

*А. М. МАЛАКЕЙ, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, Г. В. ТКАЧУК, А. В. НАБОКОВ, М. А. ТКАЧУК,
О. С. ЛЬОЗНИЙ, О. С. ГОЛТВЯНИЦЯ*

ЧИСЕЛЬНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МАКЕТУ БРОНЕКОРПУСУ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ МАШИНИ

Для побудови чисельної моделі динамічних процесів у бронекорпусі легкоброньованої машини досліджено макет його верхньої проекції. Паралельно здійснено його чисельне та експериментальне дослідження. Визначено власні частоти і власні форми коливань макету. Також визначено його реакцію на імпульсне збудження. На цій основі встановлено параметри скінченно-елементної моделі, які забезпечують задовільну точність чисельного моделювання динамічного напружено-деформованого стану макета та натурального зразка бронекорпуса легкоброньованої машини.

Ключові слова: бронекорпус; легкоброньована машина; власна частота коливань; власна форма коливань; імпульсне збудження; метод скінченних елементів; макет; розрахунково-експериментальний метод

*А. Н. МАЛАКЕЙ, А. В. ГРАБОВСКИЙ, А. В. ТКАЧУК, А. В. НАБОКОВ, Н. А. ТКАЧУК,
О. С. ЛЕЗНЫЙ, О. С. ГОЛТВЯНИЦЯ*

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МАКЕТА БРОНЕКОРПУСА ЛЕГКОБРОНИРОВАННОЙ МАШИНЫ

Для построения численной модели динамических процессов в бронекорпусе легкобронированной машины исследован макет его верхней проекции. Параллельно осуществлено его численное и экспериментальное исследование. Определены собственные частоты и собственные формы колебаний макета. Также определено его реакцию на импульсное возбуждение. На этой основе установлены параметры конечно-элементной модели, обеспечивающей удовлетворительную точность численного моделирования динамического напряженно-деформированного состояния макета и натурального образца бронекорпуса легкобронированной машины.

Ключевые слова: бронекорпус; легкобронированная машина; собственная частота колебаний; собственная форма колебаний; импульсное возбуждение; метод конечных элементов; макет; расчетно-экспериментальный метод

*A. MALAKEI, A. GRABOVSKIY, G. TKACHUK, A. NAVOKOV, M. TKACHUK,
O. LOZNYI, O. HOLTIVANYTSIA*

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF DYNAMICS OF ARMORED HULL SCALE MODEL OF LIGHT ARMORED VEHICLES

To build a numerical model of dynamic processes in armored hull of lightly armored vehicle, the scale model of its upper projection was studied. Its numerical and experimental research was carried out in parallel. The natural frequencies and natural forms of oscillations of the scale model are determined. Its response to impulse excitation is also determined. On this basis, the parameters of the finite element model are established, which provide satisfactory accuracy of numerical modeling of the scale model dynamic stress-strain state and a full-scale sample of the armored hull of lightly armored vehicle.

Keywords: armored hull; lightly armored vehicle; natural frequency of oscillations; natural form of oscillations; impulse excitation; finite element method; scaled model; numerical and experimental method

Вступ. Сучасні легкоброньовані машини (ЛБМ) у ході експлуатації та бойового застосування підлягають дії низки динамічних впливів. Це, зокрема, зусилля від підвіски у процесі руху на місцевості, реактивні зусилля при здійсненні пострілів із власного озброєння, збудження від двигуна тощо. Отже, у ході проектних досліджень необхідно здійснювати аналіз динамічного напружено-деформованого стану (НДС) бронекорпуса як основного елемента ЛБМ задля забезпечення заданих характеристик його міцності та жорсткості. В основному для цього використовується метод скінченних елементів (МСЕ). Тому слід визначати такі параметри скінченно-елементних моделей, які дають прийнятну точність моделювання НДС подібного типу конструкцій. Для цього у роботі пропонується варіант розрахунково-експериментального методу досліджень із залученням макета бронекорпуса.

Аналіз існуючих методів досліджень бронекорпусів легкоброньованих машин. Розвиткові конструкцій та бойових можливостей сучасних легкоброньованих машин приділяється значна увага в Україні та світі [1–7]. Зокрема, відзначається зростання потужності озброєння, швидкості пересуван-

ня, маневреності тощо. Це спричиняє зростання динамічних навантажень, особливо на бронекорпусі ЛБМ. Для моделювання динамічних процесів у корпусах та інших елементах легкоброньованих машин широко застосовуються різноманітні аналітичні, чисельні та експериментальні методи [8–12].

Проте існуючі методи та моделі не покривають усі проблемні аспекти досліджень. Зокрема, це стосується методів та моделей для аналізу власних частот і власних форм коливань тонкостінних конструкцій [13–17]. Також не вирішують повністю поставленої проблеми певні комбінації аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень [18–20]. Разом із тим якраз розрахунково-експериментальні дослідження дають можливість досягати все більшої адекватності моделей, точності результатів, достовірності та обґрунтовності рекомендацій на основі проектних досліджень [21, 22]. На розвиток цього напрямку і спрямована ця робота.

© А. М. Малакей, А. В. Грабовський,
Г. В. Ткачук, А. В. Набоков, М. А. Ткачук,
О. С. Льозний, О. С. Голтвяниця, 2020

Постановка задач досліджень. У роботі розглядаються дві складові досліджень бронекорпусів легкоброньованих машин:

- чисельне моделювання методом скінченних елементів;
- експериментальне дослідження макетів бронекорпусів ЛБМ.

За першою та другою складовою вивчаються власні та вимушені коливання. Після цього здійснюється порівняння отриманих результатів та коригування чисельних моделей задля відповідності даним експериментів.

Чисельні дослідження бронекорпусів легкоброньованих машин. Із застосуванням методу скінченних елементів [23] для аналізу динамічного напружено-деформованого стану бронекорпусів ЛБМ приходимо до системи розв'язувальних рівнянь

$$M\ddot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = \mathbf{Q}, \quad (1)$$

де M – матриця мас;

C – матриця демпфірування;

K – матриця жорсткості;

\mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, $\ddot{\mathbf{u}}$ – вектори вузлових переміщень, швидкостей та прискорень відповідно;

\mathbf{Q} – вектор вузлових навантажень.

Для розв'язання (інтегрування) цієї системи пропонується використати метод Ньюмарка:

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + [(1 - \delta)\ddot{\mathbf{u}}_n + \delta\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}]\Delta t, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \dot{\mathbf{u}}_n\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\mathbf{u}}_n + \alpha\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} \right] \Delta t^2, \quad (3)$$

де α, δ – параметри інтегрування методу Ньюмарка;

$\mathbf{u}_n, \mathbf{u}_{n+1}$, $\dot{\mathbf{u}}_n, \dot{\mathbf{u}}_{n+1}$, $\ddot{\mathbf{u}}_n, \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$ – вектори вузлових переміщень, швидкостей та прискорень відповідно в момент часу n і $n+1$;

Δt – крок інтегрування за часом метода Ньюмарка.

