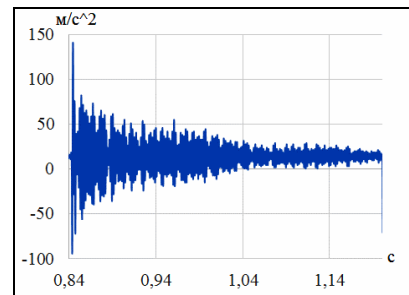


Рисунок 12 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 1 із відкритим верхом на інтервалі від 0,84 до 1,15 с

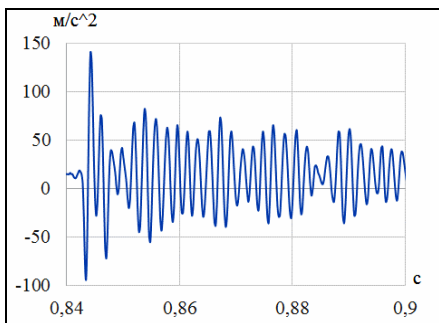


Рисунок 13 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 1 із відкритим верхом на інтервалі від 0,84 до 0,9 с

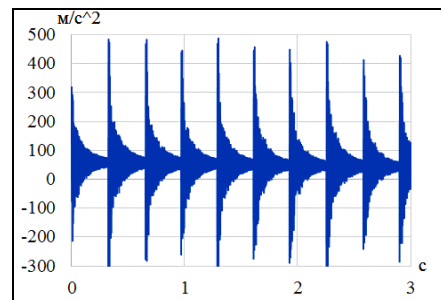


Рисунок 14 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 2 із відкритим верхом на інтервалі 3 с

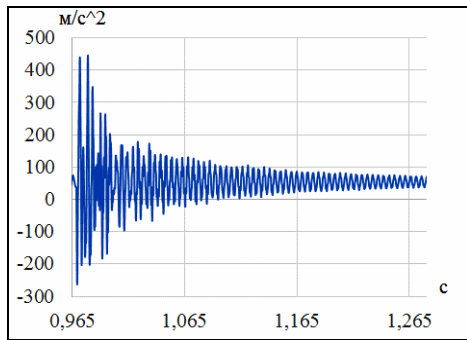


Рисунок 15 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 2 із відкритим верхом на інтервалі від 0,965 до 1,27 с

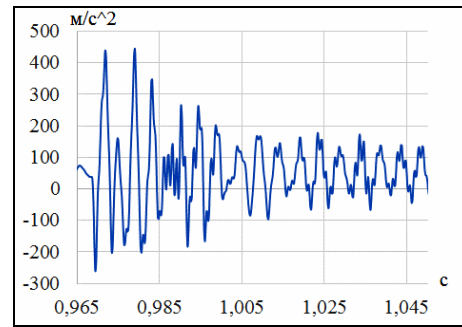


Рисунок 16 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 2 із відкритим верхом на інтервалі від 0,965 до 1,05 с

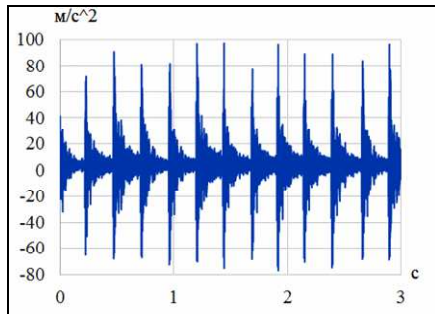


Рисунок 17 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 6 із відкритим верхом на інтервалі 3 с

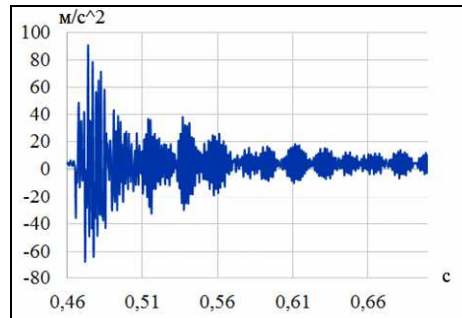


Рисунок 18 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 6 із відкритим верхом на інтервалі від 0,46 до 0,7 с

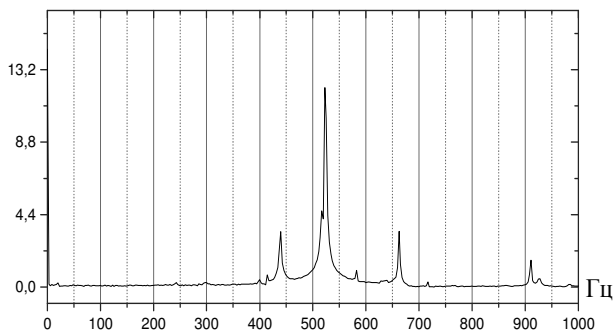


Рисунок 19 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 11

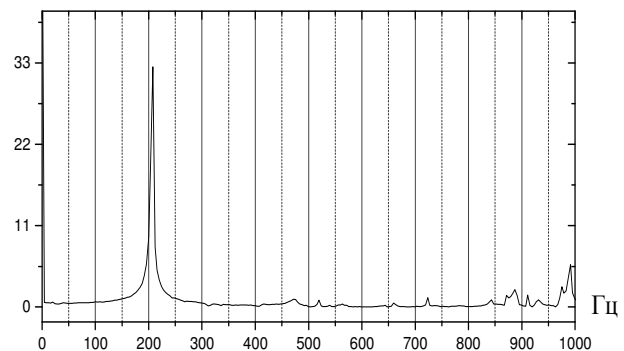


Рисунок 20 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 15

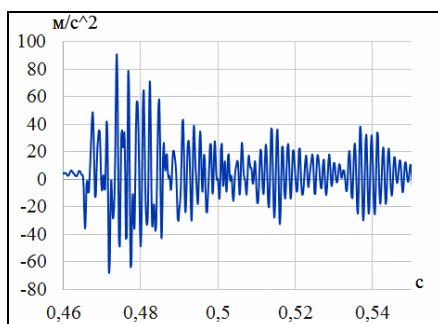


Рисунок 21 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 6 із відкритим верхом на інтервалі від 0,46 до 0,55 с

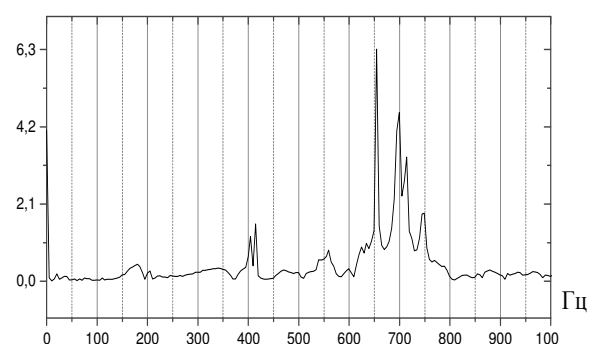


Рисунок 22 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 19

Як результати наведені розподіли прискорень у часі макету бронетранспортера з відкритим верхом у декількох характерних точках 1, 2, 6 (див. рис. 4), та перетворення Фур'є функції.

Ці результати описують відгук макета на ударну дію. Аналогічні графіки були отримані і для

інших точок, у тому числі – графіки швидкостей і переміщень.

На другому етапі експериментальних досліджень виконується аналогічний експеримент, але, як зображено на рис. 7, варіюється маса башти. На рис. 23–34 наведені переміщення та



спектральний відгук для точки 2 (рис. 25).

