

*М. А. ТКАЧУК, А. В. НАБОКОВ, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, О. М. РІКУНОВ, М. М. ТКАЧУК,
С. І. МАРУСЕНКО, І. Я. ХРАМЦОВА, О. В. КОХАНОВСЬКА, М. В. ПРОКОПЕНКО,
О. С. ЛЬОЗНИЙ, Ю. С. ЧАЛА*

АНАЛІЗ РЕАКЦІЇ ТЕСТОВИХ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ КОРПУСІВ ЛЕГКОБРОНЬОВАНИХ МАШИН НА ДІЮ СЕРІЇ ІМПУЛЬСІВ

У роботі описані моделі, методи та результати досліджень реакції тестових просторових конструкцій корпусів легкоброньованих машин на дію серії імпульсів на етапі проектних досліджень. Пропонується здійснювати цей аналіз у два етапи. На першому етапі із використанням спрощених еквівалентних моделей визначається їх реакція на серію імпульсних впливів. На основі аналізу результатів досліджень встановлюються закономірності впливу варійованих параметрів на характеристики міцності та жорсткості. На другому етапі здійснюється аналіз реальної конструкції на дію серії імпульсних впливів із залученням більш складної скінченно-елементної моделі певного корпусу легкоброньованої машини. За рахунок такого поєднання етапів стає можливим суттєво прискорити дослідження при збереженні високої точності чисельного моделювання.

Ключові слова: легкоброньована машина; динамічна система; динамічний процес; імпульсна дія; розрахунково-експериментальна ідентифікація; чисельне моделювання; метод скінченних елементів; власна частота; власна форма коливань

*Н. А. ТКАЧУК, А. В. НАБОКОВ, А. В. ГРАБОВСКИЙ, О. Н. РИКУНОВ, Н. Н. ТКАЧУК,
С. И. МАРУСЕНКО, И. Я. ХРАМЦОВА, О. В. КОХАНОВСКАЯ, Н. В. ПРОКОПЕНКО,
О. С. ЛЕЗНИЙ, Ю. С. ЧАЛАЯ*

АНАЛИЗ РЕАКЦИИ ТЕСТОВЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСОВ ЛЕГКОБРОНИРОВАННЫХ МАШИН НА ДЕЙСТВИЕ СЕРИИ ИМПУЛЬСОВ

В работе описаны модели, методы и результаты исследований реакции тестовых пространственных конструкций корпусов легкобронированных машин на действие серии импульсов на этапе проектных исследований. Предлагается осуществлять этот анализ в два этапа. На первом этапе с использованием упрощенных эквивалентных моделей определяется их реакция на серию импульсных воздействий. На основе анализа результатов исследований устанавливаются закономерности влияния варьируемых параметров на характеристики прочности и жесткости. На втором этапе осуществляется анализ реальной конструкции на действие серии импульсных воздействий с привлечением более сложной конечно-элементной модели определенного корпуса легкобронированной машины. За счет такого сочетания этапов становится возможным существенно ускорить исследования при сохранении высокой точности численного моделирования.

Ключевые слова: легкобронированная машина; динамическая система; динамический процесс; импульсное воздействие; расчетно-экспериментальная идентификация; численное моделирование; метод конечных элементов; собственная частота; собственная форма колебаний

*М. А. ТКАЧУК, А. НАВОКОВ, А. ГРАБОВСКИЙ, О. РИКУНОВ, М. М. ТКАЧУК, С. МАРУСЕНКО,
И. ХРАМЦОВА, О. КОХАНОВСКА, М. ПРОКОПЕНКО, О. ЛОЗНЫИ, Ю. ЧАЛА*

ANALYSIS OF THE REACTION OF TEST SPATIAL STRUCTURES OF CASING LIGHTARMOR MACHINES ON THE ACTION OF A SERIES OF PULSES

The paper describes models, methods and results of research of the reaction of tests spatial structures of casing lightarmor machines on the action of a series of pulses. It is proposed to carry out this analysis in two stages. In the first stage, using simplified equivalent models, their response to a series of impulse effects is determined. Based on the analysis of research results, the regularities of the influence of varied parameters on the characteristics of strength and rigidity are established. At the second stage the analysis of a real design on action of a series of impulse influences with involvement of more difficult finite-element model of a certain case is carried out of casing lightarmor machines. Due to this combination of stages it becomes possible to significantly accelerate the study while maintaining high accuracy of numerical simulations.

Keywords: lightarmor machines; dynamic system; dynamic process; impulse impact; computational and experimental identification; numerical modeling; method of finite elements; natural frequency; natural mode of vibration

Вступ. На теперішній час у збройних силах різних країн, у т.ч. – і в ЗСУ, широко розповсюджено легкоброньовані машини (ЛБМ) [1–5]. Вони, як правило, оснащуються бойовими модулями із малокаліберними автоматичними гарматами (МАГ) калібром 23-30 мм і вище. Відповідно, порівняно із попередніми поколіннями ЛБМ, різко зростають темп стрільби та реактивні сили віддачі. Це створює принципово нові проблемні ситуації, які викликані динамічним збудженням елементів ЛБМ при здійсненні серії пострілів із модулів озброєння із МАГ [6–10]. Дійсно, таке збудження має полігармонійний характер, причому основна гармоніка відповідає темпу стрільби, а вищі гармоніки – їй кратні.

Одним із основних елементів ЛБМ є корпус. Якщо на етапі проектних розробок здійснювати багатоваріантні дослідження реакції тестових просторових

конструкцій корпусів легкоброньованих машин на дію серії імпульсів із залученням громіздких моделей (наприклад, скінченно-елементних), то визначення закономірностей впливу тих чи інших проектних параметрів на тактико-технічні характеристики (ТТХ) ЛБМ займе значний час та вимагатиме суттєвого обсягу обчислювальних ресурсів. З іншого боку, застосування необґрунтовано спрощених моделей може призвести до втрати точності комп'ютерного моделювання, а, відповідно, – обґрунтованості рекомендацій щодо технічних рішень, які дадуть можливість, зокрема, забезпечити міцність корпусів та точність стрільби із бойових модулів, оснащених МАГ.

© М. А. Ткачук, А. В. Набоков, А. В. Грабовський,
О. М. Рікунов, М. М. Ткачук, С. І. Марусенко,
І. Я. Храмцова, О. В. Кохановська,
М. В. Прокопенко, О. С. Льозний, Ю. С. Чала, 2020

Таким чином, виникає низка задач із побудови таких моделей та методів, які поєднують високу оперативність та точність чисельних досліджень динамічних процесів у корпусах. Це становить мету і зміст цієї роботи.

Аналіз стану сучасних моделей та методів досліджень динамічних процесів у корпусних тонкостінних конструкціях. Сучасні форми ведення бойових дій поставили перед розробниками бронетехніки завдання із впровадження нових рішень як при розробці нових, так і при модернізації існуючих зразків бронетехніки легкої категорії. Такими є заходи, спрямовані на підвищення захищеності, рухливості і, особливо, вогневої потужності. Так, у зв'язку зі збільшеним рівнем захищеності колісної бронетехніки противника, на БТР стали встановлюватися МАГ у складі бойового модуля, що дають можливість на дальностях до 1500 м успішно вести боротьбу з усіма типами легкоброньованих цілей, уражаючи їхні прилади прицілювання, спостереження, датчики, озброєння, які знаходяться зовні. При цьому така зброя також дає можливість вести боротьбу з повітряними цілями і живою силою супротивника. З установкою МАГ підвищуються вимоги до влучності стрільби бронебійним снарядом по цілі типу танк, БМП, БТР, оскільки влучність є однією з головних характеристик МАГ.

Слід зазначити той факт, що при стрільбі МАГ виникають коливання, обумовлені силою віддачі гармати, які погіршують умови стрільби як з місця, так і в русі, що призводить до зниження точності стрільби. Для нівелювання збурень, що виникають при стрільбі, у бойовому модулі встановлюється стабілізатор озброєння. За його відсутності значно погіршуються умови стрільби. За таких умов стрільби, якщо навідник зміг здійснити наведення на ціль, за рахунок вібрацій гармата зміститься з лінії прицілювання, і снаряд відхилиться від цілі, що обумовлено складанням швидкості польоту снаряда і руху гармати убік від лінії прицілювання у момент пострілу. У цих умовах чим менші кутова швидкість і амплітуда коливань, тим краще, з точки зору забезпечення точності стрільби. Установка стабілізатора озброєння значно спростила наведення і багаторазово підвищила влучність стрільби як з місця, так і з ходу. Проте виконавчі механізми стабілізаторів озброєння мають інерційність і при високих частотах коливань не можуть досить точно утримати гармату в заданому положенні, причому збільшенню амплітуди коливань ствола сприяє розгойдування бронекорпусу на підвісці машини, як при стрільбі з місця, так і в русі, хоча підвіска і демпфує розгойдування бронемашини. У роботі в основному розглядається вплив характеристик бойового модуля у складі єдиної динамічної системи у поєднанні з бронекорпусом і підвіскою.