Для визначення власних частот ω і власних форми коливань λ (у випадку малого тертя) із системи рівнянь вільних коливань

$$M\ddot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

та подання власних коливань у вигляді

$$\mathbf{u} = \lambda \sin \omega t, \quad (5)$$

отримуємо

$$(K - \omega^2 M) \cdot \lambda = 0; \quad \text{Det}(K - \omega^2 M) = 0. \quad (6)$$

Система наведених вище рівнянь дають можливість моделювати коливальні процеси, визначати власні частоти і власні форми коливань. Ці процеси, частоти і форми змінюються за варіювання проектних параметрів p_{var} бронекорпусів ЛБМ, а також (у певному діапазоні) залежать від параметрів p_N скінченно-елементної моделі, що застосовується у тому чи іншому випадку.

Експериментальне дослідження динамічних процесів, власних частот і власних форм коливань

бронекорпусів легкоброньованих машин. Для дослідження динамічних процесів, власних частот і власних форм коливань бронекорпусів ЛБМ застосоване макетне моделювання на прикладі верхньої частини бронекорпуса БТР-80.

Для здійснення експерименту розглянуто верхній пояс корпусу бронетранспортера як його найбільш навантажену частину. Верхній пояс корпусу є зварною тонкостінною просторовою конструкцією і складається з підбаштового, передніх, бічних і задніх листів, верхньої частини моторно-трансмісійного відділення [22]. Ескізи креслення макету, для його виготовлення наведено на рис. 1. Макет корпусу виготовлений із листів металу (Ст. 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.

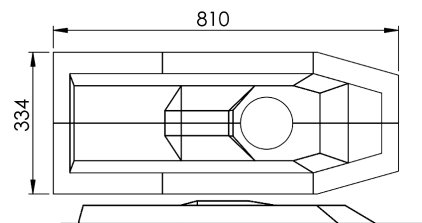


Рисунок 1 – Ескізи креслення макету верхньої проекції корпусу БТР-80

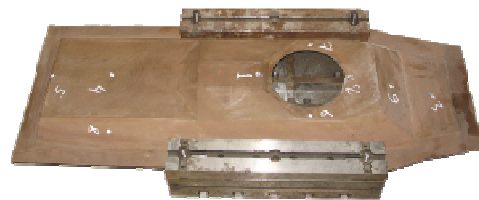


Рисунок 2 – Макет фрагменту корпусу БТР-80 з місцями кріплення датчика

Методика розрахунково-експериментальних досліджень. Для верифікації моделей запропоновано виконати, як і у роботі [22], аналіз перехідних динамічних процесів від імпульсного навантаження та аналіз власних частот коливань і власних форм коливань для моделі макету верхньої проекції корпусу бронетранспортера БТР-80. Ці дослідження виконані за допомогою експериментального методу досліджень, з одного боку, та чисельного розрахунку методом скінченних елементів, – з іншого.

Експериментальні дослідження склалися з трьох етапів:

1) дослідження перехідних динамічних процесів від імпульсного навантаження;

2) дослідження перехідних динамічних процесів від імпульсного навантаження з 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

закріпленій у спеціальному обладнанні для його фіксації. Обладнання та елементи фіксації динамічних характеристик зображені на рис. 3, 4. Імпульсне навантаження здійснювалося за допомогою прогумованого ударника.

Фіксація прискорень у макеті здійснювалася аналізатором спектру вібрацій та спеціальним датчиком ДН-3-М1 (рис. 5).

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. 6.

На другому етапі експериментальних досліджень макет був використаний для аналізу власних

форм і частот. Макет був закріпленій на станині і збуджувався на низькі частоти за допомогою віброприскорювача (рис. 7). Фіксація власних форм здійснювалася шляхом позначення вузлових ліній частинками сухого піску, розсипаного поверхню макета.

При дослідженні макета чисельними методами була здійснена спроба комп'ютерної імітації експерименту. Макет досліджувався методом скінченних елементів, сітка представлена на рис. 8.

Для імітації імпульсного навантаження була використана схема навантаження, аналогічна експерименту (рис. 9). А саме, в місцях установки датчика додавався цифровий датчик, а у місці удару задавалась імпульсна сила (згідно графіка на рис. 9).

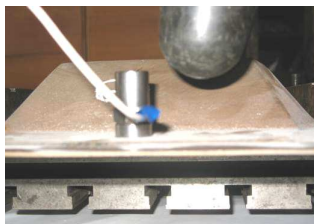


Рисунок 3– Модель верхньої частини корпусу БТР-80, закріплена у спеціальному обладнанні



Рисунок 4– Фіксація динамічних процесів у макеті

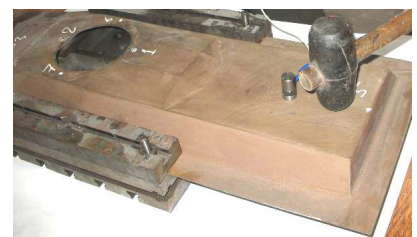


Рисунок 5 – Аналізатор спектра вібрацій датчик ДН-3-М1



Рисунок 6 – Приклад моделювання башти (на наведеному рисунку маса «башти» –1 кг)



Рисунок 7 – Макет моделі верхньої частини корпусу БТР-80, закріпленій на станині з прикріпленим віброприскорювачем для збудження коливань

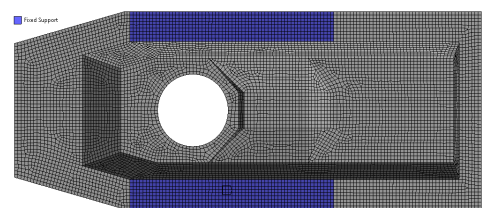
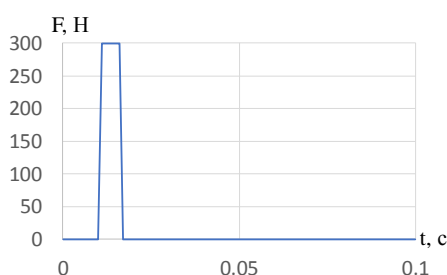