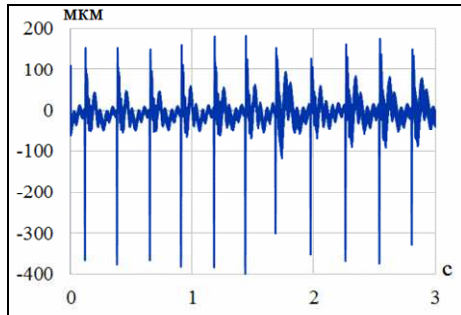


Рисунок 23 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із відсутньою баштою

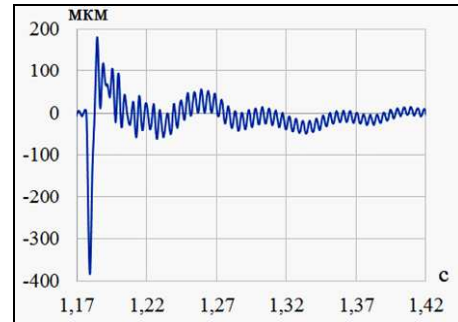


Рисунок 24 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із відсутньою баштою (1 імпульс)

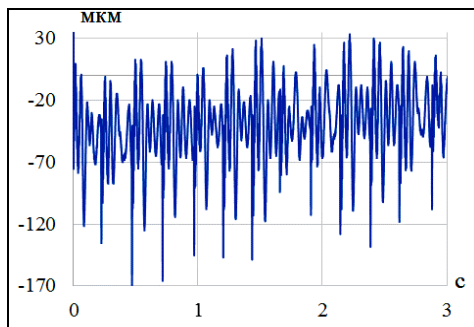


Рисунок 25 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із моделюванням підбаштового листа

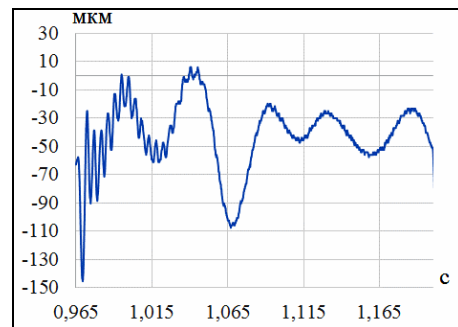


Рисунок 26 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із моделюванням підбаштового листа (1 імпульс)

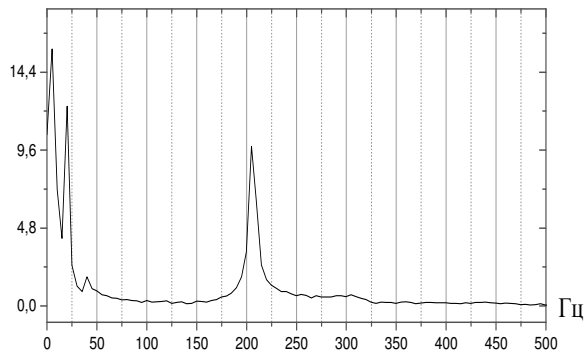


Рисунок 27 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 23

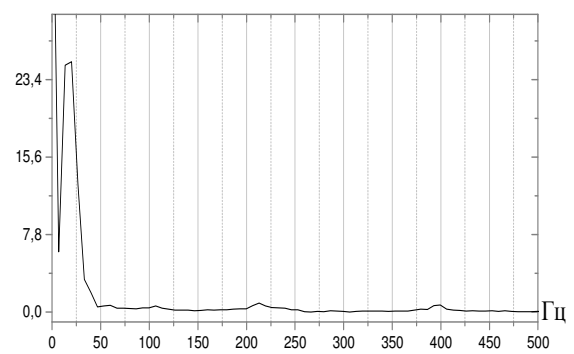


Рисунок 28 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 25

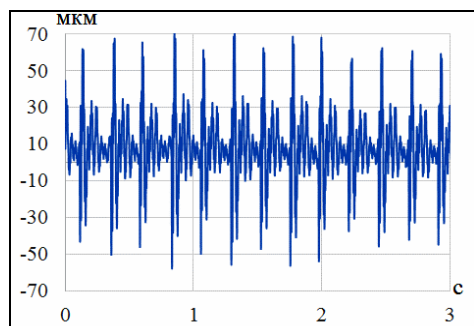


Рисунок 29 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із моделюванням башти масою 1 кг

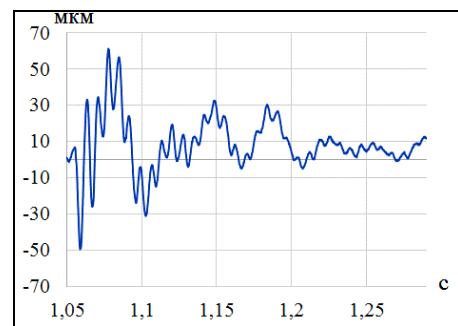


Рисунок 30 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із моделюванням башти масою 1 кг (1 імпульс)

Усі характеристики були отримані і для інших точок, які в наведеному масиві не показані.

На третьому етапі експериментальних досліджень виконується аналіз власних частот і

власних форм. Як було описано раніше, макет був закріплений на станині і збуджувався на низькі частот за допомогою віброприскорювача (рис. 35). Фіксація власних форм здійснювалася шляхом позначення

вузлових ліній частинками сухого піску, розсипаного поверхню макета.

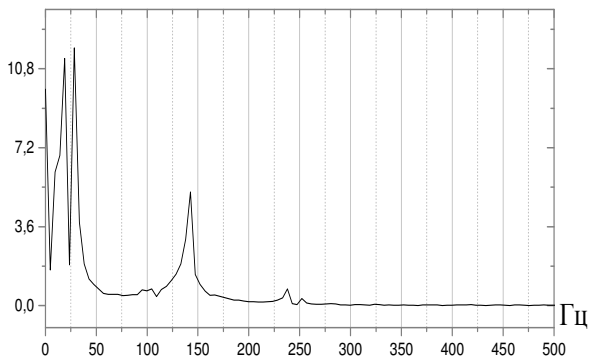


Рисунок 31 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 29

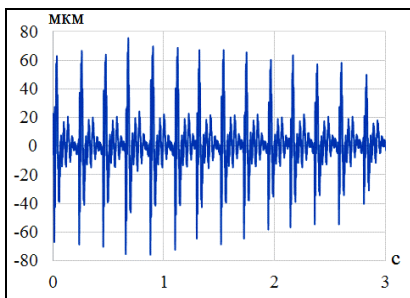


Рисунок 32 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із моделюванням башти масою 2,5 кг

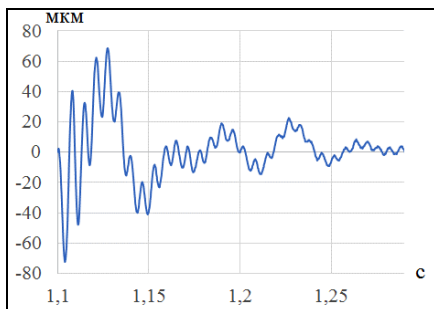


Рисунок 33 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із моделюванням башти масою 2,5 кг (1 імпульс)

У ході експерименту отримані власні форми коливань і власні частоти коливань. Власні форми фіксувалися при утворенні характерних картин із вузлових ліній, а частоти «витягувалися» із вібратора у ці моменти часу.

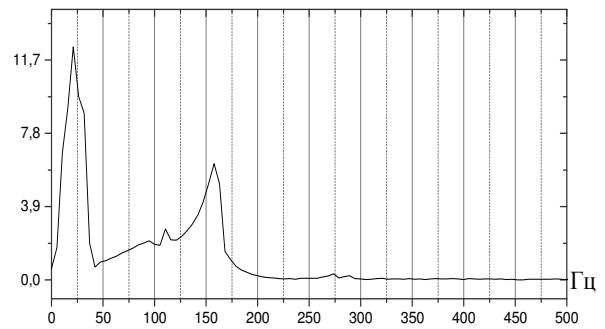


Рисунок 34 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 32



Рисунок 35 – Макет моделі верхньої частини корпусу БТР-80, закріпленій на станині для збудження коливань та з'єднаний із вібратором

Ці дані зберігаються в електронному вигляді. Для аналізу отриманих результатів була написана програма для побудови графіків розподілу переміщень, швидкостей і прискорень у часі.

Деякі отримані картини власних форм наведені нижче, рис. 36. На рис. 37–48 наведені чисельні розрахунки для прискорень, швидкостей та переміщень від імпульсного навантаження у заданих точках.

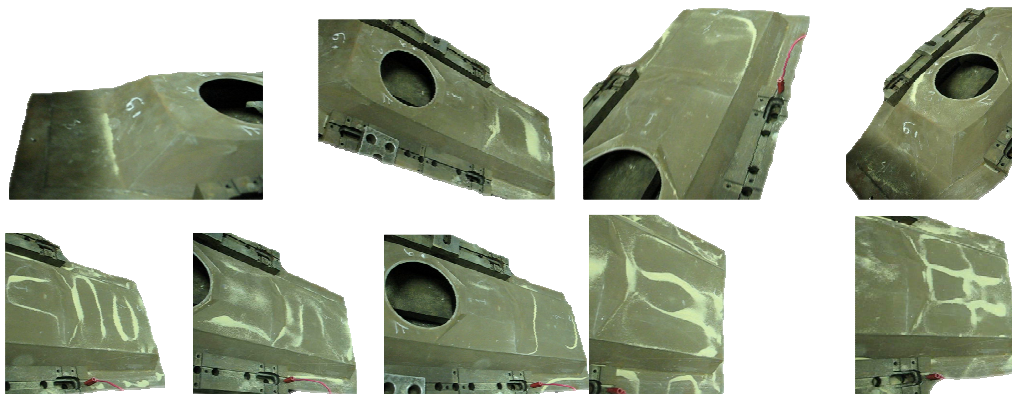


Рисунок 36 – Деякі зареєстровані власні форми коливань

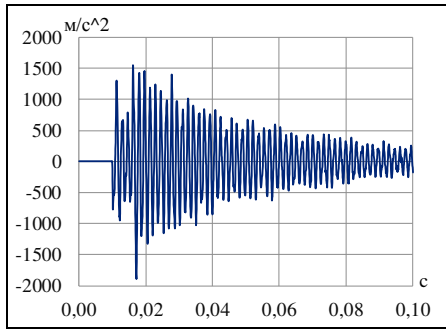


Рисунок 37 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 1 із відкритим верхом