При цьому визначити величину амплітуди коливань ствола гармати при стрільбі, умови резонансу, фазочастотні характеристики досить складно відомими математичними методами. Це пояснюється виникненням вимушених негармонійних коливань системи «бойовий модуль – бронекорпус –

підвіска».

На теперішній час для аналізу динамічного напружено-деформованого стану (НДС) корпусних тонкостінних конструкцій [11–17] застосовуються різноманітні методи, переважно – метод скінченних елементів (МСЕ). Ці методи також застосовуються і для такого типу об'єктів як корпуси ЛБМ [7–10, 18–21]. Разом із суттєвими перевагами, цей метод не націлений напряму на пошук раціональних технічних рішень певних конструкцій, хоча забезпечують досить високу точність при розв'язанні задач аналізу НДС. На усунення такого протиріччя спрямований метод узагальненого параметричного моделювання [22], при застосуванні якого варійованими є не тільки тривіальні параметри, але й склад, форма, структура досліджуваних конструкцій із урахуванням їх специфіки. Це дає змогу організувати цілеспрямований пошук раціональних технічних рішень тих чи інших конструкцій за певними критеріями. Разом із тим не усуваються проблеми підвищення оперативності та зниження ресурсоемності чисельних досліджень. Отже, ця проблема становить інтерес для вирішення.

Моделі та методи досліджень. Загальний підхід до побудови моделей та методів досліджень динамічного НДС корпусів ЛБМ полягає у здійсненні двох кроків:

- 1) чисельна дискретизація розв'язувальних рівнянь за допомогою МСЕ;
- 2) формування спрощених чисельних моделей для багатоваріантного дослідження НДС корпусів ЛБМ.

Математична модель динамічних процесів у системі «бойовий модуль – бронекорпус – підвіска». У роботі запропонований розвиток динамічної моделі, яка подана у вигляді системи зі скінченим числом ступенів свободи. Згідно із запропонованим підходом [7, 18–24], бойовий модуль і корпус розглядаються як набір жорстких тіл, сполучених пружними зв'язками. Таким чином, жорсткісні та інерційні властивості системи розділяються: інерційні прив'язуються до центрів мас елементів, а жорсткісні характеристики зв'язують ці маси. У той же час реальні машинобудівні конструкції є системами із розподіленими інерційно-жорсткісними характеристиками. Це ж відноситься, наприклад, і до бронекорпусів. Природно, що у такому випадку опис динамічних процесів у загальному вигляді зводиться до диференціальних рівнянь у частинних похідних. При цьому таке моделювання пов'язане із лавиноподібним зростанням необхідних обчислювальних ресурсів. Тому потрібне створення менш громіздких моделей. Проте, може відбуватися зменшення міри адекватності цієї моделі, тобто зростання невідповідності отримуваних результатів реальним динамічним процесам. Таким чином, на крайніх полюсах шкали «адекватність – громіздкість» розташовуються або адекватні, але неприйнятно громіздкі моделі, або прості, але неприпустимо спотворені. Збалансовані моделі знаходяться у середній частині вказаного діапазону. Проблема особи побудови математичної моделі до-

сліджуваного процесу;

2) обґрунтуванні необхідного рівня деталізації.

Далі описаний новий підхід до вирішення цих завдань.

При створенні математичних моделей динамічних процесів у легкоброньованих машинах слід враховувати, що вони можуть бути подані у вигляді сукупності двох компонент: континуальної та дискретної. Перша з них може бути використана для моделювання корпусу ЛБМ. Друга, з певною мірою допущень, – бойового модуля, підвіски і коліс.

Пропонується для отримуваної дискретно-континуальної системи використати єдиний підхід, що полягає у дискретизації континуальної частини і поданні її у вигляді системи зі скінченним числом ступенів вільності, а також у подальшому під'єднуванні до неї дискретної частини. Утворювана таким чином дискретна система з N ступенями вільності може бути описана, наприклад, із використанням диференціальних рівнянь Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial X_i} = Q_i, \quad (1)$$

де X_i – узагальнені координати з числом ступенів вільності $i = 1 \div N$;

Q_i – відповідні узагальнені сили, $i = 1 \div N$;

T – кінетична енергія системи.

Отримана система звичайних диференціальних

рівнянь описує збудений її рух. При цьому важливо відмітити, що оскільки досліджуваний об'єкт характеризується деяким набором проектних, технологічних параметрів і режимів бойового застосування, які в загальному випадку є варійованими, то їх сукупність можна описати деякою множиною узагальнених параметрів $p = \{p_s, (s = 1 \div N)\}$. Тоді початкове рівняння (1) набере вигляду

$$M(p)\ddot{X} + K(p)\dot{X} + C(p)X = F(p, t), \quad (2)$$

де M, K, C – матриці мас, демпфування і жорсткості, $F(p, t)$ – масив зовнішніх навантажень.

Таким чином, інтегрування цих рівнянь дає параметричне сімейство розв'язків

$$X = X(p, t). \quad (3)$$

У цих співвідношеннях присутній (у загальному випадку – неявний) зв'язок розв'язку X із параметрами p . При цьому з аналізу часового розподілу $X(p)$ можна сформулювати ту чи іншу компоненту ТТХ. Наприклад, у певному випадку йдеться про відхилення снаряда на екрані від номінального положення O (рис. 1). На кінцеве зміщення точки попадання снаряда чинять вплив трансляційна (U) і ротаційна (φ) компоненти (див. рис. 1), L – відстань до цілі (в цьому випадку до екрану–мішені).

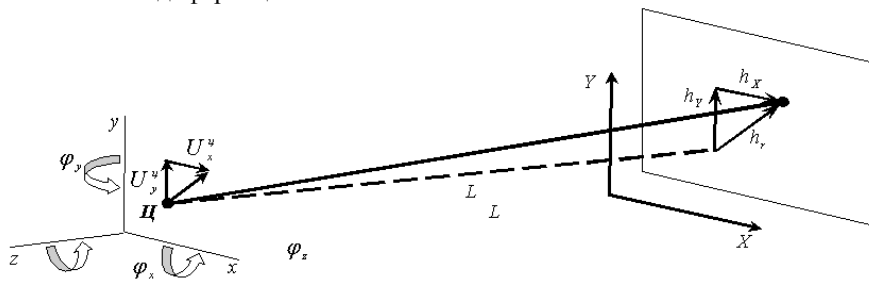


Рисунок 1 – До питання про відхилення снаряда від номінального напрямку на ціль

Тут (див. рис. 1):

$$\vec{h} = \{h_x, h_y\}^T, \quad (4)$$

$$\vec{h} = \vec{h}_1 + \vec{h}_2, h = \sqrt{h_x^2 + h_y^2}, \quad (5)$$

$$h_x = U_x^u + \varphi_y \cdot L, h_y = U_y^u + \varphi_x \cdot L. \quad (6)$$

Таким чином, співвідношення (3)–(6) задають параметричні залежності відхилень h, h_x, h_y від узагальнених параметрів p .

Важливо підкреслити, що відповідні параметричні залежності отримуються як результат аналізу часових розподілів $X(p)$. При цьому характеристики цих часових залежностей досить сильно залежать від власних частот коливань (ВЧК) $\omega_k, k = 1..n$, і частот

збудень ω_i^* . У зв'язку з цим потрібно визначити ці власні частоти. При малому в'язку терті власні коливання

$$X_i^{\wedge} = \lambda_i \sin \omega_i t \quad (7)$$

задовольняють рівнянням вільних коливань

$$M(p)\ddot{X} + C(p)X = 0. \quad (8)$$

Звідси для визначення власних частот (ВЧК) і форм коливань (ВФК) $\lambda = \{\lambda_i\}^T$ справедливі рівняння

$$(C(p) - \omega^2 M(p))\lambda = 0, \quad (9)$$

$$\text{Det}(C(p) - \omega^2 M(p)) = 0. \quad (10)$$

Із співвідношень (9), (10) отримуються параметричні залежності власних форм і власних частот від параметрів p :

$$\lambda_i = \lambda_i(p); \omega_i = \omega_i(p). \quad (11)$$

З аналізу власних форм і власних частот порівняно з вектором навантажень F і спектром частот його компонент ω_e^* можна робити висновки про близькість до резонансних режимів і про збудливість тих чи інших власних форм коливань.