Рисунок 8 – Скінченно-елементна модель із граничними умовами



Force: 300, N
Components: 0,-300,0, N

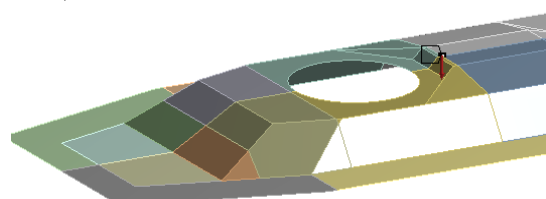


Рисунок 9 – Силове імпульсне навантаження при чисельному розрахунку

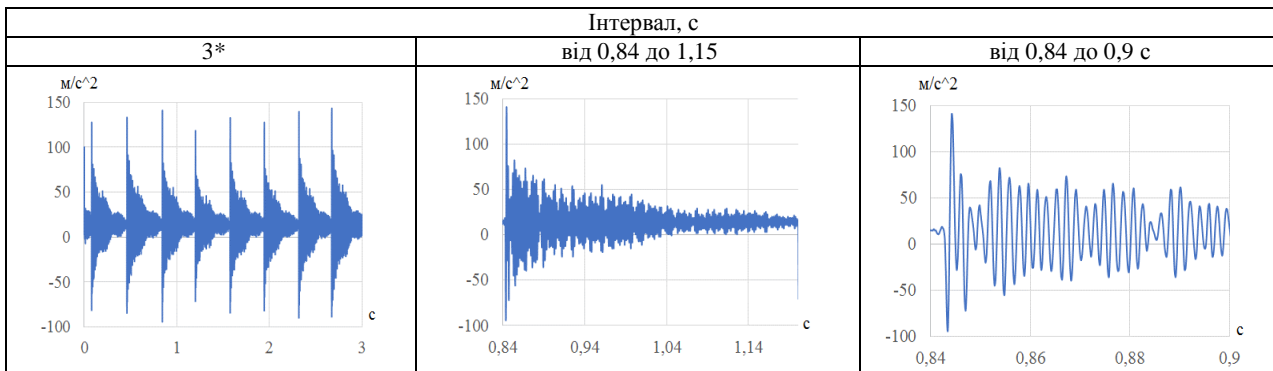
Аналіз власних частот і власних форм коливань виконано на тій самій скінченно-елементній моделі (СЕМ) (див. рис. 8), з аналогічними закріпленнями.

Результати дослідження динамічних характеристик макету бронекорпусу. Згідно з описаною раніше методикою були виконані експериментальні дослідження верхньої проекції макета корпусу бронетранспортера БТР-80. Результати були записані у вигляді текстового масиву, після чого подані у гра-

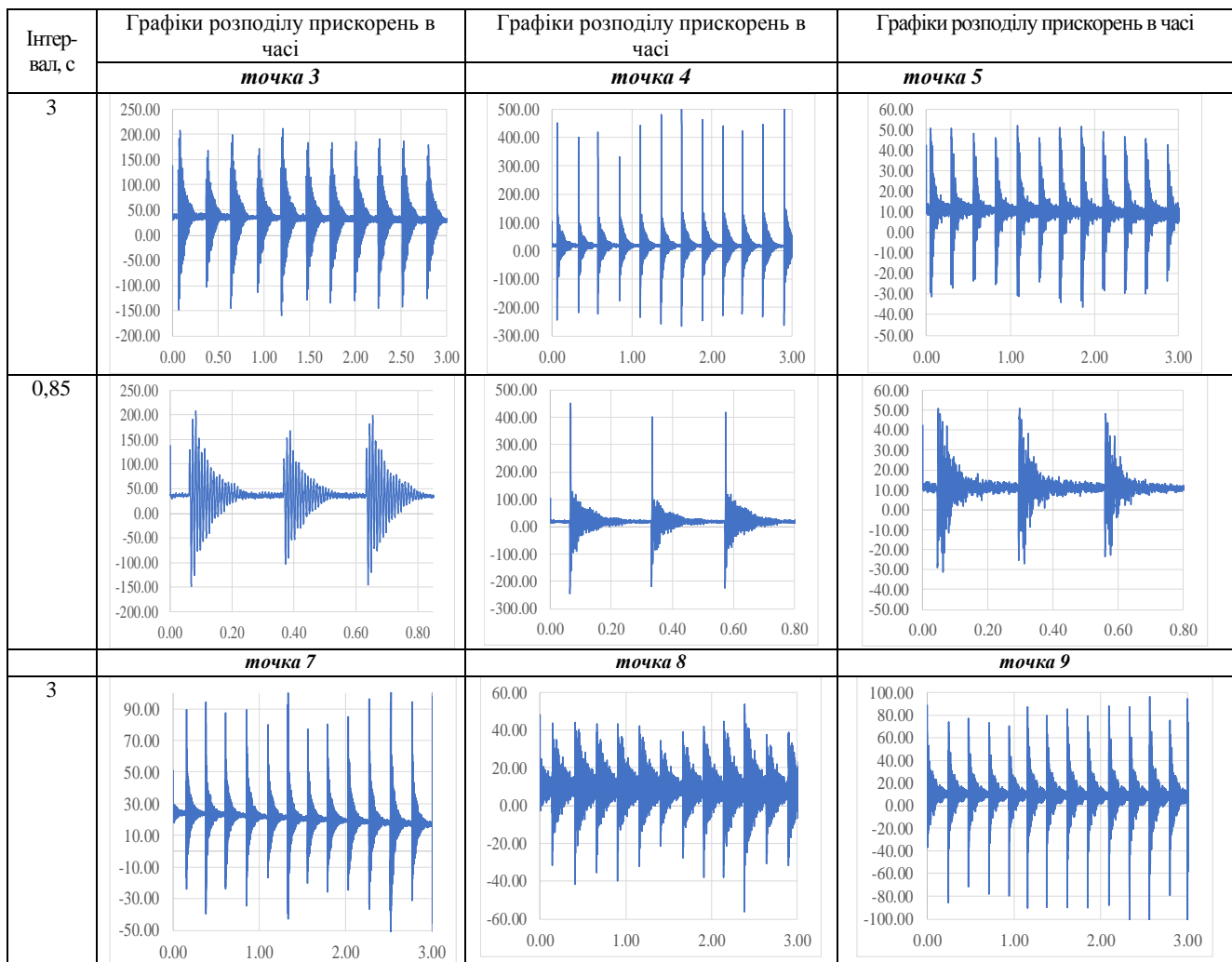
фічній формі і наведені на рис. 10 та у табл. 1, 2. Як результати наведені розподіли прискорень у часі макету бронетранспортера з відкритим верхом у декількох характерних точках та перетворення Фур'є функції. Ці результати описують відгук макета на ударну дію.

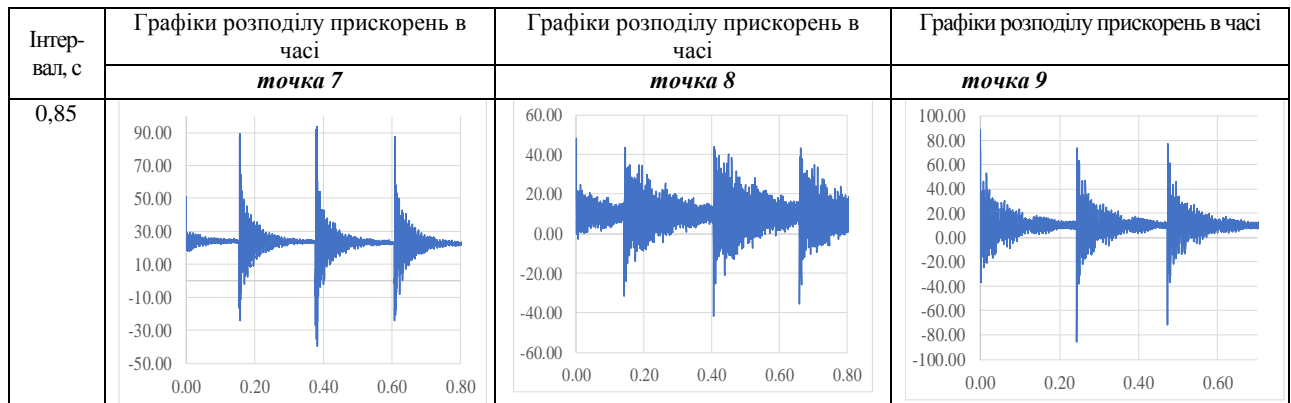
Аналогічні графіки були отримані і для інших точок, у тому числі – графіки швидкостей і переміщень.