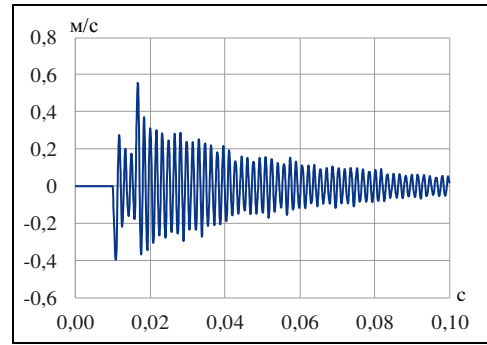


Рисунок 38 – Графік розподілу швидкостей у часі у точці 1 із відкритим верхом

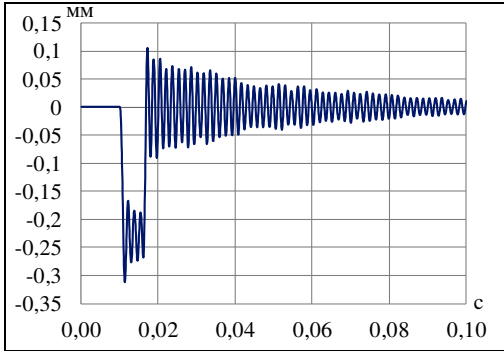


Рисунок 39 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 1 із відкритим верхом

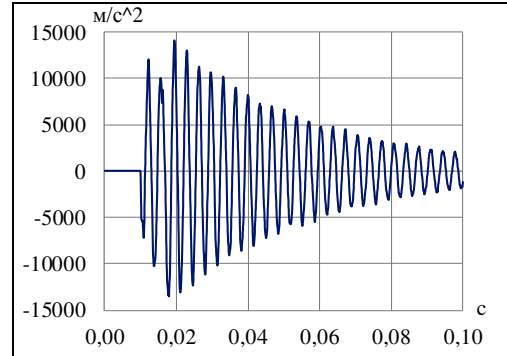


Рисунок 40 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 2 із відкритим верхом

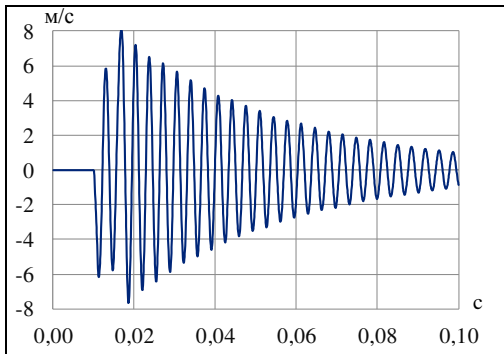


Рисунок 41 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із відкритим верхом

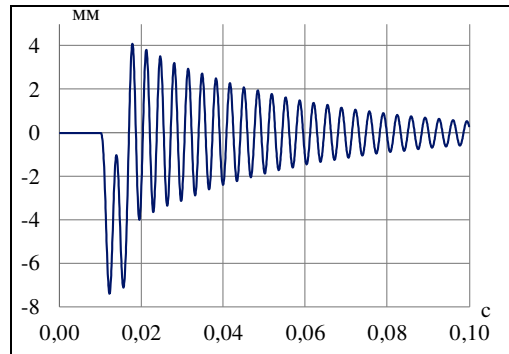


Рисунок 42 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із відкритим верхом

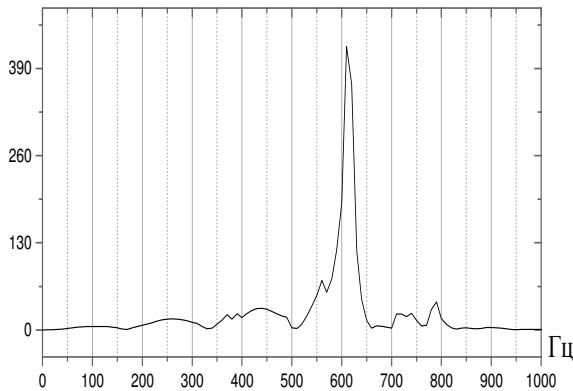


Рисунок 43 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 37

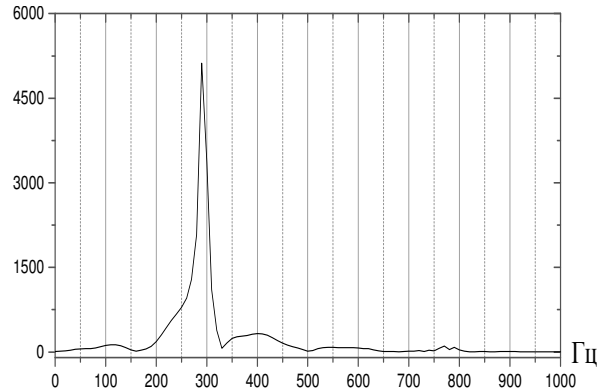


Рисунок 44 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 41

Інтегрування виконувалося для 0.1с, з 1000 кроками інтегрування у повній динамічній постановці.

Зокрема, на рис. 47, 48 наведено графік розподілу переміщень у часі у точці б із відсутньою «баштою» та перетворення Фур'є на основі



прискорень, показаних на рис. 45.

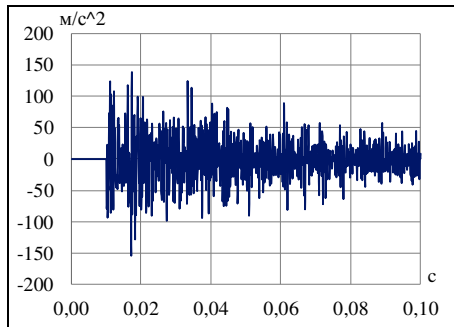


Рисунок 45 – Графік розподілу прискорень у часі у точці 6 із відкритим верхом

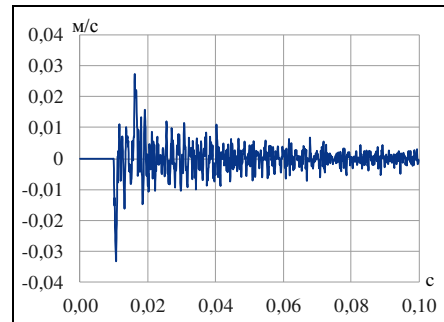


Рисунок 46 – Графік розподілу швидкостей у часі у точці 6 із відкритим верхом

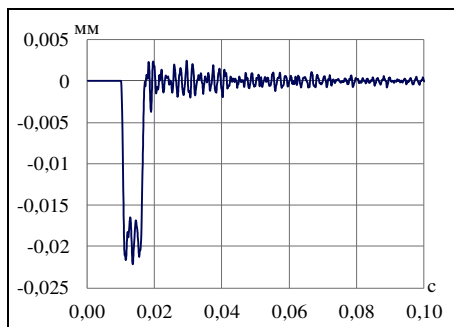


Рисунок 47 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 6 із відкритим верхом

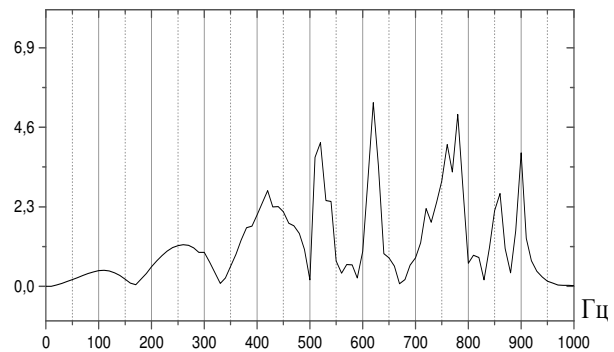


Рисунок 48 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 45

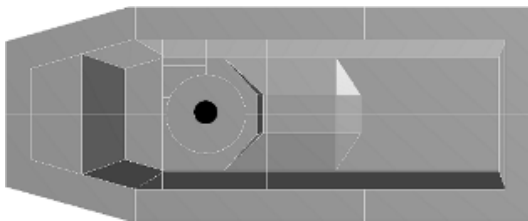


Рисунок 49 – Зображення, що відтворює моделювання башти

На наступному етапі досліджень фрагменту макету корпусу були виконані розрахунки з варійованою масою башти. У розрахунках башта була замінена плоским листом із подвійною товщиною. Лист з'єднано з корпусом макету сумісною скінченно-елементною сіткою. До місця розташування башти приєднувалася точкова маса (рис. 49). Усі інші

параметри розрахунку залишилися незмінними відносно попередніх розрахунків.