При цьому слід підкреслити, що досліджувана динамічна система складається із структурних підсистем: бронекорпус, бойовий модуль, підвіска, кожна з яких вносить певний вклад у формування спектру власних частот і відповідних власних форм. Послідовним посиленням тих чи інших компонент цей внесок можна проявити, не забуваючи, що ці «парціальні» властивості не складаються механічно, а взаємовпливають один на одного за складними співвідношеннями (9), (10).

Окрім задач аналізу динамічних процесів, представляють інтерес ще дві задачі:

1) розрахунково-експериментальна ідентифікація параметрів чисельних моделей даних процесів;

2) оптимізація параметрів динамічної системи

Що стосується першої задачі, то слід зазначити, що реальна динамічна система при чисельному моделюванні описується параметрами p_N (є так-би мовити, «проекціями» параметрів p на чисельну модель, формуючи своєрідну «інтерпретаційну» картину). У свою чергу, експериментальна модель описується параметрами p_E . Передбачається, наприклад, наступний критерій верифікації:

$$p_N^* : I(h_N - h_E) \rightarrow \min, \quad (12)$$

де h_N, h_E – чисельно і експериментально певні значення відхилення h (див. рис. 1).

Тут функціонал I може, наприклад, приймати вигляд (для деякої кількості точок попадання N_b):

$$I_1 = \sum_{q=1}^{N_b} (h_N^{(q)} - h_E^{(q)})^2 / a \cdot b \cdot N_b, \quad (13)$$

$$I_2 = \sum_{q=1}^{N_b} (h_{NX}^{(q)} - h_{EX}^{(q)})^2 / a^2 \cdot N_b, \quad (14)$$

$$I_3 = \sum_{q=1}^{N_b} (h_{NY}^{(q)} - h_{EY}^{(q)})^2 / b^2 \cdot N_b. \quad (15)$$

Тут a, b – задані нормативно допустимі відхилення точок попадання снарядів для заданої дистанції (коридор розкиду на екрані-мішені) від точки прицілювання.

Мінімізація (12) дає найбільш точне (з точки зору критеріїв (13)–(15) або інших) наближення часових розподілів узагальнених координат до дійсних, спостережуваних у реальному об'єкті.

Визначені на цьому етапі параметри служать як константи p_{const} при розв'язанні другої із згаданих

задач. Йдеться про мінімізацію деяких характеристик (в нашому випадку – h, h_x, h_y) при варіюванні окремих параметрів (жорсткості, в'язкості, мас, товщини бронелістів і тому подібне) p_{var} :

$$p_{var}^* : I = \sum_{q=1}^{N_b} h_{Ni}^2(p_{const}, p_{var}) / a \cdot b \cdot N_b \rightarrow \min. \quad (16)$$

Таким чином, розв'язані наступні нові задачі:

1) розроблений новий загальний підхід до дослідження впливу на ТТХ, зокрема на точність стрільби, параметрів досліджуваної системи «бойовий модуль – бронекорпус – підвіска»;

2) розроблені параметричні моделі динамічної системи, що дає можливість здійснювати дослідження впливу окремих параметрів на компоненти ТТХ, зокрема, на відхилення снарядів від номінального напрямку за рахунок деформації та зміщення бронекорпусу, бойового модуля і підвіски.

Цей підхід є методологічною базою подальших досліджень щодо поліпшення точності стрільби із перспективних ЛБМ та забезпечення міцності бронекорпусів.

Формування спрощених моделей. При багатоваріантних дослідженнях НДС корпусів ЛБМ при дії серії імпульсів сил віддачі у ході здійснення пострілів чергою із МАГ у складі бойових модулів вектор узагальнених сил Q у (1) має у часі вигляд послідовності імпульсів із тривалістю τ та періодом між пострілами T^* . Ці величини визначаються ТТХ МАГ. Ними визначаються і амплітудні значення компонент Q .

Відповідно, виникає задача установалення залежностей $X(p, t)$. Пропонується, враховуючи характер часового розподілу $Q(t)$, який можна у першому наближенні подати у вигляді коротких імпульсів, рух між цими імпульсами вважати вільним рухом системи із частотою, близькою до частоти збудження. Тоді, розкладаючи $Q(t)$ у ряд за власними формами, задачу можна звести до аналізу рухів одномасових систем.

Розглянемо підхід, описаний для динамічної системи з одним ступенем вільності під дією набору періодичних імпульсних навантажень, поведінка якої описується рівнянням

$$m\dot{v} + cv = 0, \quad (17)$$

де m, c, v – скаляри: маса, жорсткість і узагальнена координата, що описують поведінку системи.

Його розв'язок

$$v = \frac{S}{m p} \sin pt, \quad (t > 0), \quad (18)$$

($p = \sqrt{c/m}$) – частота вільних коливань), який задовольняє як рівнянню (17), так і початковим умовам (тобто умовам виникнення руху безпосередньо після зникнення початкового імпульсу):

$$v = 0, \quad \dot{v} = S/m. \quad (19)$$

Рух, що викликається тільки наступним першим імпульсом, можна отримати із того ж виразу (18) у вигляді

$$v = \frac{S}{mp} \sin p(t-T), \quad (t > T). \quad (20)$$

Аналогічно можна знайти результат дії наступних імпульсів. Щоб отримати загальний рух, слід скласти ці «парціальні» рухи. Для одного типового інтервалу часу $[nT, (n+1)T]$, тобто між моментами прикладання n -го та $(n+1)$ -го імпульсів, маємо

$$v = \frac{S}{mp} \sin pt + \sin p(t-T) + \sin p(t-2T) + \dots \\ \dots \sin p(t-nT) = \frac{S}{mp} \sum_{k=1}^{k=n} \sin p(t-kT). \quad (21)$$

Для початку цього інтервалу часу, тобто при $t = nT$, за виразом (21) знаходимо

$$v = \frac{S}{mp} \sum_{k=0}^{k=n-1} \sin(n-k)pT. \quad (22)$$

Один із ефективних способів дослідження якісних особливостей поведінки цієї системи описаний у [25]. Розглянемо один із періодів T , вважаючи початком відліку часу момент зникнення останнього імпульсу. Впродовж даного періоду коливання є вільними і описуються розв'язком

$$v = A \cos pt + B \sin pt. \quad (23)$$

Якщо v_0 – початкове зміщення і \dot{v}_0 – початкова швидкість, то константи A і B дорівнюють

$$A = v_0, \quad B = \frac{\dot{v}_0}{m}, \quad (24)$$

розв'язок (23) можна записати у вигляді

$$v = v_0 \cos pt + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pt. \quad (25)$$

Диференціюючи за часом t , знаходимо швидкість

$$\dot{v} = -v_0 p \sin pt + \dot{v}_0 \cos pt. \quad (26)$$

У кінці цього періоду, безпосередньо перед прикладанням чергового імпульсу (тобто $t = T$), маємо

$$v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pT, \quad (27)$$

$$\dot{v}_1 = -v_0 p \sin pT + \dot{v}_0 \cos pT. \quad (28)$$

Відразу після прикладання чергового імпульсу зміщення v збереже своє значення (27):

$$v_2 = v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pT, \quad (29)$$

але швидкість миттєво зміниться на певну величину і при урахуванні виразу (28) складе

$$\dot{v}_2 = -v_0 p \sin pT + \dot{v}_0 \cos pT + \frac{S}{m}. \quad (30)$$

Внаслідок передбачуваної періодичності процесу величини v_2 і \dot{v}_2 мають дорівнювати величинам v_0 і \dot{v}_0 , тобто

$$v_0 = v_0 \cos pT + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pT, \quad (31)$$

$$\dot{v}_0 = -v_0 p \sin pT + \dot{v}_0 \cos pT + \frac{S}{m}. \quad (32)$$

Таким чином, отримано систему двох алгебраїчних рівнянь із двома невідомими v_0 і \dot{v}_0 ; розв'язавши її, знайдемо

$$v_0 = \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2}, \quad \dot{v}_0 = \frac{S}{2m}, \quad (33)$$

і закон руху (23) набирає вигляду ($0 < t < T$)

$$v = \frac{S}{2m p} \left(\sin pt + \cos pt \cdot \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right). \quad (34)$$

Періодичність досягнута внаслідок ігнорування заданих початкових умов (тобто умов, що відносяться до початкового моменту, безпосередньо перед прикладанням першого імпульсу); у реальних системах завдяки демпфуванню (яке не було враховано) врешті-решт здійснюється саме такий періодичний рух.