Таблиця 1 – Графіки розподілу прискорень (m/s^2) в часі (с) в точці 1 з відкритим верхом на різних інтервалах



Таблиця 2 – Графіки розподілу прискорень (m/s^2) в часі (с) в різних точках з відкритим верхом на різних інтервалах





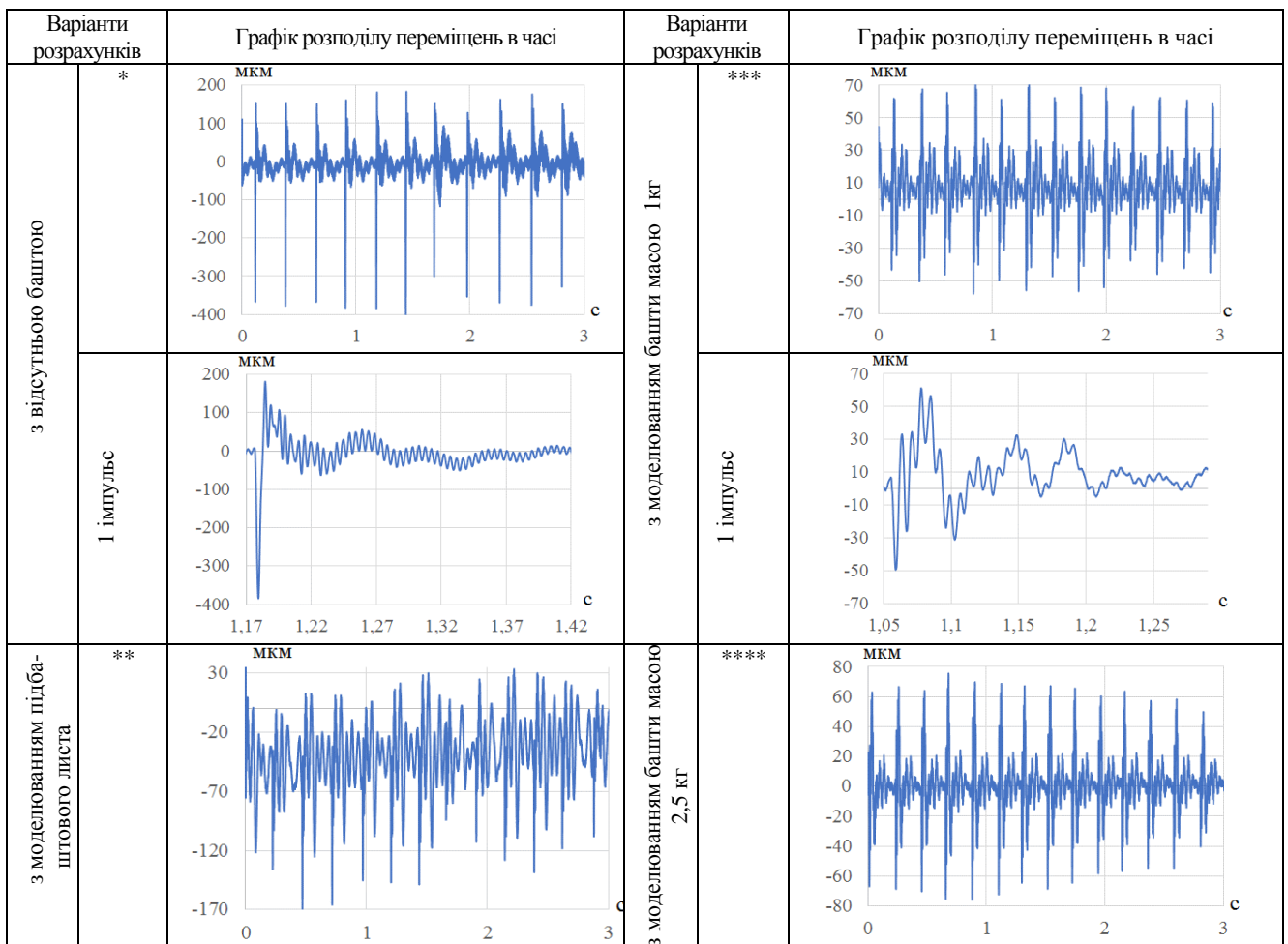
На другому етапі експериментальних досліджень виконується аналогічний експеримент, але, як зображено на рис. 6, варіюється маса башти. На рис. 11–14 та у табл. 3 наведені переміщення та спектральний відгук для точки 2 (див. рис. 3).

На третьому етапі експериментальних досліджень виконується аналіз власних частот і власних форм. Як було описано раніше, макет був закріплений на станині і збуджувався на низькій частоті за допомогою віброприскорювача (рис. 15). Фіксація власних форм здійснювалася шляхом позначення вузлових ліній частинками сухого піску, розсипаного

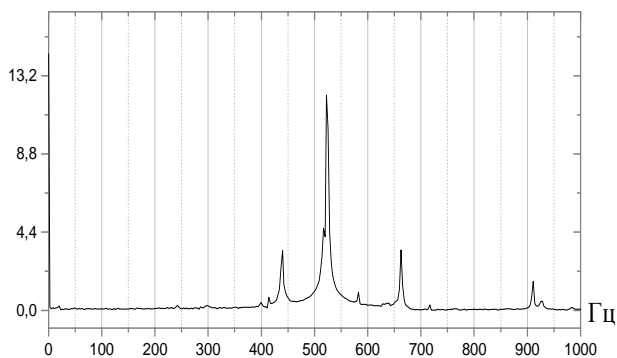
поверхнею макета.

У ході експерименту отримані власні форми коливальних і власні частоти коливальних. Власні форми фіксувалися при утворенні характерних картин з вузлових ліній (рис. 16), а частоти «витягувалися» з вібратора у ці моменти часу. 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 наведені далі.