Для моделювання «башти» було зашито листом місце, де вона розташовується, а в центрі листа задана точкова маса для імітації бойового модуля (рис. 49). Аналізуючи результати (рис. 50–58), можна зробити висновок, що підбаштовий лист збільшив жорсткість корпусу в цілому, але додаткова маса також змінила і характер відгуку переміщень у корпусі макету.

На рис. 50–57 наведені переміщення та частотний спектр для точки 2, зазначеної на рис. 2, з різними варіантами моделювання башти, а саме: башта відсутня; місце під башту «зашито» листом; додаткова маса 1 кг та додаткова маса 2,5 кг.

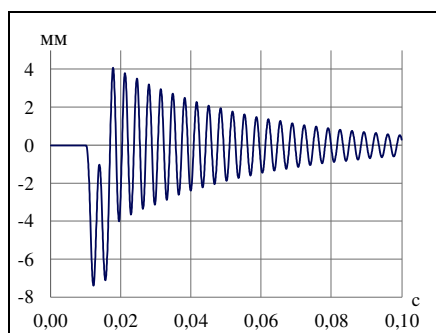


Рисунок 50 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із відсутньою баштою

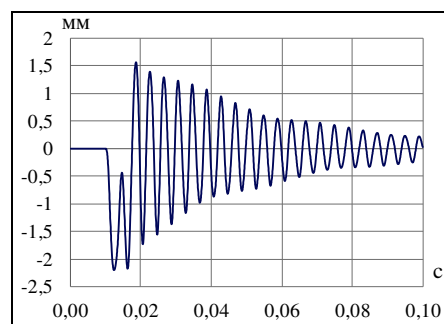


Рисунок 51 – Графік розподілу переміщень у часі у точці 2 із моделюванням підбаштового листа

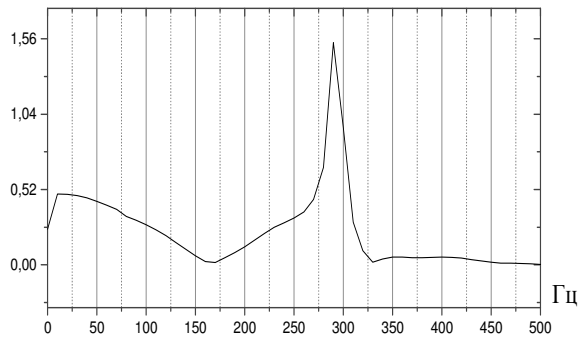


Рисунок 52 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 50

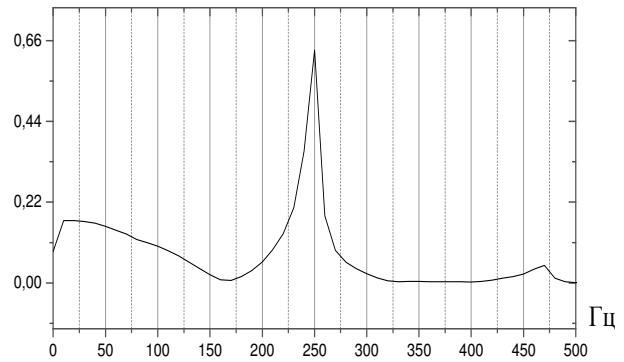


Рисунок 53 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 51

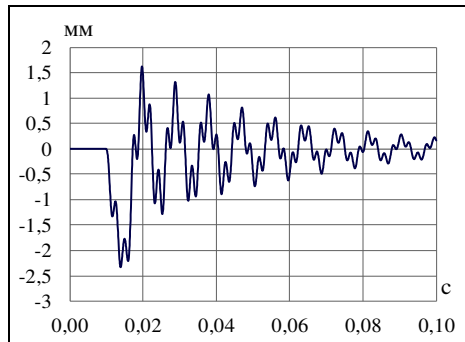


Рисунок 54 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 із моделюванням башти масою 1 кг

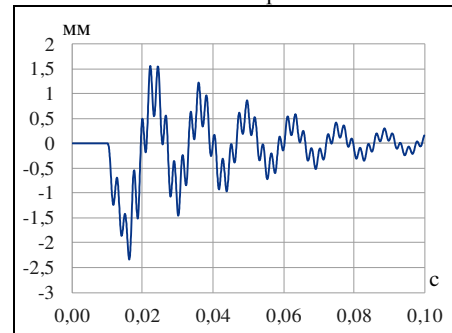


Рисунок 55 – Графік розподілу переміщень у часі в точці 2 із моделюванням башти масою 2,5 кг

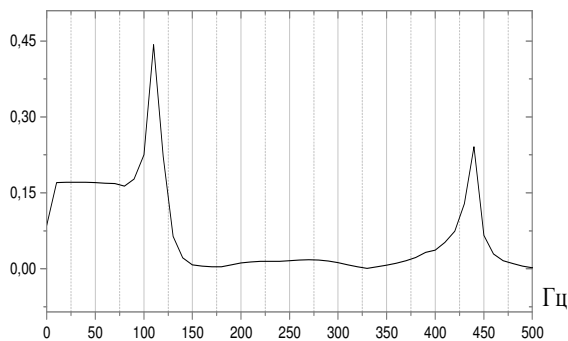


Рисунок 56 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 54

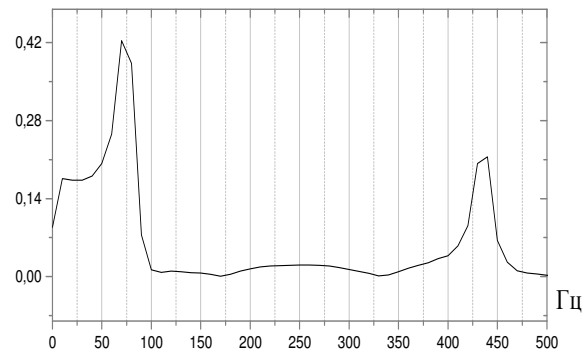


Рисунок 57 – Перетворення Фур'є функції, показаної на рис. 55

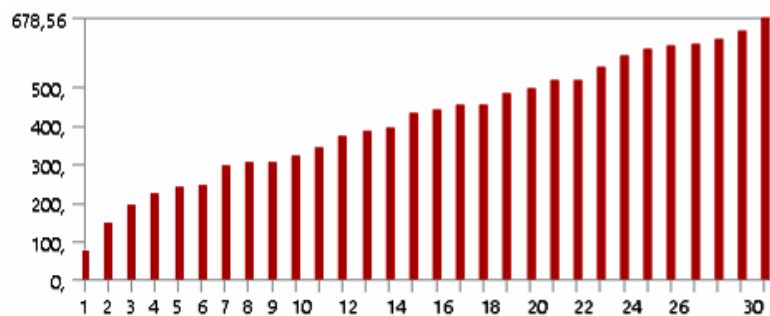


Рисунок 58 – Розраховані власні частоти коливань

Зокрема, порівнюючи графіки на рис. 50, 52 та 54, видно, що додаткова маса додала в систему «макет верхньої проекції – маса» коливальні процеси, які спостерігаються і при збільшеній масі (рис. 56).

Аналіз перетворень Фур'є показує невелику кількість власних частот коливань, причому

кількість власних частот приблизно однакова при різних експериментальних варіантах (відкритий верх, закритий верх та різні додаткові маси).

Аналогічні графіки були отримані для всіх точок, в тому числі – графіки швидкостей і переміщень. Чисельний аналіз власних форм показав результати, наведені на рис. 58 та у табл. 1.

Таблиця 1 – Розраховані власні форми коливань

№	Власна форма переміщень	№	Власна форма переміщень
1		3	
7		8	
14		20	

**Аналіз результатів розрахунково-експериментальних досліджень динамічних характеристик макета бронекорпуса.** У роботі наведено порівняння розрахункових та експериментальних результатів. Ці дослідження засвідчили задовільну відповідність цих результатів. Порівняння виконувалося за прискореннями, швидкостями та переміщеннями в контрольних точках, а також за перетворенням Фур'є. У роботі також було проаналізовано вплив маси башти на спектр власних коливань.

Дослідження засвідчили, що збільшення маси башти зменшує власні частоти системи.

Зафіксовані експериментально та розраховані ВЧК наведені на рис. 59.