Корисно проаналізувати результат, що міститься у виразі (34). Передусім, якщо $\frac{pT}{2} = n\pi$ (де n – ціле), то $\left| \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right| \rightarrow \infty$, і амплітуди переміщень прагнуть до нескінченності, тобто настає ударний резонанс. Якщо $\omega = 2\pi/T$ – кутова частота прикладання імпульсів, то умова ударного резонансу набуває вигляду

$$\omega = p/n. \quad (35)$$

При усіх інших співвідношеннях частоти відхилення виявляються скінченими. Найбільше відхилення системи згідно (33) дорівнює

$$v_{\max} = \frac{S}{mp} \sqrt{1 + \text{ctg}^2 \frac{pT}{2}} = \frac{S}{2mp \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|}. \quad (36)$$

Оскільки дріб $S/2mp$ є максимальне відхилення, що викликається одним миттєвим імпульсом S , то вираз

$$\beta = \frac{1}{2 \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|} \quad (37)$$

можна назвати коефіцієнтом впливу повторності [25]. Тут можливе необмежено велике число ударних резонансів (відповідно до формули (35)).

Розв'язання тестових задач. Досліджено дві тестові макетні конструкції та одномасова «еквівалентна» система.

І. *Дослідження реакції монотовщинного корпусу макету БТР-80 на імпульсне збудження.* На рис. 2 наведена геометрична модель макету бронекорпусу БТР-80, на рис. 3 – скінченно-елементна модель досліджуваного макету корпусу, а на рис. 4, 5 – результати модального аналізу. На рис. 6 проілюстровано перехідний динамічний аналіз навантаження. Результати розрахунку наведені на рис. 7 та у табл. 1 (наводиться часовий розподіл переміщень у погонному кільці при різній частоті імпульсів).

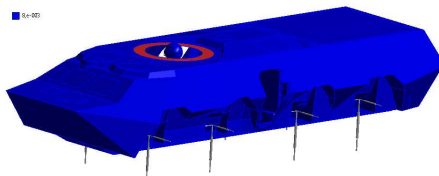


Рисунок 2 – Геометрична модель (товщина листів 8 мм, маса бойового модуля – 700 кг)

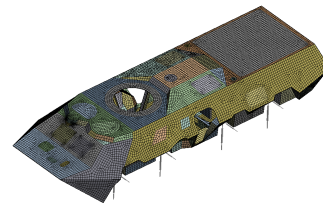


Рисунок 3 – Скінченно-елементна сітка (256 тис. вузлів)

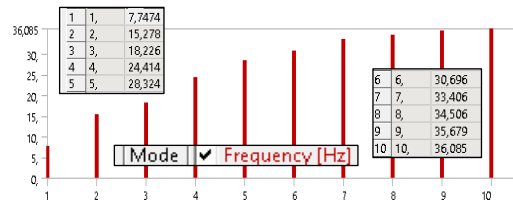


Рисунок 4 – Спектр власних частот, Гц

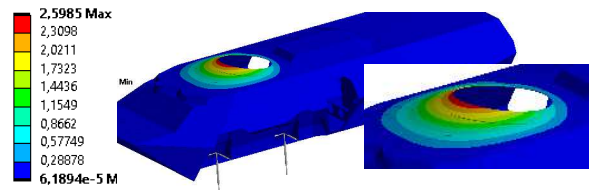


Рисунок 5 – Перша власна форма (7,7474 Гц)

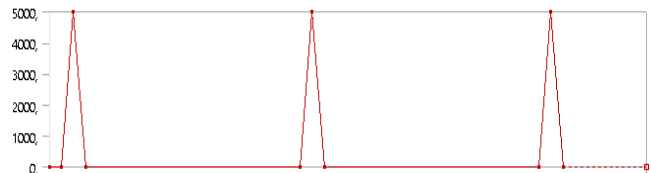
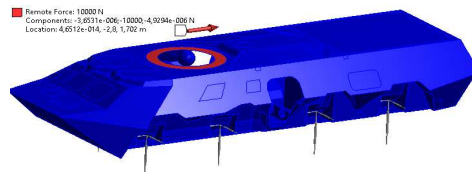


Рисунок 6 – Навантаження (3 імпульси величиною 5 кН, частота імпульсів задається)