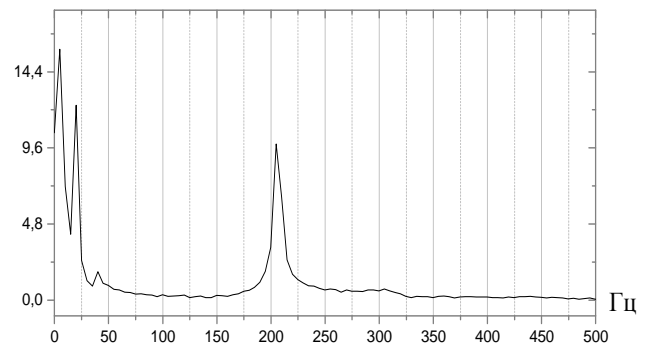
Таблиця 3 – Графік розподілу переміщень (мкм) в часі (с) в точці 2 за різними конструктивними варіантами



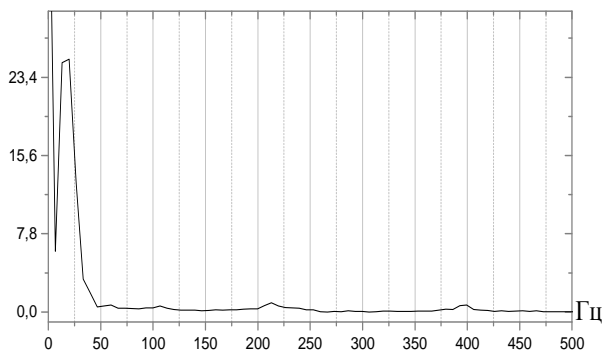
Варіанти розрахунків	Графік розподілу переміщень в часі	Варіанти розрахунків	Графік розподілу переміщень в часі
1 імпульс		3 моделюванням башти масою 2,5 кг	



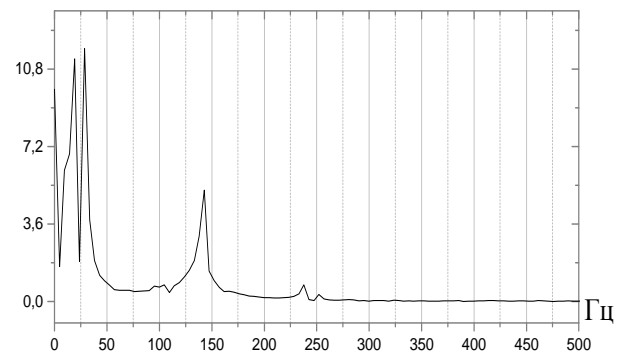
Рисунки 10 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 1 (графік *)



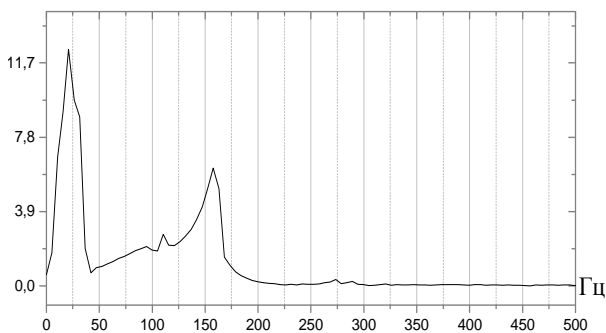
Рисунки 11 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 2 (графік *)



Рисунки 12 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 2 (графік **)



Рисунки 13 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 2 (графік ***)



Рисунки 14 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 2 (графік ****)

Чисельне моделювання динамічних процесів у макеті бронекорпусу. На рис. 17–19 та у табл. 4 наведені чисельні розрахунки для прискорень швид-

костей, та переміщень від імпульсного навантаження в заданих точках. Інтегрування виконувалося 0,1с, з 1000 кроками інтегрування.

На наступному етапі досліджень фрагменту макету корпусу були виконані розрахунки з варійованою масою башти. У розрахунках башта була замінена плоским листом з подвійною товщиною. Лист з'єднано з корпусом макету сумісною скінченно-елементною сіткою, до якого приєднувалася точкова маса (рис. 20). Усі інші параметри розрахунку залишилися незмінними відносно попередніх розрахунків.

У табл. 5 та на рис. 21–24 наведені переміщення та частотний спектр для точки 2, зазначеної на рис. 2, з різними варіантами моделювання башти, а саме: башта відсутня; місце під башту «зашиито» листом; додаткова маса 1 кг та додаткова маса 2,5 кг.



Рисунок 15 – Макет моделі верхньої частини корпусу БТР-80, закріпленний на станині для збудження коливань та закріпленим вібратором



Рисунок 16 – Деякі зареєстровані власні форми коливань

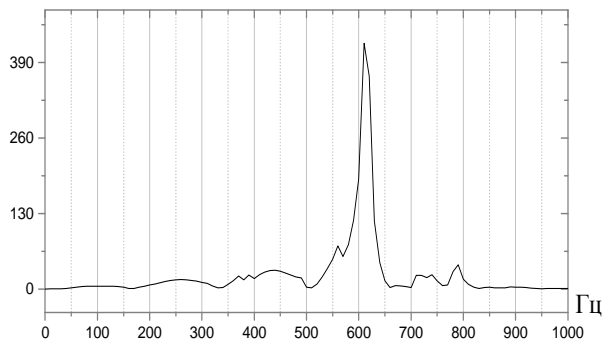


Рисунок 17 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 3 (1-й стовбець, графік *)

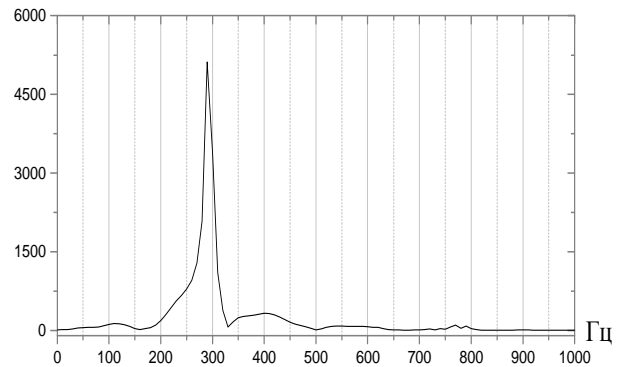


Рисунок 18 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 3 (1-й стовбець, графік **)

Таблиця 4 – Графік розподілу прискорень, швидкостей та переміщень в часі в різних точках з відкритим верхом

№ точки	Графік розподілу		
	прискорень	швидкостей	переміщень
1*	<p>Graph showing acceleration (m/s²) vs time (s) for point 1*. The y-axis ranges from -2000 to 2000, and the x-axis from 0.00 to 0.10. The signal shows a decaying oscillation.</p>	<p>Graph showing velocity (m/s) vs time (s) for point 1*. The y-axis ranges from -0.6 to 0.8, and the x-axis from 0.00 to 0.10. The signal shows a decaying oscillation.</p>	<p>Graph showing displacement (mm) vs time (s) for point 1*. The y-axis ranges from -0.35 to 0.15, and the x-axis from 0.00 to 0.10. The signal shows a decaying oscillation.</p>
2**	<p>Graph showing acceleration (m/s²) vs time (s) for point 2**. The y-axis ranges from -15000 to 15000, and the x-axis from 0.00 to 0.10. The signal shows a decaying oscillation.</p>	<p>Graph showing velocity (m/s) vs time (s) for point 2**. The y-axis ranges from -8 to 8, and the x-axis from 0.00 to 0.10. The signal shows a decaying oscillation.</p>	<p>Graph showing displacement (mm) vs time (s) for point 2**. The y-axis ranges from -8 to 4, and the x-axis from 0.00 to 0.10. The signal shows a decaying oscillation.</p>