Видно, що невідповідність ВЧК, отриманих, з одного боку, чисельно, а з іншого, – експериментально, незначна (на рівні 5%), рис. 59. Це свідчить про допустимість застосування для моделювання динамічного НДС бронекорпусів СЕМ, побудованих на скінченних елементах типу Shell. Таким чином, цю СЕМ можна використовувати як базу не тільки для дослідження макетів, а й для натурних зразків бронекорпусів ЛБМ.

На рис. 11–34 подані приклади віброграм, зафіксованих при імпульсному навантаженні макетів бронекорпусів, та оброблення їх аналізу. Аналіз цих віброграм, з одного боку, підтверджує власні частоти, виявлені в макеті чисельно (див. вище, рис. 58 та табл. 1), а з іншого, – дає можливість визначити величину демпфування, яке призводить до загасання динамічного процесу.

Ці часові розподіли служать як зразки при використанні скінченно-елементних моделей, що можуть створюватися в ході подальших досліджень, з точки зору їх адекватності та точності моделювання динамічних процесів.

**Висновки.** Здійснені розрахунково-

експериментальні дослідження власних частот і форм коливань на прикладі макета верхньої частини бронекорпуса БТР-80 дають можливість зробити наступні висновки.

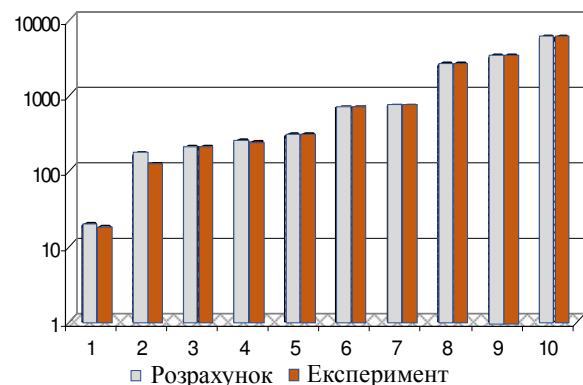


Рисунок 59 – Спектр власних частот коливань макета верхньої частини бронекорпуса (Гц, у логарифмічному масштабі), зареєстрований експериментальним шляхом і розрахований чисельно для деяких форм коливань моделі верхньої частини корпусу БТР-80

1. Розроблений та описаний у роботах [23, 24, 33, 34] програмно-модельний комплекс продемонстрував свою працездатність та здатність переналаштування на різні об'єкти досліджень. Зокрема, було побудовано модель макета верхньої проекції бронекорпуса БТР-80, яка у масштабі відтворює геометричну форму реальної конструкції. Побудована таким чином модель відрізняється від раніше побудованих та відомих тим, що варійованими є не тільки її розміри, але й структура. Це дає можливість варіювати цю модель та здійснювати дослідження впливу параметрів і структури на властивості досліджуваної конструкції, у цьому випадку – бронекорпуса ЛБМ.

2. Для визначення адекватності побудованих математичних і точності створених чисельних моделей здійснені розрахунково-експериментальні дослідження власних частот і власних форм коливань макета верхньої проекції бронекорпуса БТР-80. При цьому вони, з одного боку, чисельно визначалися, а, з іншого, – експериментально фіксувалися. Співставлення отриманих результатів дає підстави стверджувати, що побудовані моделі повністю якісно та задовільно кількісно відтворюють динамічні властивості досліджуваного макета (похибка за частотами – на рівні 5%). Це дає підстави для твердження про адекватність математичних і точність чисельних моделей, що створені у роботі, та про можливість їх застосування у подальших дослідженнях.

3. Варіювання густотою вузлів скінченно-елементних моделей дало можливість визначити параметри скінченно-елементних моделей, що задовольняють умовам точності чисельного моделювання динамічних процесів. Для бронекорпуса – це порядку 100 тис. елементів типу Shell. У подальшому моделі із такими характеристиками можуть бути використані для досліджень реальних конструкцій.

Комплекс розроблених моделей переданий для використання при розв'язанні прикладних задач обґрунтування конструктивно-технологічних рішень та параметрів низки тонкостінних корпусних конструкцій.

#### Список літератури

- Чепков І. Б., Нор П. І. Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2014. № 1. С. 4–13.
- Чепков І. Б. Основні напрями розвитку озброєння і військової техніки. Організаційні і економічні механізми державної підтримки оборонної промисловості. *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід*. К.: ТОВ «Міжнародний виставковий центр». 2015. С. 8–14.
- Основы военно-технических исследований. Теория и приложения: монография [в 4 т.]. Методология исследования сложных систем военного назначения. С. В. Лапицкий [и др.], ред.: С. В. Лапицкий. К. 2013. Т. 4. 417 с.
- Бойко Г. О., Бісик С. П. Деякі дані сучасного стану й тенденцій розвитку колісних бойових броньованих машин. *Озброєння та військова техніка: шокв. наук.-техн. журн. ЦНДІ ОВТ ЗСУ*. 2014. №3 (3). С. 20–24.
- Chung S. T. Effects of sensing capability on ground platform survivability during ground forces maneuver operations. *Naval Postgraduate School Monterey CA*. 2014. 127 p.
- Bisyk S.P., I.B. Chepkov, M.I. Vaskivskyy, L.S. Davydovskiy. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 1. С. 22–31
- Davydovskiy L., S. Bisyk, I. Hutov, I. Lilov, A. Kuprinenko, O. Yalynskiy. 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*, 2020, vol. 5, iss. 2, pp 45–47.
- Сливинський О.А., Бісик С.П., Чепков І.Б., Васильківський 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. Rudnits'kyi, S.P. Bisyk, L.S. Davydov's'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.
- Чепков І.Б. Використання передових наукових знань, технологічних розробок та інновацій для зміцнення обороноздатності держави та досягнення військової переваги у технологічній сфері. *Вісник Національної академії наук України*. 2021, №.6. С. 59–62
- Купріненко О. М. Бойові броньовані машини. Концептуальні основи проєктування: моногр. Львів: НАСВ. 2017. 198 с.
- Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хоменко В. П. Дослідження конструктивних особливостей та тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин типу MRAP. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 1. С. 7–19.
- Крайник Л. В., Грубель М. Г., Яльницький О. Д. Аналіз розвитку сучасних бойових колісних машин. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. № 1 (49). С. 126–131.
- Давидовський Л. С., Бісик С. П. Визначення напрямів підвищення захищеності бойових броньованих машин на основі аналізу бойових уражень. *ЦНДІ ОВТ ЗСУ / ЦНДІ ОВТ ЗС України*. К.: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2018. Вип. 1 (68). С. 45–54.
- Бісик С. П., Чепков І. Б., Васильківський М. І. та ін. Теоретична оцінка протимінної стійкості багатоцільового тактичного автомобіля «Козак-2». *Озброєння та військова техніка: шокв. наук.-техн. журн. ЦНДІ ОВТ ЗСУ*. 2016. № 1 (9). С. 26–31.
- Черняк Р. Є., Дунь С. В., Кайдалов Р. О. Погодження єдиних вимог до рівня балістичного захисту колісних броньованих машин. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні*. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. Тези доп. Київ: ДНУ УкрІНТЕІ. 2017. С. 209–210.
- 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.
- Бісик С. П., Чепков І. Б., Голуб В. А. та ін. Дослідження вибухового навантаження V подібної моделі днища бойової машини. *ЦНДІ ОВТ ЗСУ*. Збірник наук. праць. К.: ЦНДІ ОВТ. 2012. Вип. 1 (22). С. 232–240.
- Васильев А. Ю., Танченко А. Ю., Ткачук М. М. та ін. Обґрунтування структури та параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин за критеріями захищеності. *Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу*. Інформаційно-комунікативний захід. Київ: ТОВ «Міжнародний виставковий центр». 2016. С. 32–36.
- Литвиненко А. В. Общій подход к проектно-технологическому обеспечению тактико-технических характеристик военных колесных и гусеничных машин путем обоснования параметров бронекорпусов по критериям прочности и защищенности. *Вісник НТУ «Харківський Політехнічний Інститут»: Серія: Машинознавство та САПР*. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 29 (1072). С. 68–77.
- Волонцевич Д. О., Воронцов С. М., Мормило Я. М. та ін. Підвищення прохідності колісних машин та вирівнювання ресурсу агрегатів трансмісії шляхом введення статичного дисбалансу розподілу ваги між мостами. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2015. №1. С. 24–34.
- Душенко В. В., Ярмак М. С., Маслів А. О. та ін. Методика розрахунку динамічної навантаженості гідропневматичної підвіски колісної легкоброньованої машини. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. №1. С. 75–80.
- Ткачук Н. А., Рикунів О. Н., Танченко А. Ю. та др. Влияние массово-инерционных характеристик боевого модуля, бронекорпуса и подвески на динамические процессы при осуществлении стрельбы. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 1. С. 83–91.
- Ткачук М. А., Набоков А. В., Грабовський А. В. та ін. Аналіз реакції тестових просторових конструкцій корпусів легкоброньованих машин на дію серії імпульсів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2020. № 2. С. 117–139.
- Ткачук Н. А., Веретенников А. И., Грабовский А. В. Ударные резонансы в бронекорпусах военных гусеничных и колесных машин при осуществлении стрельбы. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 3. С. 137–144.
- Литвиненко А. В., Вакулєнко В. В., Ткачук Н. А. та др. Оценка чувствительности прочностных, жесткостных и динамических характеристик бронекорпусов на варьирование проектно-технологических параметров. *Інтегровані технології та енергозбереження*. Харків: НТУ «ХПІ». 2014. № 3. С. 145–153.
- Ткачук М., Литвиненко О., Грабовський А. В. Обґрунтування проектно-технологічних рішень для забезпечення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин. *Теорія*