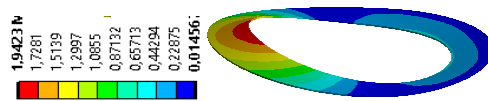
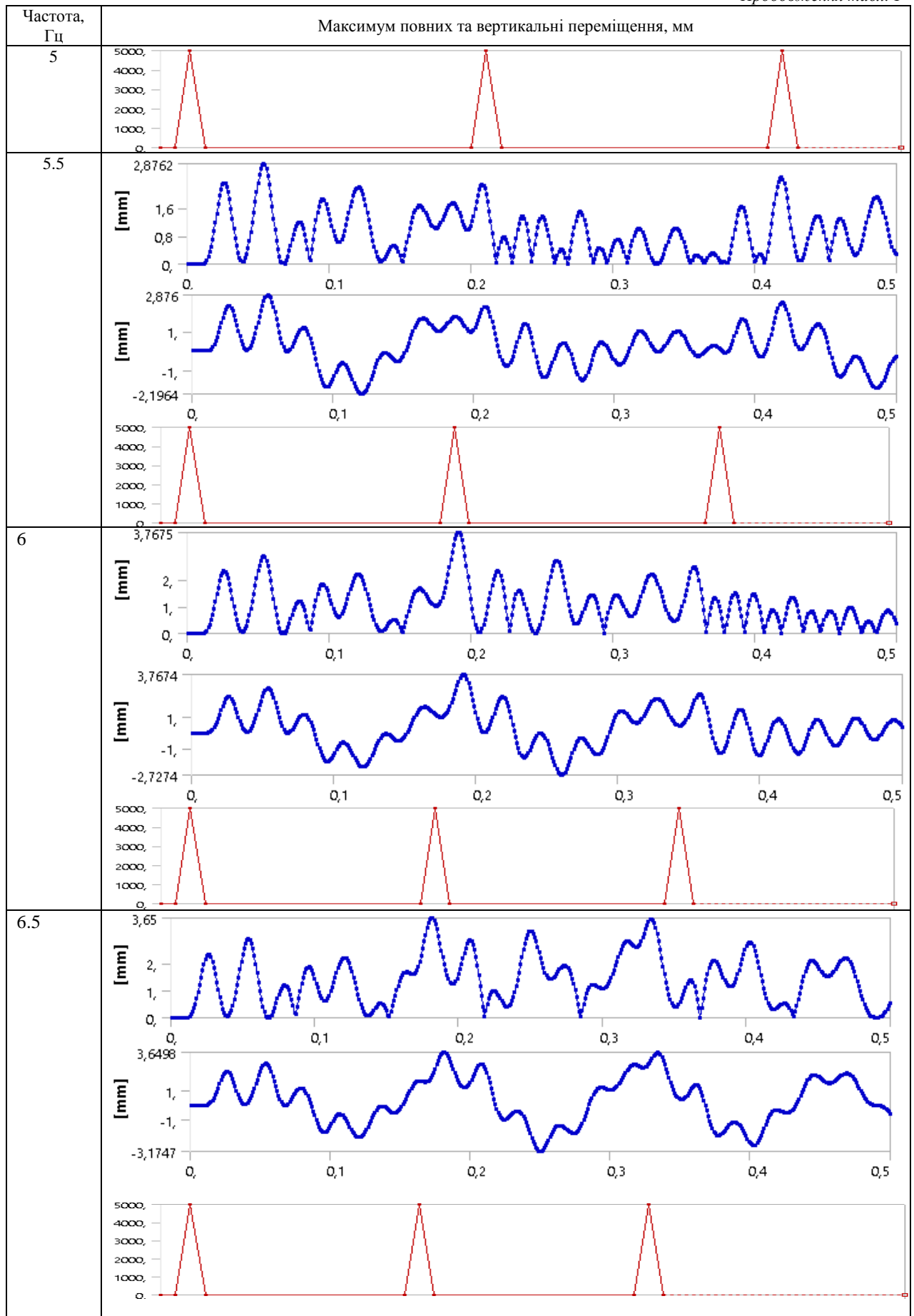
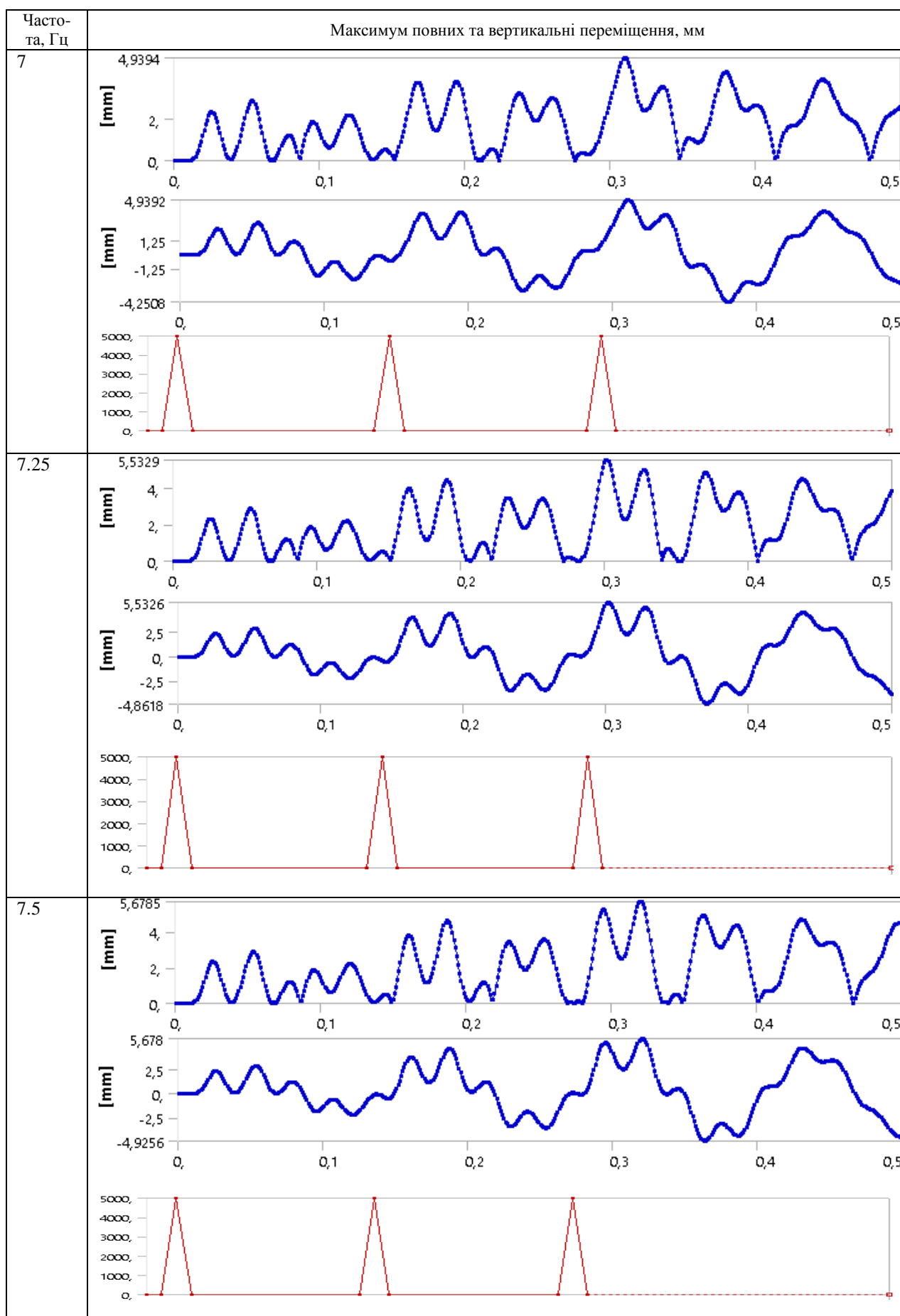


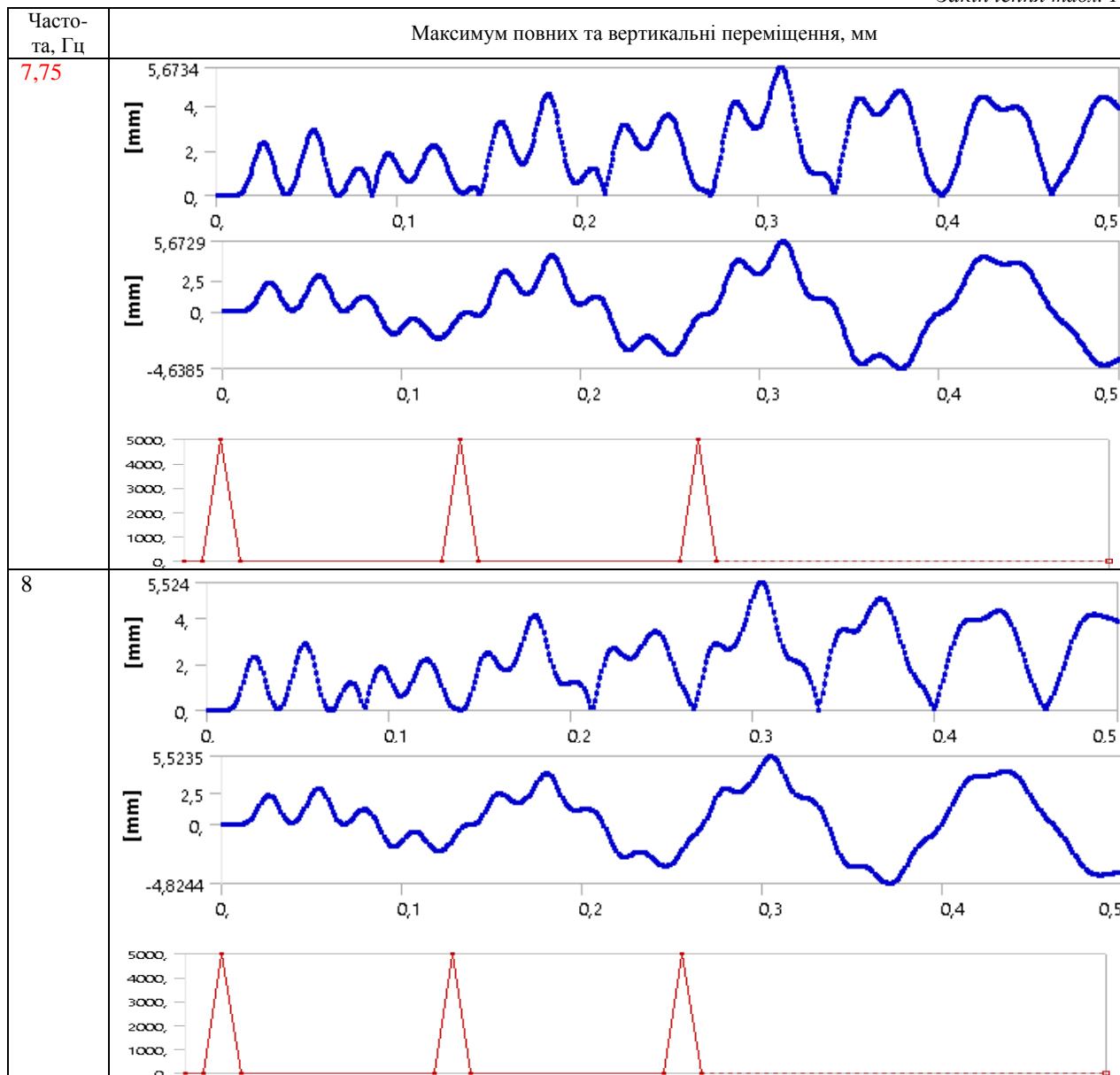
Рисунок 7 – Повні переміщення у погонному кільці (мм)

Таблиця 1 – Максимум повних переміщень та вертикальні переміщення передньої точки у погонному кільці макету БТР-80

Частота, Гц	Максимум повних та вертикальні переміщення, мм
5	







II. Дослідження спрощеної скінченно-елементної моделі тестової системи «бойовий модуль-бронекорпус». Досліджена також спрощена модель системи «бойовий модуль – бронекорпус» (рис. 8).