№ точ-ки	Графік розподілу		
	прискорень	швидкостей	переміщень
6***			

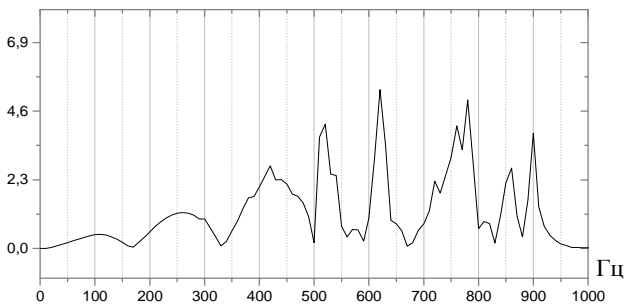


Рисунок 19 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 3 (1-й стовбець, графік ***)

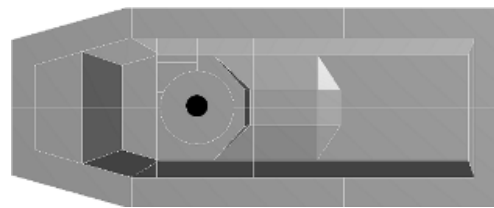


Рисунок 20 – Зображення моделювання башти

Таблиця 5 – Графік розподілу переміщень в часі в точці 2 за різними конструктивними варіантами моделювання башти

Варианти розрахунків	Графік розподілу переміщень в часі	Варианти розрахунків	Графік розподілу переміщень в часі
з відсутньою баштою*		з моделюванням підбаштового листа**	
з моделюванням башти масою 1 кг***		з моделюванням башти масою 2,5 кг****	

Аналогічні графіки були отримані для всіх точок, у тому числі – графіки швидкостей і переміщень. Чисельний аналіз власних частот і форм коливань показав наступні результати (табл. 6, рис. 25).

Аналіз результатів розрахунково-експериментальних досліджень динамічних характеристик макета бронекорпуса. У роботі наве-

дено порівняння розрахункових та експериментальних результатів. Ці дослідження показали задовільну відповідність 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 показали, що збільшення маси

башти зменшує власні частоти системи.

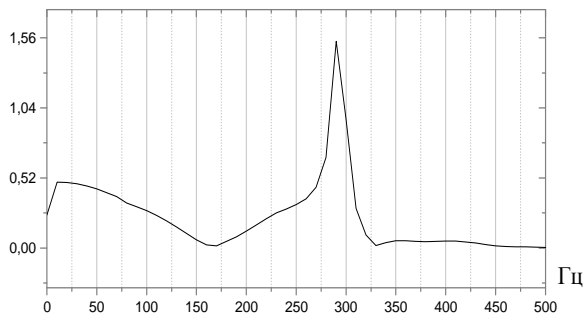


Рисунок 21 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 5 (графік *)

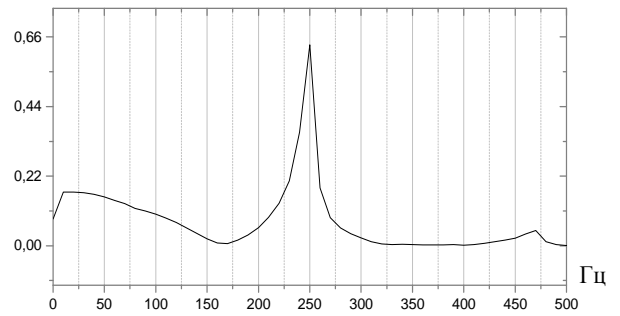


Рисунок 22 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 5 (графік **)

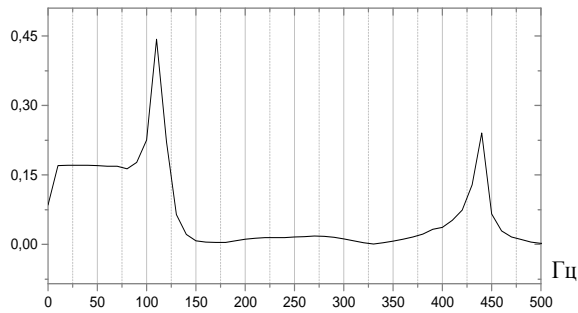


Рисунок 23 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 5 (графік ***)

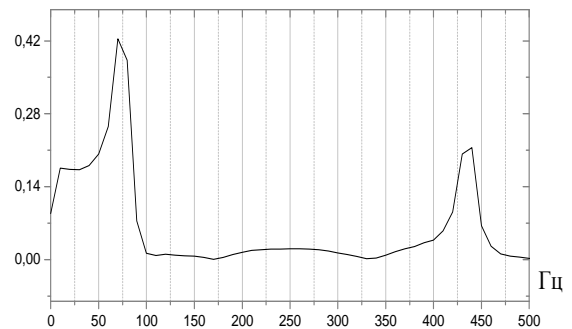
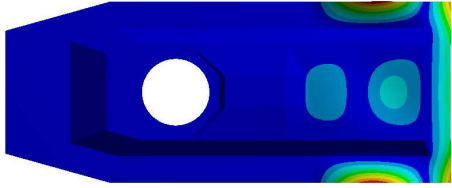
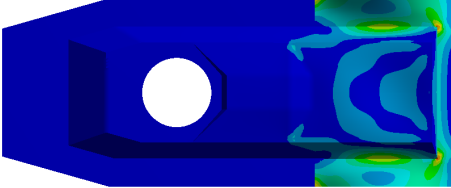
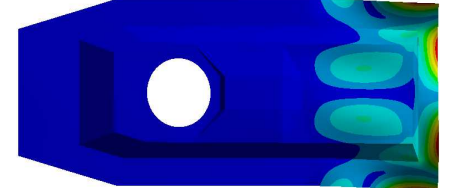

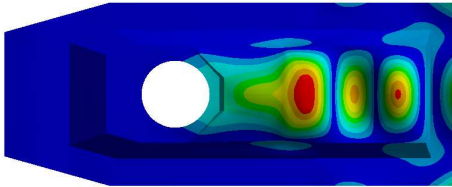
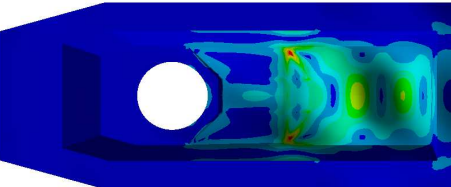


Рисунок 24 – Перетворення Фур'є функції, показаної у табл. 5 (графік ****)

Таблиця 6 – Деякі розраховані власні форми коливань

№ точки	Власна форма переміщень	Власна форма напружень
1		
3		
6		
7		

№ точки	Власна форма переміщень	Власна форма напружень
8		
14		
20		

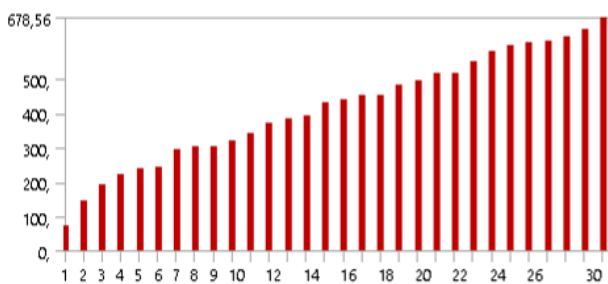


Рисунок 25 – Розраховані власні частоти коливань (Гц)

Зафіксовані експериментально та розраховані ВЧК представлені на рис. 26.