- та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Тези доповідей. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2014. С. 7–8.
28. Ткачук М. А., Литвиненко О. В., Грабовський А. В. Науковий супровід проєктно-технологічних розробок задля забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Тези доповідей. Інформаційно-комунікативний захід. К.: ТОВ «Міжнародний виставковий центр».* 2015. С. 61–65.
  29. Математичні моделі напружено-деформованого стану елементів бойових машин та технологічних систем для їх виготовлення / М. А. Ткачук, О. В. Хлань, А. В. Грабовський, А. В. Заворотній, [та ін.] // *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Машинознавство та САПР.* 2018. № 7 (1283). С. 121–131. [http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018\\_7.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2018_7.pdf)
  30. The Army's Ground Combat Vehicle Program and Alternatives. Congressional Budget office. 2013. 42 p. April. URL: <http://www.cbo.gov/publication/44044>.
  31. Feickert A. Selected Foreign Counterparts of US Army Ground Combat Systems and Implications for Combat Operations and Modernization. *Congressional Research Service Washington United States.* 2017. 30 p.
  32. Kempinski B., Murphy C. Technical Challenges of the US Army's Ground Combat Vehicle. *Program Congressional Budget Office (US Congress). Washington DC.* 2012. Working Paper 2012-15. 66 p. Режим доступу: <https://www.cbo.gov/publication/43699>.
  33. Грабовський А. В., Ткачук М. А., Шуть О. Ю. та ін. Аналіз тенденцій параметрів корпусів транспортних засобів спеціального призначення на власні частоти і форми коливань. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* 2020. № 1. С. 19–27.
  34. Ткачук Н. А., Заворотній А. В., Грабовський А. В. и др. Анализ чувствительности вибрационных характеристик бронекорпусов к изменению проектно-технологических параметров. *Механика та машинобудування. Харків: НТУ «ХПИ».* 2017. № 1. С. 38–46.
  35. Borkowski W. et al. The research on dynamic loads and traction properties of military vehicles in the aspect of improvement of their structures. *Journal of KONES Powertrain and Transport.* 2015. Vol. 22. Iss. 1. P. 37–46.
  36. Polat Şendur Özcan M. Umut. The Modelling and Correlation Procedure for Assessment of Vibration Performance of a Heavy Commercial Truck. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies.* 2017. Vol. 6, iss. 1. P. 48–60.
  37. Chakraverty S. Behera Laxmi Free vibration of rectangular nanoplates using Rayleigh-Ritz method. *Physica E.* 2014. Vol. 56. P. 357–363.
  38. Senjanović I., Alujević N., Čatipović I. at all. Vibration analysis of rotating toroidal shell by the Rayleigh-Ritz method and Fourier series. *Engineering Structures.* 2018. 173. P. 870–891.
  39. Datta N., Thekinen J. D. A Rayleigh-Ritz based approach to characterize the vertical vibration of non-uniform hull girder. *Ocean Engineering.* 2016. 125. P. 113–123.
  40. Haichao L., Fuzhen P., Xuhong M. at all. Jacobi-Ritz method for free vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells with arbitrary boundary conditions: A unified formulation. *Computers & Mathematics with Applications.* 2019. Vol. 77, iss. 2. P. 427–440.
  41. Haichao Lia, Fuzhen Panga, Xuhong Miaoa A semi-analytical method for vibration analysis of stepped doubly-curved shells of revolution with arbitrary boundary conditions. *Thin-Walled Structures.* 2018. Vol. 129. P. 125–144.
  42. Kyeong-HoonJeong, Myung-JoJhung Free vibration analysis of partially perforated circular plates. *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 199. P. 182–187.
  43. Shia D., Liua T., Wangb Q. at all. Vibration analysis of arbitrary straight-sided quadrilateral plates using a simple first-order shear deformation theory. *Results in Physics.* 2018. 11. P. 201–211.
  44. HyunWook L., Kwak Moon K. Free vibration analysis of a circular cylindrical shell using the Rayleigh-Ritz method and comparison of different shell theories. *Journal of Sound and Vibration.* 2015. Vol. 353. P. 344–377.
  45. Oliveri V., Milazzo A. A Rayleigh-Ritz approach for postbuckling analysis of variable angle tow composite stiffened panels. *Computers & Structures.* 2018. Vol. 196. P. 263–276.
  46. Wei S., Mingwei Z., Zhuo W. Free vibration analysis of a hard-coating cantilever cylindrical shell with elastic constraints. *Aerospace Science and Technology.* 2017. Vol. 63. P. 232–244. doi:10.1016/j.ast.2017.01.002.
  47. Peter S., Schreyer F., Leine R. I. A method for numerical and experimental nonlinear modal analysis of nonsmooth systems. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 2019. Vol 120. P. 793–807. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.009>.
  48. Zieliński T. G., Chevillotte F., Deckers E. Sound absorption of plates with micro-slits backed with air cavities: Analytical estimations, numerical calculations and experimental validations. *Applied Acoustics.* 2019. Vol. 146. P. 261–279.
  49. 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.
  50. Ткачук М. А., Хлань О. В., Грабовський А. В. и др. Разработка математического аппарата для решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов механических систем. *Вестник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* Харків: НТУ «ХПИ». 2017. № 12(1234). С. 110–131.
  51. Малакей А. М., Грабовський А. В., Ткачук Г. В. та ін. Чисельні та експериментальні дослідження динаміки макету бронекорпусу легкоброньованої машини. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* Харків: НТУ «ХПИ». 2020. № 1. С. 49–60. doi:10.20998/2079-0775.2020.1.07
  52. Литвиненко О., Ткачук М., Грабовський А. Різномірні моделі для дослідження міцності та жорсткості бронекорпусів легкоброньованих машин: фрагмент, макет, натурний об'єкт. *11-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей.* Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2013. С. 76–77.
  53. Zienkiewicz O., Taylor R., Zhu J. Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th Edition. Butterworth-Heinemann. 2013. 756p.

#### References (transliterated)

1. Chepkov I. B., Nor P. I. Zagal'ni tendenciyi rozvy'tku ozbroynnyya ta vijs'kovoyi texnyky. *Ozbroynnyya ta vijs'kova texnika.* 2014, no. 1, pp. 4–13
2. Chepkov I. B. Osnovni napryamy` rozvy'tku ozbroynnyya i vijs'kovoyi texnyky. Organizacijni i ekonomichni mexanizmy` derzhavnoyi pidtry`mkyy` oboronnoyi promy'slovosti. *Perspekty`vy` naukovo-texnologichnogo zabezpechennya oboronno-promy'slovoogo kompleksu Ukrainy`:* Informacijno-komunikaty`vny`j zaxid. K.: TOB «Mizhnarodny`j vy`stavkovy`j centr». 2015, pp. 8–14.
3. *Osnovy voenno-tehnicheskikh issledovaniy. Teoriya i prilozheniya: monografiya [v 4 t.]. Metodologiya issledovaniya slozhnyih sistem voennogo naznacheniya.* C. B. Lapitskiy [i dr.]. red.: S. V. Lapitskiy. K. 2013. T. 4. 417 p.
4. Bojko G. O., Bisyk S. P. Deyaki dani suchasnogo stanu j tendencij rozvy'tku kolisny`x bojovy`x bron`ovany`x mashyn. *Ozbroynnyya ta vijs'kova texnika:* shhokv. nauk.-texn. zhurn. CzNDI OVT ZSU. 2014, no.3 (3), pp. 20–24.
5. Chung S. T. Effects of sensing capability on ground platform survivability during ground forces maneuver operations. *Naval Postgraduate School Monterey CA.* 2014. 127 p.
6. Bisyk S.P., I.B. Chepkov, M.I. Vaskivskyy, L.S. Davydovskiy. Methods for modelling Air blast on structures in LS-DYNA. Comparison and analysis. *Ozbroynnyya ta vijs'kova texnika,* 2019, no. 1, pp. 22–31
7. Davydovskiy L., S. Bisyk, I. Hutov, I. Lilov, A. Kuprinenko, Yalnytyskiy O. 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,* 2020, vol. 5, iss. 2, pp 45–47.
8. Slyvins'kyj O.A., Bisyk S.P., Chepkov I.B., Vas'kivs'kyj M.I., Chernozubenko O.V. Problemy` vy`gotovlennya zvarny`x bronekorpusiv vitchy`znyany`x bojovy`x bron`ovany`x mashyn. *Ozbroynnyya ta vijs'kova texnika,* 2017, no.4, pp. 29–38
9. Katok O.A., R.V. Kravchuk, V.V. Kharchenko, M.P. Rudnits'kyi, S.P. Bisyk, L.S. Davydov's'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.
10. Chepkov I.B. Vy`kory`stannya peredovy`x naukovy`x znan`,