Модальний аналіз здійснено на скінченно-елементних моделях, наведених на рис. 9. Там же – спектр власних частот і нижні форми коливань.

Зміна максимальних повних та вертикальних переміщень точки дульного зрізу при різній частоті збурень – у табл. 2.

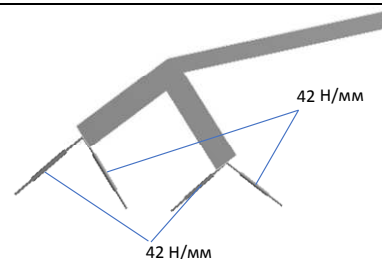


Рисунок 8 – Спрощена модель системи

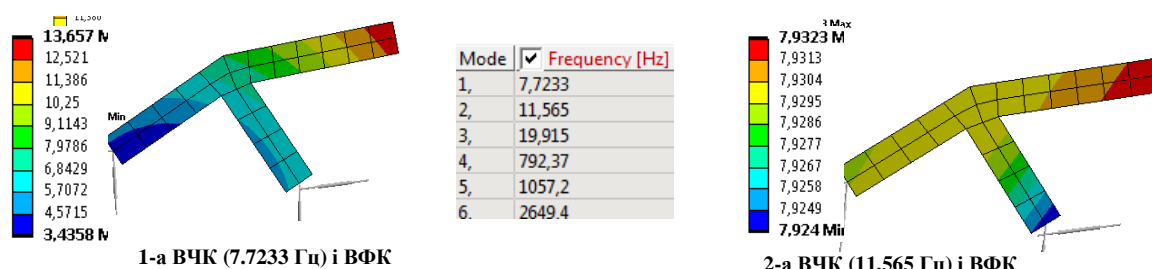
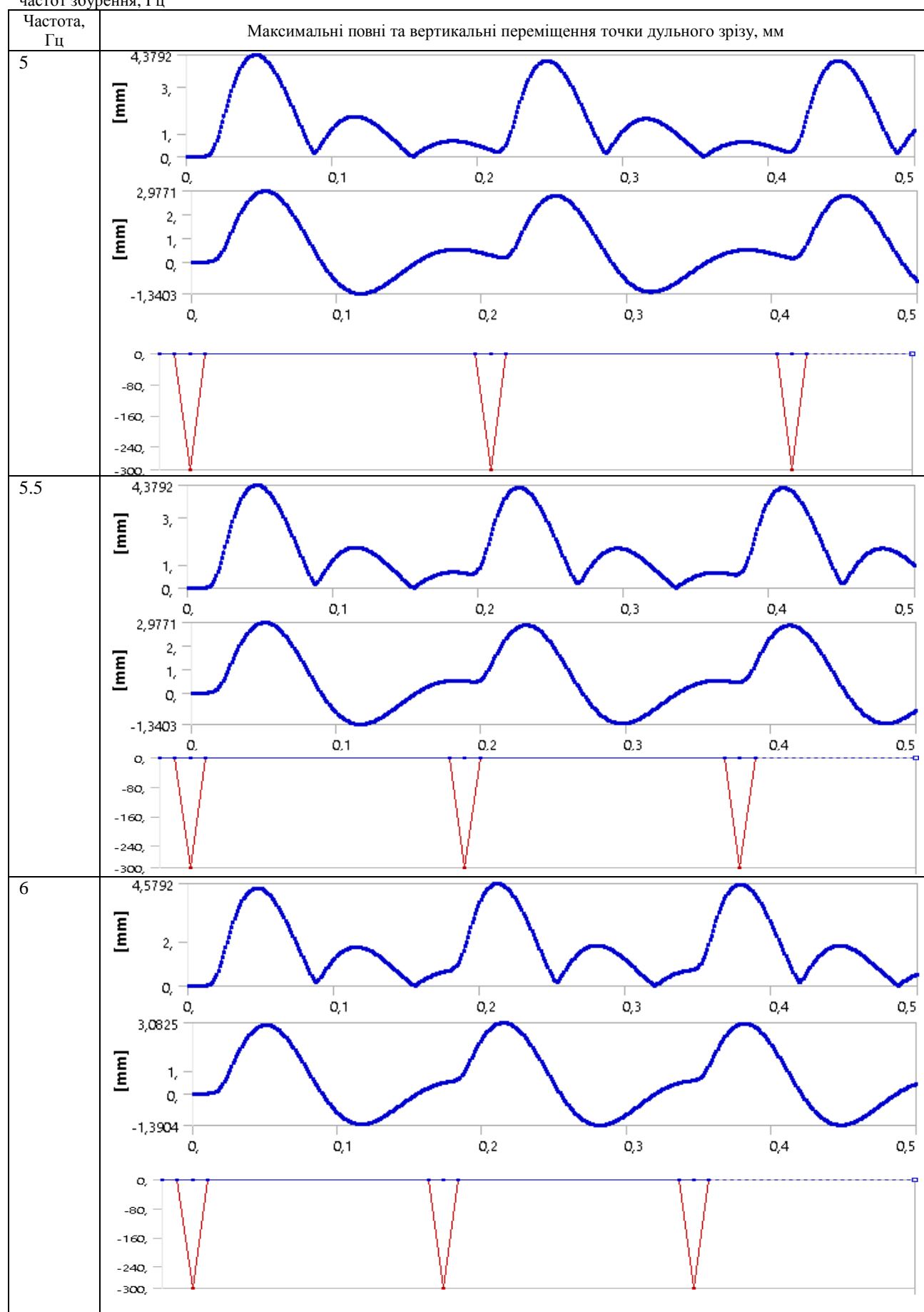
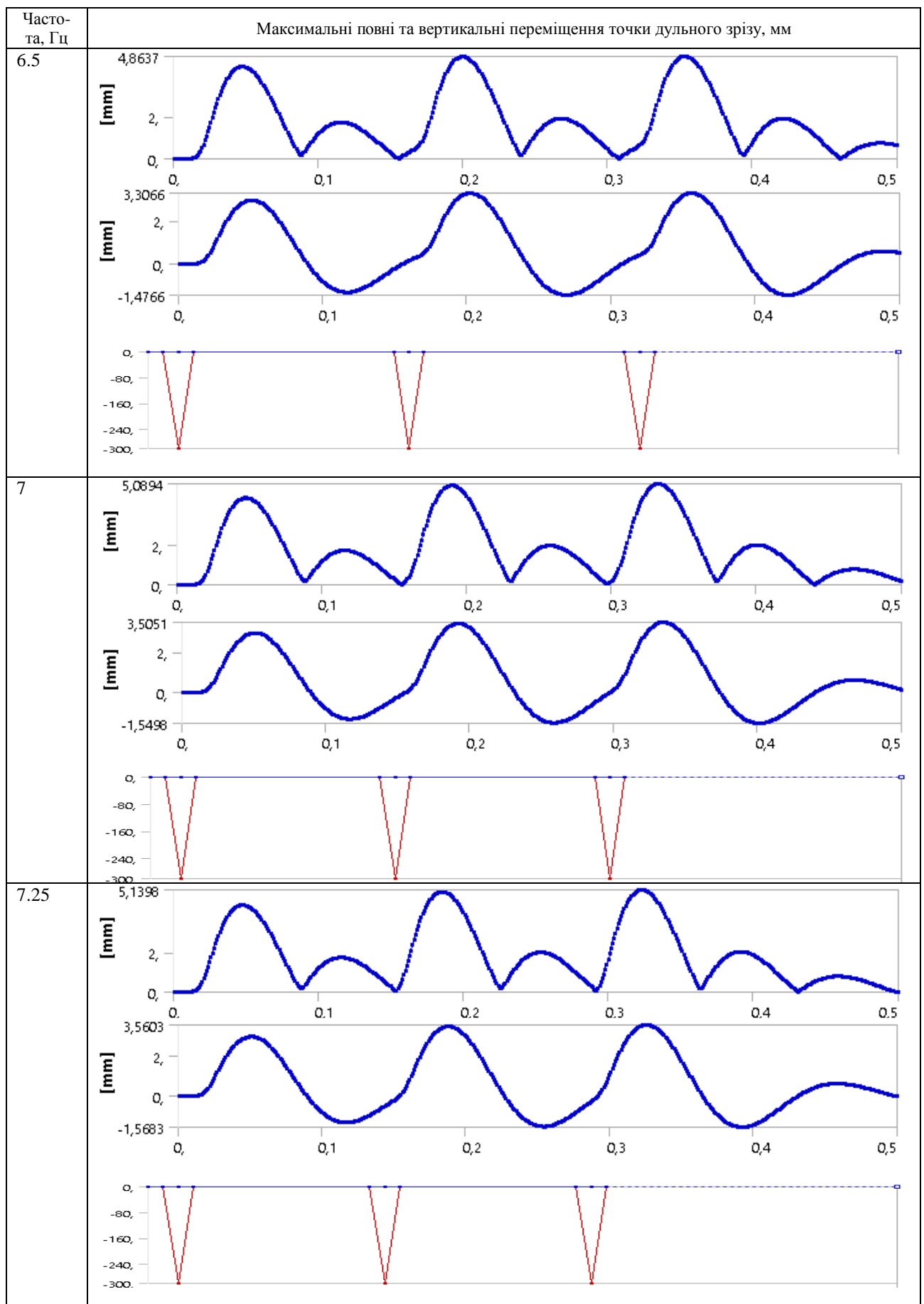