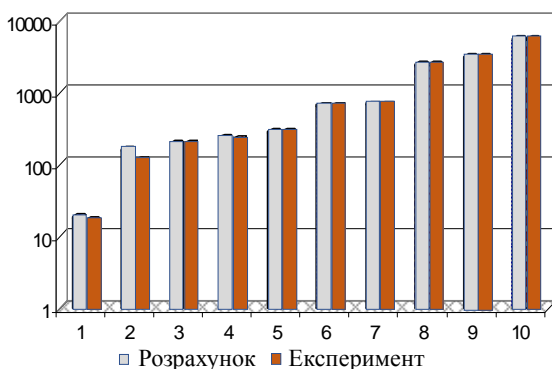


Рисунок 26 – Спектр власних частот коливань макета верхньої частини бронекорпуса (Гц, у логарифмічному масштабі), зареєстрований експериментальним шляхом і розрахований чисельно для деяких форм коливань моделі верхньої частини корпусу БТР-80

Видно, що невідповідність власних частот коливань, отриманих, з одного боку, чисельно, а з іншого, – експериментально, незначна (на рівні 5%), рис. 26. Це свідчить про допустимість застосування

для моделювання динамічного НДС бронекорпусів скінченно-елементних моделей, побудованих на скінченних елементах типу Shell. Таким чином підтверджено, що СЕМ можна використовувати як базову не тільки для дослідження макетів, а й натурних зразків бронекорпусів ЛБМ.

Аналіз віброграм, зафіксованих при імпульсно-навантаженні макетів бронекорпусів, з одного боку, підтверджує власні частоти, виявлені в макеті раніше (див. вище табл. 1–6 та рис. 25, 26), а, з іншого, – дає можливість визначити величину демпфування, що приводить до загасання динамічного процесу. Ці часові розподіли служать як зразки при використанні СЕМ, що створюються 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.

1. Створені чисельні моделі продемонстрували свою працездатність та здатність переналаштування на різні об'єкти досліджень. Зокрема, було побудовано тестову модель макета верхньої проекції бронекорпуса БТР-80, яка у масштабі відтворює геометричну форму реальної конструкції (за виключенням товщин панелей). 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 аналіз впливу параметрів і структури на властивості досліджуваної конструкції, у цьому випадку – бронекорпусів легкоброньованих машин.

2. Для визначення адекватності побудованих математичних і точності створених чисельних моделей здійснені розрахунково-експериментальні дослідження власних частот і власних форм коли-

вань 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.

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

Список літератури

1. Павловський І. В., Чепков І. Б., Борохвостов В. К., Борохвостов І. В., Рябець О.М. Науково-методичні підходи до аналізу воєнно-технічних і техніко-економічних аспектів життєвого циклу зразків озброєння та військової техніки. *Наука і оборона*. 2017. № 2. С. 43–51.
2. 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.
3. Ткачук М. А., Литвиненко О. В., Хлань О. В. [та ін.] Стратегічне питання наукового супроводу проектно-технологічно-виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп. Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 203–204.
4. Чепков І. Б., Г. О. Бойко, Васюковський М. І. Деякі питання стану, основних напрямків й тенденцій розвитку танків. *Озброєння та військова техніка*. 2014. Т. 4. № 4. С. 11–15.
5. Feickert, Andrew. Infantry Brigade Combat Team (IBCT) mobility, reconnaissance, and firepower programs. Washington, DC: Congressional Research Service, 2017. 30 p.
6. 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.
7. 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.
8. Бісик С.П. Підхід до оцінки протимінної стійкості корпусів бойових броньованих машин з урахуванням зварних з'єднань. *Наука і техніка Повітряних Сил ЗС України*. Харків : ХНУПС ім. Кожедуба, 2017. Вип. 3 (28). С. 121–127.
9. Макалей, А.Н. К вопросу о моделировании движения боевых колесных машин / Макалей А.Н., Грищенко Г.Д., Бруль С.Т., Воронцов С.Н. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2006. № 3. С. 101–116
10. Ткачук Н.А., Рикунів О.Н., Танченко А.Ю., Малакей А.Н., Мазур А.Н., Мазур І.В., Набоков А.В. 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.
11. Танченко А.Ю. Влияние толщины панелей на спектр собственных частот колебаний корпусов транспортных средств специального назначения. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків : НТУ «ХПІ», 2013. № 23 (996). С. 138–145.
12. Бруль С. Т., Ткачук Н. А., Васильев А. Ю. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты. *Механіка машинобудування*. 2011. №1. С. 66–73.
13. Chakraverty S., Laxmi Behera Free vibration of rectangular nanoplates using Rayleigh–Ritz method. *Physica*. E 56. 2014. P. 357–363
14. Haichao Li, Fuzhen Pang, Xuhong Miao, Yuhui Li 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, pp. 427–440.
15. Haichao Lia, Fuzhen Panga, Xuhong Miao, Yuan Dua, Hongye Tian A semi-analytical method for vibration analysis of stepped doubly-curved shells of revolution with arbitrary boundary conditions. *Thin-Walled Structures*. 2018. no. 129, pp. 125–144.
16. Kyeong-HoonJeong, Myung-JoJhung Free vibration analysis of partially perforated circular plates. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 199, pp. 182–187.
17. Dongyan Shia, Tao Liua, Qingshan Wangb, Qi Lan Vibration analysis of arbitrary straight-sided quadrilateral plates using a simple first-order shear deformation theory. *Results in Physics*. 2018, no.11, pp. 201–211.
18. 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.
19. Honarpardaz M., Tarkian M., Ölvander J., Feng X. Experimental verification of design automation methods for robotic finger. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017. Vol. 94. P. 89–101.
20. 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.
21. Ткачук М.А., Хлань О.В., Шейко О.І., Малакей А.М.,..., Ткачук Г.В. Разработка математического аппарата для решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов механических систем. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2017. №12(1234). С. 110–131.
22. Грабовський А.В., Ткачук М.А., Бондаренко М., ..., Шевченко А.В. Розрахунково-експериментальні дослідження динамічних характеристик моделі макету бронекорпусу. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2019. №7(1332). С. 47–54.
23. Zienkiewicz O., Taylor R., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.