- tehnologichny`x rozrobok ta innovacij dlya zmichennya oboronozdatnosti derzhavy` ta dosyagnennya vijs`kovoyi perevagy` u tehnologichnij sferi. *Visny`k Nacional`noyi akademiyi nauk Ukrainy`*, 2021, no. 6, pp. 59–62
11. Kuprinenko O. M. Bojovi bron`ovani mashy`ny`. *Konceptual`ni osnovy` proektuvannya: monogr.* L`viv: NASV, 2017. 198 p.
  12. Grubel` M. G., Krajny`k L. V., Xomenko V. P. Doslidzhennya konstrukty`vny`x osobly`vostej ta takty`ko-texnichny`x karaktery`sty`k bojovy`x bron`ovany`x mashy`n ty`pu MRAP. *Sy`stemy` ozbroynennya i vijs`kova texnika.* 2018, no. 1, pp. 7–19.
  13. Krajny`k L. V., Grubel` M. G., Yal`ny`cz`ky`j O. D. Analiz rozvy`tku suchasny`x bojovy`x kolisny`x mashy`n. *Sy`stemy` ozbroynennya i vijs`kova texnika.* 2017, no. 1 (49), pp. 126–131.
  14. Davy`dovs`ky`j L. PP., Bisy`k PP. P. Vy`znachennya napryamiv pidvy`shhennya zaxy`shhenosti bojovy`x bron`ovany`x mashy`n na osnovi analizu bojovy`x urazhen`. *CzNDI OVT ZSU / CzNDI OVT ZS Ukrainy`*. K.: CzNDI OVT ZS Ukrainy`. 2018, vol. 1 (68), pp. 4–54.
  15. Bisy`k PP. P., Chepkov I. B., Vas`kivs`ky`j M. I. ta in. Teorety`chna ocinka proty`minnoyi stijkosti bagatocil`ovogo takty`chnogo avtomobilya «Kozak-2». *Ozbroynennya ta vijs`kova texnika* : shhokv. nauk.-texn. zhurn. CzNDI OVT ZSU. 2016, no.1 (9), pp. 26–31.
  16. Chernyak R. Ye., Dun` PP. V., Kajdalov R. O. Pogodzhennya yedy`ny`x vy`mog do rivnya balisty`chnogo zaxy`stu kolisny`x bron`ovany`x mashy`n. Problemy` koordy`nacyi voyenno-texnichnoyi ta oboronno-promy`slovyoi polity`ky` v Ukraini. *Perspekty`vy` rozvy`tku ozbroynennya ta vijs`kovoyi tekhniki`*: V mizhn. nauk.-prakt. konf. Tezy` dop. Ky`yiv : DNU UkrINTEI. 2017, pp. 209–210.
  17. Bisy`k PP. P. Pidxid do ocinky` proty`minnoyi stijkosti korpusiv bojovy`x bron`ovany`x mashy`n z uraxuvanniam zvarny`x z`yednan`. *Nauka i texnika Povitryany`x Sy`l ZS Ukrainy`*. XNUPS im. Kozheduba. 2017, vol. 3 (28), pp. 121–127.
  18. Bisy`k PP. P., Chepkov I. B., Golub V. A. ta in. Doslidzhennya vy`buxovogo navantazhennya V podibnoyi modeli dny`shha bojovoyi mashy`ny`. CzNDI OVT ZSU. Zbirny`k nauk. prac`. K.: CzNDI OVT. 2012, vol. 1 (22), pp. 232–240.
  19. Vasy`l`yev A. Yu., Tanchenko A. Yu., Tkachuk M. M. ta in. Obg`runtuvannya struktury` ta parametriv bronekorpusiv legkobron`ovany`x mashy`n za kry`teriyamy` zaxy`shhenosti. *Nauka: bezpeka krayiny` ta rozvy`tok vijs`kovo-promy`sloвого kompleksu. Informacijno-komunikaty`vny`j zaxid.* Ky`yiv: TOV «Mizhnarodny`j vy`stavkovy`j centr». 2016, pp. 32–36.
  20. Ly`tvynenko A. V. Obshhy`j podxid k proekto-texnologiy`cheskomu obespecheny`yu takty`ko-texny`chesky`x karaktery`sty`k voennyx koleznyx y` gusenychnyx mashy`n putem obosnovany`ya parametrov bronekorpusov po kry`tery`yam prochnosti` y` zashhy`shhennosti`. *Visny`k NTU «Kharkivs`ky`j Politehnicny`j Insty`tut»: Seriya: Mashy`noznavstvo ta SAPR.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2014, no. 29 (1072), pp. 68–77.
  21. Voloncev`ch D. O., Voroncov PP. M., Mormy`lo Ya. M. ta in. Pidvy`shhennya proxidnosti kolisny`x mashy`n ta vy`rivnyuvannya resursu agregativ transmisii shlyaxom vvedennya staty`chnogo dy`sbalansu rozpodilu vagy` mizh mostamy`. *Mexanika ta mashy`nobuduvannya.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2015, no. 1, pp. 24–34.
  22. Dushhenko V. V., Yarmak M. PP., Masliyev A. O. ta in. Metody`ka rozraxunku dy`namichnoyi navantazhenosti gidropnevmaty`chnoyi pidvisky` kolisnoyi legkobron`ovanyoi mashy`n. *Mexanika ta mashy`nobuduvannya.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2018, no. 1, pp. 75–80.
  23. Tkachuk N. A., Rikunov O. N., Tanchenko A. Yu. i dr. Vliyanie massovo-inertsionnyh karakteristik boevogo modulya, bronekorpusa i podveski na dinamicheskie protsessy pri osuschestvlenii strelbyi. *Mehanika ta mashinobuduvannya.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2014, no. 1, pp. 83–91.
  24. Tkachuk M. A., Nabokov A. V., Grabovs`ky`j A. V. ta in. Analiz reakcii testovyy`x prostorovy`x konstrukcij korpusiv legkobron`ovany`x mashy`n na diyu seriyi impul`siv. *Visny`k NTU «Kharkivs`ky`j Politehnicny`j Insty`tut»: Seriya: Mashy`noznavstvo ta SAPR.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2020, no. 2, pp. 117–139.
  25. Tkachuk N. A., Veretennikov A. I., Grabovskiy A. V. Udarnye rezonansy v bronekorpusah voennyh gusenichnyh i koleznyh mashin pri osuschestvlenii strelbyi. *Integrovani tekhnologii ta energoberezhennya.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2014, no. 3, pp. 137–144.
  26. Litvinenko A. V., Vakulenko V. V., Tkachuk N. A. i dr. Otsenka chuvstvitelnosti prochnostnyh, zhestkostnyh i dinamiceskikh karakteristik bronekorpusov na varirovanie proekto-tehnologicheskikh parametrov. *Integrovani tekhnologii ta energoberezhennya.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2014, no. 3, pp. 145–153.
  27. Tkachuk M., Ly`tvynenko O., Grabovs`ky`j A. V. Obg`runtuvannya proekto-texnologichny`x rishen` dlya zabezpechennya takty`ko-texny`chny`x karaktery`sty`k legkobron`ovany`x mashy`n. *Teoriya ta prakty`ka racional`nogo proektuvannya, vy`gotovlennya i ekspluatatsiyi mashy`nobudivny`x konstrukcij: Tezy` dopovidej.* L`viv: KINPATRI LTD. 2014, pp. 7–8.
  28. Tkachuk M. A., Ly`tvynenko O. V., Grabovs`ky`j A. V. Naukovy`j suprovid proekto-texnologichny`x rozrobok zadlya zabezpechennya takty`ko-texnichny`x karaktery`sty`k bojovy`x bron`ovany`x mashy`n. *Perspekty`vy` naukovo-texnologichnogo zabezpechennya oboronno-promy`sloвого kompleksu Ukrainy`*: Tezy` dopovidej. Informacijno-komunikaty`vny`j zaxid. K.: TOV «Mizhnarodny`j vy`stavkovy`j centr». 2015, pp. 61–65.
  29. Matematy`chni modeli napruzhenno-deformovanogo stanu elementiv bojovy`x mashy`n ta tehnologichny`x sy`stem dlya yix vy`gotovlennya / M. A. Tkachuk, O.V. Xlan`, A.V. Grabovs`ky`j, A. V. Zavorotnij, [ta in.]// *Visny`k NTU «Kharkivs`ky`j Politehnicny`j Insty`tut»: Seriya: Mashy`noznavstvo ta SAPR.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2018, no. 7 (1283), C. 121–131.
  30. The Army's Ground Combat Vehicle Program and Alternativepp. Congressional Budget office. 2013, 42 p. April. URL: <http://www.cbo.gov/publication/44044>.
  31. Feickert A. Selected Foreign Counterparts of US Army Ground Combat Systems and Implications for Combat Operations and Modernization. *Congressional Research Service Washington United Statepp.* 2017. 30 p.
  32. Kempinski B., Murphy C. Technical Challenges of the US Army's Ground Combat Vehicle. Program Congressional Budget Office (US Congress). Washington DC. 2012. *Working Paper 2012-15.* 66 p. <https://www.cbo.gov/publication/43699>.
  33. Grabovs`ky`j A. V., Tkachuk M. A., Shut` O. Yu. ta in. Analiz tendencyi parametriv korpusiv transportny`x zasobiv special`nogo pry`znachennya na vlasni chastyot` i formy` koly`van`. *Visny`k NTU «Kharkivs`ky`j Politehnicny`j Insty`tut»: Seriya: Mashy`noznavstvo ta SAPR.* Kharkiv: NTU «KhPI». 2020, no. 1, pp. 19–27.
  34. Tkachuk N. A., Zavorotnij A. V., Grabovskiy A. V. i dr. Analiz chuvstvitelnosti vibratsionnyh karakteristik bronekorpusov k izmeneniyu proekto-tehnologicheskikh parametrov. Mexanika ta mashy`nobuduvannya. Kharkiv: NTU «KhPI». 2017, no. 1, pp. 38–46.
  35. Borkowski W. et al. The research on dynamic loads and traction properties of military vehicles in the aspect of improvement of their structurepp. *Journal of KONES Powertrain and Transport.* 2015, vol. 22, iss. 1, pp. 37–46.
  36. Polat Şendur Özcan M. Umüt. The Modelling and Correlation Procedure for Assessment of Vibration Performance of a Heavy Commercial Truck. *International Journal of Automotive Engineering and Technologiapp.* 2017, vol. 6, iss. 1, pp. 48–60.
  37. Chakraverty PP. Behera Laxmi Free vibration of rectangular nanoplates using Rayleigh-Ritz method. *Physica E.* 2014, vol. 56, pp. 357–363.
  38. Senjanović I., Alujević N., Čatipović I. at all. Vibration analysis of rotating toroidal shell by the Rayleigh-Ritz method and Fourier seriepp. *Engineering Structurepp.* 2018, vol. 173, pp. 870–891.
  39. Datta N., Thekinen J. D. A Rayleigh-Ritz based approach to characterize the vertical vibration of non-uniform hull girder. *Ocean Engineering.* 2016, vol. 125, pp. 113–123.
  40. Haichao L., Fuzhen P., Xuhong M. at all. Jacobi-Ritz method for free vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells with arbitrary boundary conditions: A unified formulation. *Computers & Mathematics with Applicationpp.* 2019, vol. 77, iss. 2, pp. 427–440.
  41. Haichao Lia, Fuzhen Panga, Xuhong Miaoa A semi-analytical method for vibration analysis of stepped doubly-curved shells of revolution with arbitrary boundary conditionpp. *Thin-Walled Structurepp.* 2018, vol. 129, pp. 125–144.
  42. Kyeong-HoonJeong, Myung-JoJhung Free vibration analysis of partially perforated circular platepp. *Procedia Engineering.* 2017, vol. 199., pp. 182–187.