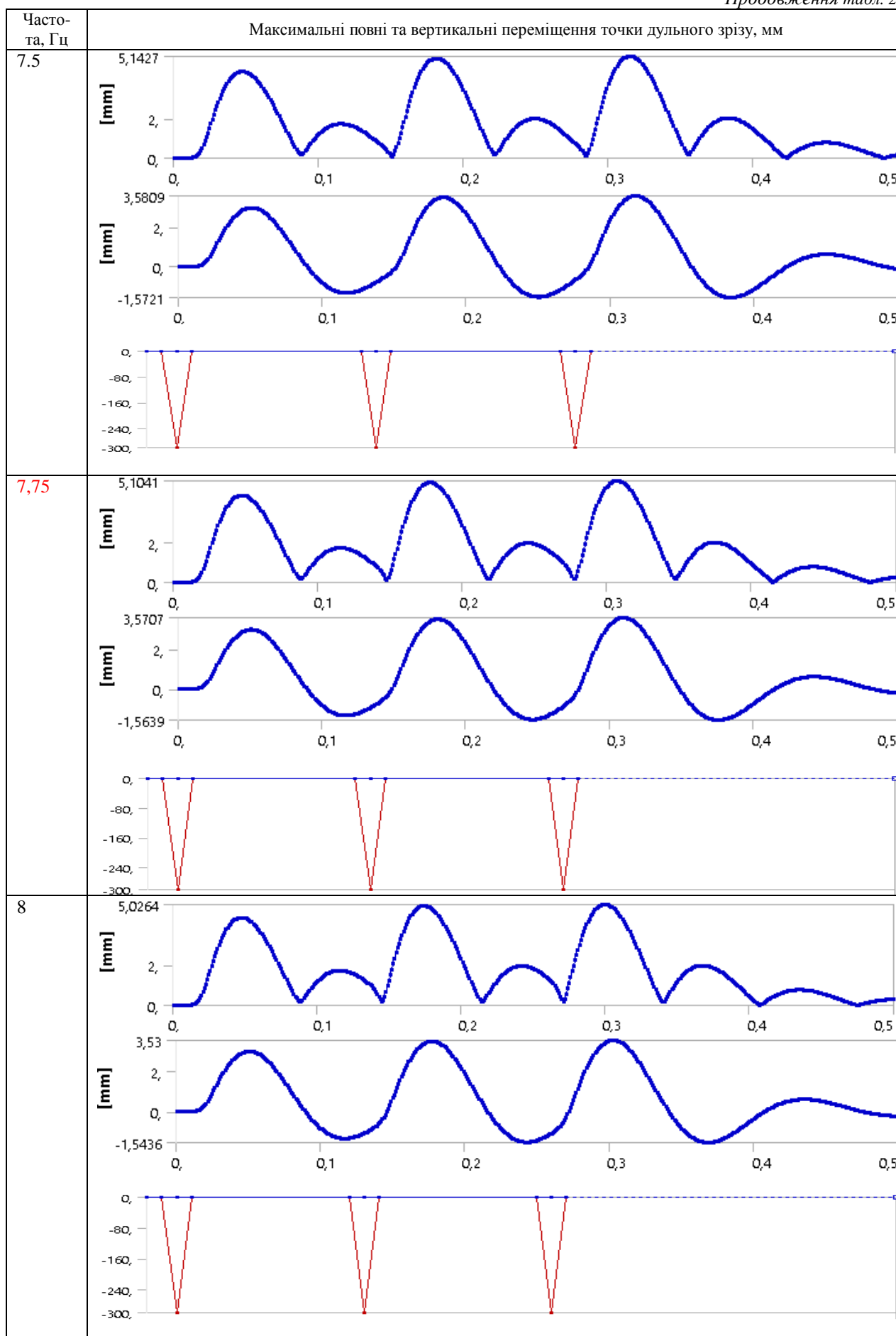
Рисунок 9 – Результати модального аналізу спрощеної моделі

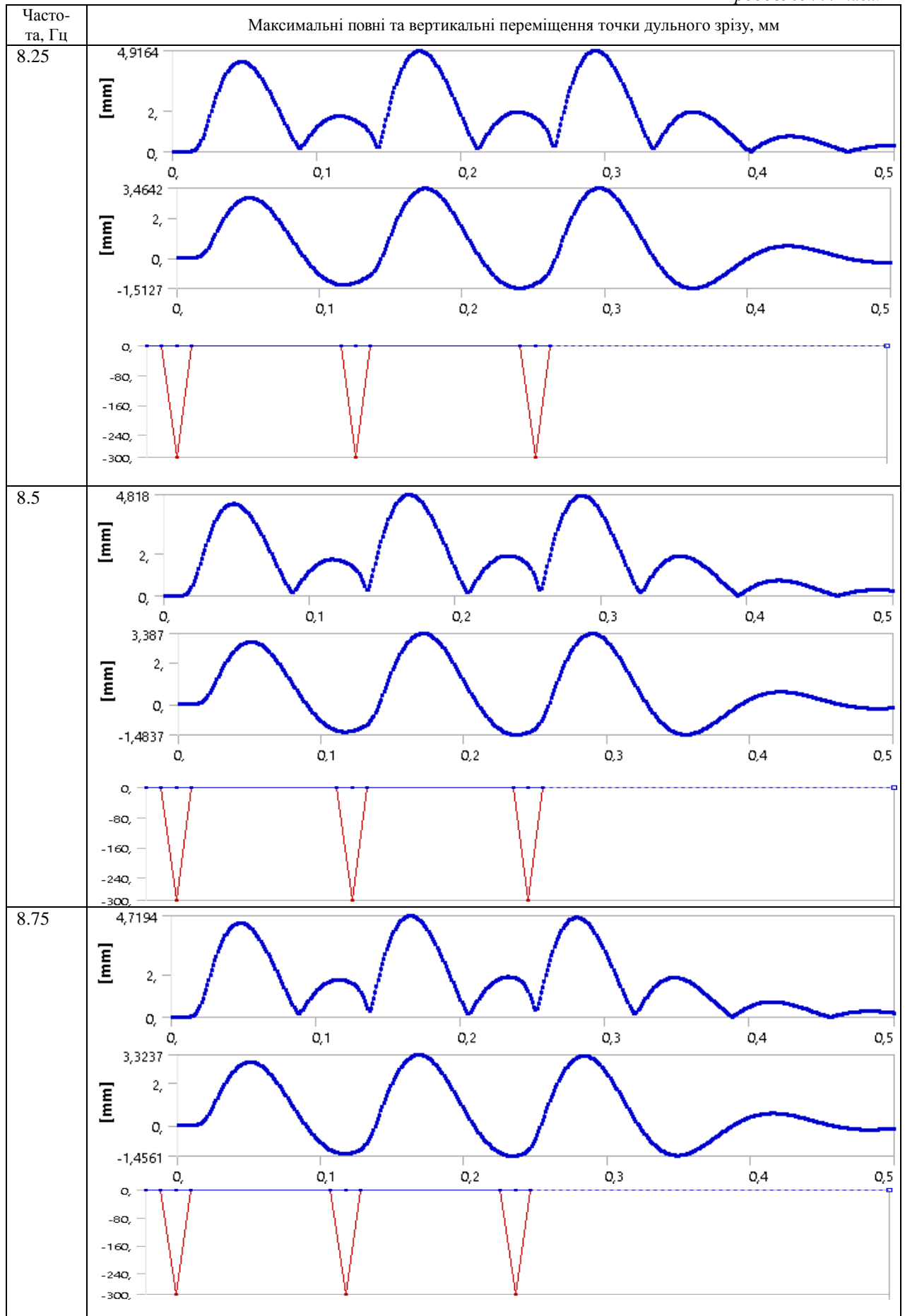
Таблиця 2 – Максимальні повні та вертикальні переміщення (мм) точки дульного зрізу у спрощеній моделі для різних частот збурення, Гц