References (transliterated)

1. Pavlovskiy I. V., Chepkov I. B., Borohvostov V. K., Borohvostov I. V., Ryabets O.M. Naukovo-metodichni pidhodi do analizu voenno-tehnichnih i tehniko-ekonomichnih aspektiv zhittevoogo tsiklu zrazkiv ozbroennya ta viyskovoyi tehniki. *Nauka i oborona*. 2017, no. 2, pp. 43–51.
2. Davidovskiy L. S., Bisik S. P. Vznachennya napryamiv pidvischennya zahischenosti boyovih bronovanih mashin na osnovi analizu boyovih urazhen. *TSNDI OVT ZSU / TSNDI OVT ZS Ukraini*. K. : TSNDI OVT ZS Ukraini, 2018, vip. 1 (68), pp. 45–54.
3. Tkachuk M. A., Litvinenko O. V., Hlan O. V. [ta insh.] Strategichni pitannya naukovoogo suprovodu proektno-tehnologichno-virobnichogo zabezpechennya taktiko-tehnichnih harakteristik boyovih bronovanih mashin. *Problemi koordinatsiyi voenno-tehnichnoyi ta oboronnopromislovoi politiki v Ukraini. Perspektivi rozvitku ozbroennya ta viyskovoyi tehniki: V mizhn. nauk.-prakt. konf. Tezi dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017, pp. 203–204.
4. Chepkov I. B., G. O. Boyko, Vaskovskiy M. I. Deyaki pitannya stanu, osnovnih napryamkiv y tendentsiy rozvitku tankiv. *Ozbroennya ta viyskova tehnika*. 2014. T. 4, no. 4, pp. 11–15.
5. Feickert, Andrew. Infantry Brigade Combat Team (IBCT) mobil-ty, reconnaissance, and firepower programs. Washington, DC: Congressional Research Service, 2017. 30 p.
6. Grubel M. G., Krainik L. V., Homenko V. P. Doslidzhennya konstruktivnih osoblivostey ta taktiko-tehnichnih harakte-ristik boyovih bronovanih mashin tipu MRAP. *Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika*. 2018, no. 1, pp. 7–19.
7. Krainik L. V., Grubel M. G., Yalnitkiy O. D. Analiz rozvitku suchasnih boyovih kolisnih mashin. *Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika*. 2017, no. 1 (49), pp. 126–131.
8. Bisik S.P. Pidhid do otsinki protiminnoyi stiykosti korpusiv boyovih bronovanih mashin z urahuvanniam zvarnih z'ednan. *Nauka i tehnika*

- povitryanih sil zs ukrayini*. Kharkiv : KhNUPS Im. Kozheduba, 2017. Vip. 3 (28), pp. 121–127.
9. Makaley, A.N., Gritsenko G.D., Brul S.T., Vorontsov S.N. K voprosu o modelirovanii dvizheniya boevyih kolesnyih mashin. *Visnik natsionalnogo tehničnogo universitetu «Kharkivskiy politehničniy institut»*. 2006, no. 3, pp. 101–116
 10. Tkachuk N.A., Rikunov O.N., Tanchenko A.Yu., Malakey A.N., Mazur A.N., Mazur I.V., Nabokov A.V. Vliyanie massovo-inertsionnyih harakteristik boevogo modulya, bronekorpusa i podveski na dinamicheskie protsessy pri osuschestvlenii strelby. *Mehanika ta mashinobuduvannya*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2014, no. 1, pp. 83–91.
 11. Tanchenko A.Yu. Vliyanie tolschiny paneley na spektr sobstvennyih chastot kolebaniy korpusov transportnyih sredstv spetsialnogo naznacheniya. *Visnik natsionalnogo tehničnogo universitetu «Kharkivskiy politehničniy institut»*. Kharkiv : NTU "KhPI", 2013, no. 23 (996), pp. 138–145.
 12. Brul S. T., Tkachuk N. A., Vasilev A. Yu. Modelirovanie fiziko-mehaničeskikh protsessov v korpusah legkobronirovannyih mashin: podhodyi, modeli, efekty. *Mehanika mashinobuduvannya*. 2011, no. 1, pp. 66–73.
 13. Chakraverty S., Laxmi Behera Free vibration of rectangular nanoplates using Rayleigh–Ritz method. *Physica. E* 56. 2014, pp. 357–363.
 14. Haichao Li, Fuzhen Pang, Xuhong Miao, Yuhui Li 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, pp. 427–440.
 15. Haichao Lia, Fuzhen Panga, Xuhong Miaoa, Yuan Dua, Hongye Tian A semi-analytical method for vibration analysis of stepped doubly-curved shells of revolution with arbitrary boundary conditions. *Thin-Walled Structures*. 2018, no. 129, pp. 125–144.
 16. Kyeong-HoonJeong, Myung-JolHung Free vibration analysis of partially perforated circular plates. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 199, pp. 182–187.
 17. Dongyan Shia, Tao Liua, Qingshan Wangb, Qi Lan Vibration analysis of arbitrary straight-sided quadrilateral plates using a simple first-order shear deformation theory. *Results in Physics*. 2018, no. 11, pp. 201–211.
 18. 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, pp. 793–807.
 19. Honarpardaz M., Tarkian M., Ölvander J., Feng X. Experimental verification of design automation methods for robotic finger. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017. Vol. 94, pp. 89–101.
 20. 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, pp. 261–279.
 21. Tkachuk M.A., Hlan O.V., Sheyko O.I., Malakey A.M.,..., Tkachuk G.V. Razrabotka matematicheskogo apparata dlya resheniya zadach raschetno-eksperimentalnogo issledovaniya elementov mehaničeskikh sistem. *Vestnik Natsionalnogo tehničeskogo universiteta «Kharkovskiy politehničeskij institut»*. Kharkov: NTU «KhPI». 2017, no. 12(1234), pp. 110–131.
 22. Grabovs'kyj A.V., Tkachuk M.A., Bondarenko M., ..., Shevchenko A.V. Rozrakhunkovo-eksperymentalni doslidzhennya dy`namichny`x haraktery`sty`k modeli maketu bronekorpusu. *Vestnik Natsionalnogo tehničeskogo universiteta «Kharkovskiy politehničeskij institut»*. Kharkov: NTU «KhPI». 2019? no. 7(1332), pp. 47–54.
 23. Zienkiewicz O., Taylor R., Zhu J.Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.

Надійшла (received). 12.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Малакей Андрій Миколайович (Малакей Андрей Николаевич, Malakei Andrii) – заступник генерального директора з якості, державне підприємство «Завод імені В.О. Малишева», м. Харків, Україна; тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua

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

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

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

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola) – 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.

Льозний Олег Сергійович (Лезный Олег Сергійович, Loznyy Oleg) – студент гр. МІТ87Б(ТМ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м Харків, Україна; e-mail: s1708@tmm-sapr.org

Голтвяниця Олексій Сергійович (Голтвяниця Алексей Сергеевич, Holtvianytsia Oleksii) – студент гр. МІТ87Б(ТМ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м Харків, Україна; e-mail: s1703@tmm-sapr.org