43. Shia D., Liua T., Wangb Q. at all. Vibration analysis of arbitrary straight-sided quadrilateral plates using a simple first-order shear deformation theory. *Results in Physicpp*. 2018, vol. 11, pp. 201–211.
44. HyunWook L., Kwak Moon K. Free vibration analysis of a circular cylindrical shell using the Rayleigh-Ritz method and comparison of different shell theoriepp. *Journal of Sound and Vibration*. 2015, vol. 353, pp. 344–377.
45. Oliveri V., Milazzo A. A Rayleigh-Ritz approach for postbuckling analysis of variable angle tow composite stiffened panelpp. *Computers & Structurepp*. 2018, vol. 196, pp. 263–276.
46. Wei PP., Mingwei Z., Zhuo W. Free vibration analysis of a hard-coating cantilever cylindrical shell with elastic constraintpp. *Aerospace Science and Technology*. 2017, vol. 63, pp. 232–244.
47. Peter PP., Schreyer F., Leine R. I. A method for numerical and experimental nonlinear modal analysis of nonsmooth systempp. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, vol. 120, pp. 793–807. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.009>.
48. Zieliński T. G., Chevillotte F., Deckers E. Sound absorption of plates with micro-slits backed with air cavities: Analytical estimations, numerical calculations and experimental validationpp. *Applied Acousticpp*. 2019, vol. 146, pp. 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.026>
49. Grabovs'kyj A. V., Tkachuk M. A., Bondarenko M.O. ta in. Rozrakhunkovo-eksperymental'ni doslidzhennya dy'namichny'x karaktery'styk modeli maketu bronekorpusu. *Visnyk NTU «Kharkiv's'kyj Politehnychnyj Instytut»: Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2019, no. 7 (1332), pp. 47–54. doi:10.20998/2079-0775.2019.7.08.
50. Tkachuk M. A., Hlan O. V., Grabovskiy A. V. i dr. Razrabotka matematicheskogo apparata dlya resheniya zadach raschetno-eksperimentalnogo issledovaniya elementov mehanicheskikh sistem. *Visnyk NTU «Kharkiv's'kyj Politehnychnyj Instytut»: Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2017, no.12(1234), pp. 110–131.
51. Malakej A. M., Grabovs'kij A. V., Tkachuk G.V. ta in. Chisel'ni ta eksperimental'ni doslidzhennya dynamiki maketu bronekorpusu legkobron'ovanoi mashini. *Visnyk NTU «Kharkiv's'kyj Politehnychnyj Instytut»: Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2020, no. 1, pp. 49–60. doi:10.20998/2079-0775.2020.1.07
52. Ly'tvy'nenko O., Tkachuk M., Grabovs'kyj A. Riznorivnevi modeli dlya doslidzhennya micznosti ta zhorstkosti bronekorpusiv legkobron'ovany'x mashyn: fragment, maket, naturny'j ob'yekt. *11-j Mizhnarodny'j sy'mpozium ukrajin's'ky'x inzheneriv-mexanikiv u L'vovi: Tezy' dopovidej. L'viv: KINPATRI LTD*, 2013. P. 76–77.
53. Zienkiewicz O., Taylor R., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentalpp*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann. 2013. 756 p.

Надійшла (received) 12.01.2022

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey)** – кандидат 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.

**Васильєв Антон Юрійович (Васильев Антон Юрьевич, 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: <http://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; тел.: (057)7076166, e-mail: AVasiliiev@tmm-sapr.org.

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

**Волюшина Ірина Олександрівна (Волюшина Ирина Александровна, Voloshyna Iryna)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка гр. МІТ-218м, м. Харків, Україна; e-mail: s1802@tmm-sapr.org

**Льозний Олег Сергійович (Лезный Олег Сергійович, Loznyi Oleg)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент гр. МІТ-М221м, м. Харків, Україна; e-mail: s1708@tmmsapr.org

**Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, 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: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; тел.: (057) 707-69-02; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

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

**Кохановська Ольга Владиславівна (Кохановская Ольга Владиславовна, Kokhanovska Olga)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний інженер кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин»; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076901; e-mail: olgavk12@gmail.com

**Пелешко Євген Віталійович (Пелешко Евгений Витальевич, Peleshko Yevhen)** – кандидат технічних наук, ТОВ «Хей Інжиніринг ЮА», інженер-конструктор (механіка); м. Харків, Україна; тел. +38 (068) 605-44-42; e-mail: peleshko@gmail.com

**Набоков Анатолій Володимирович (Набоков Анатолий Владимирович, 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

**Троценко Володимир Володимирович (Троценко Владимир Владимирович, 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