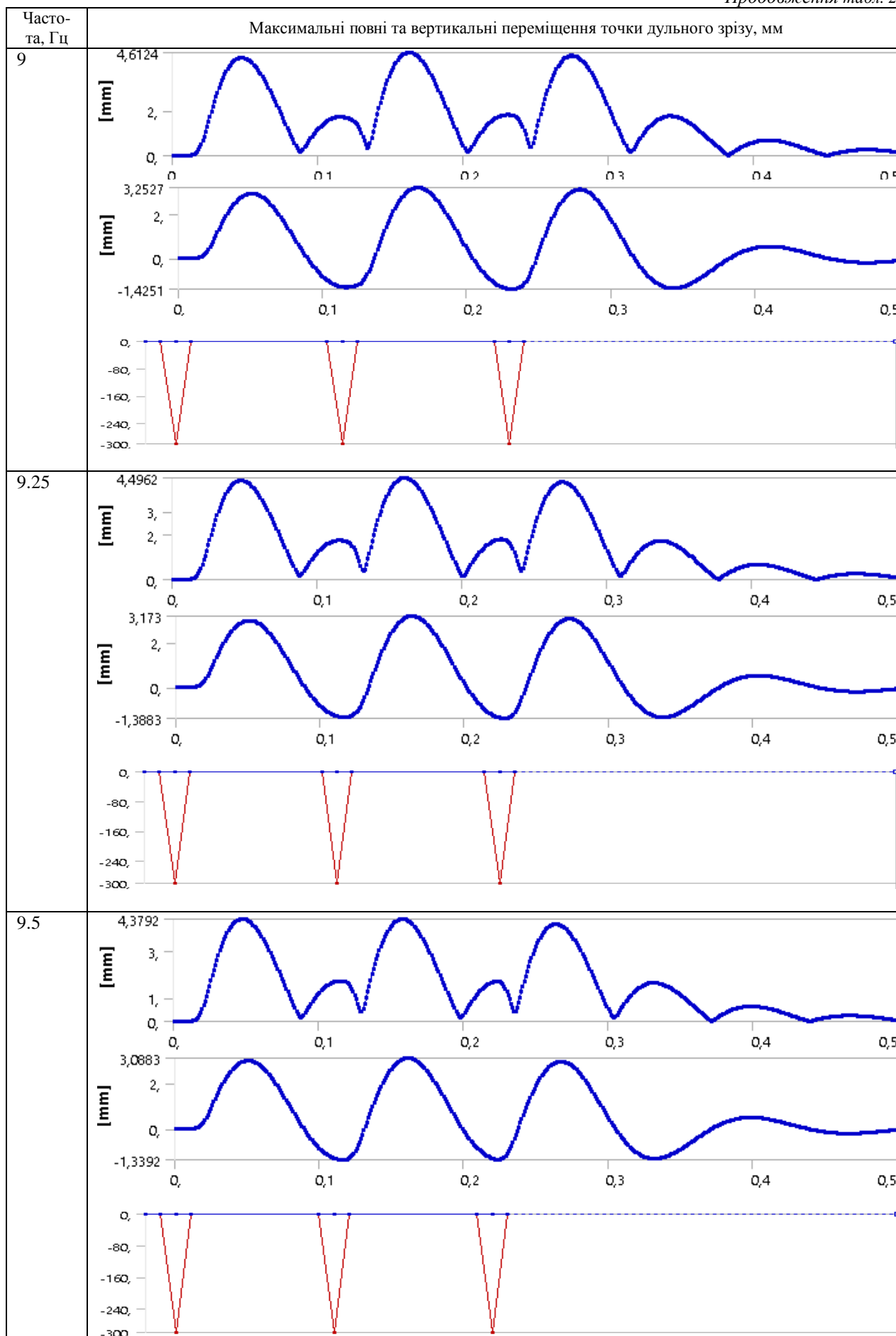


Продовження табл. 2





Продовження табл. 2





III. Аналіз коливань одномасової системи. Найбільш простою системою для аналізу є одномасова (рис. 10, 11). Результати досліджень – на рис. 12 та у табл. 3.

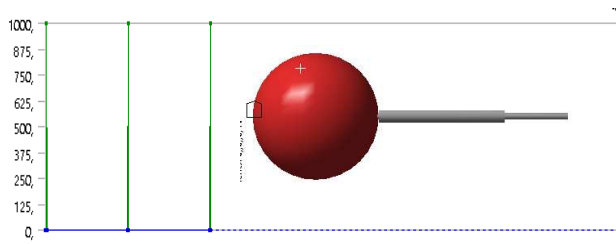


Рисунок 10 – Навантаження одномасової системи (H) у часі

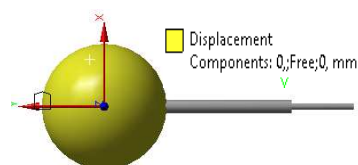
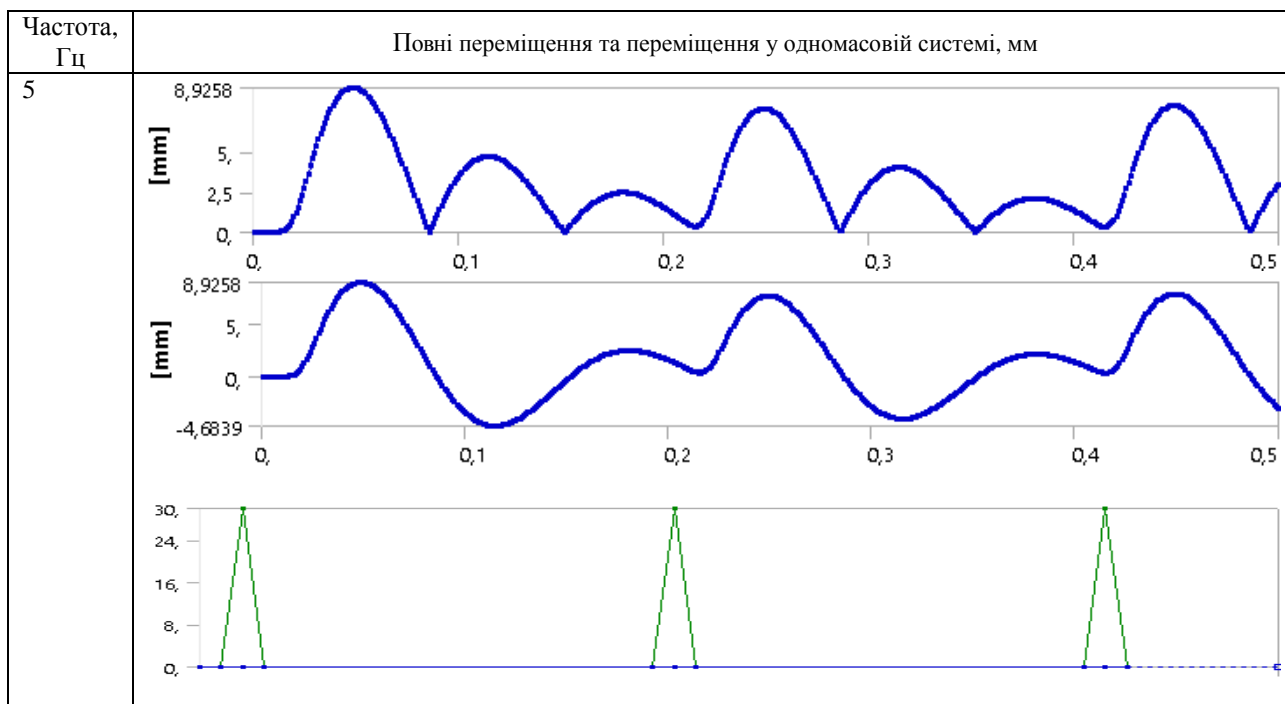


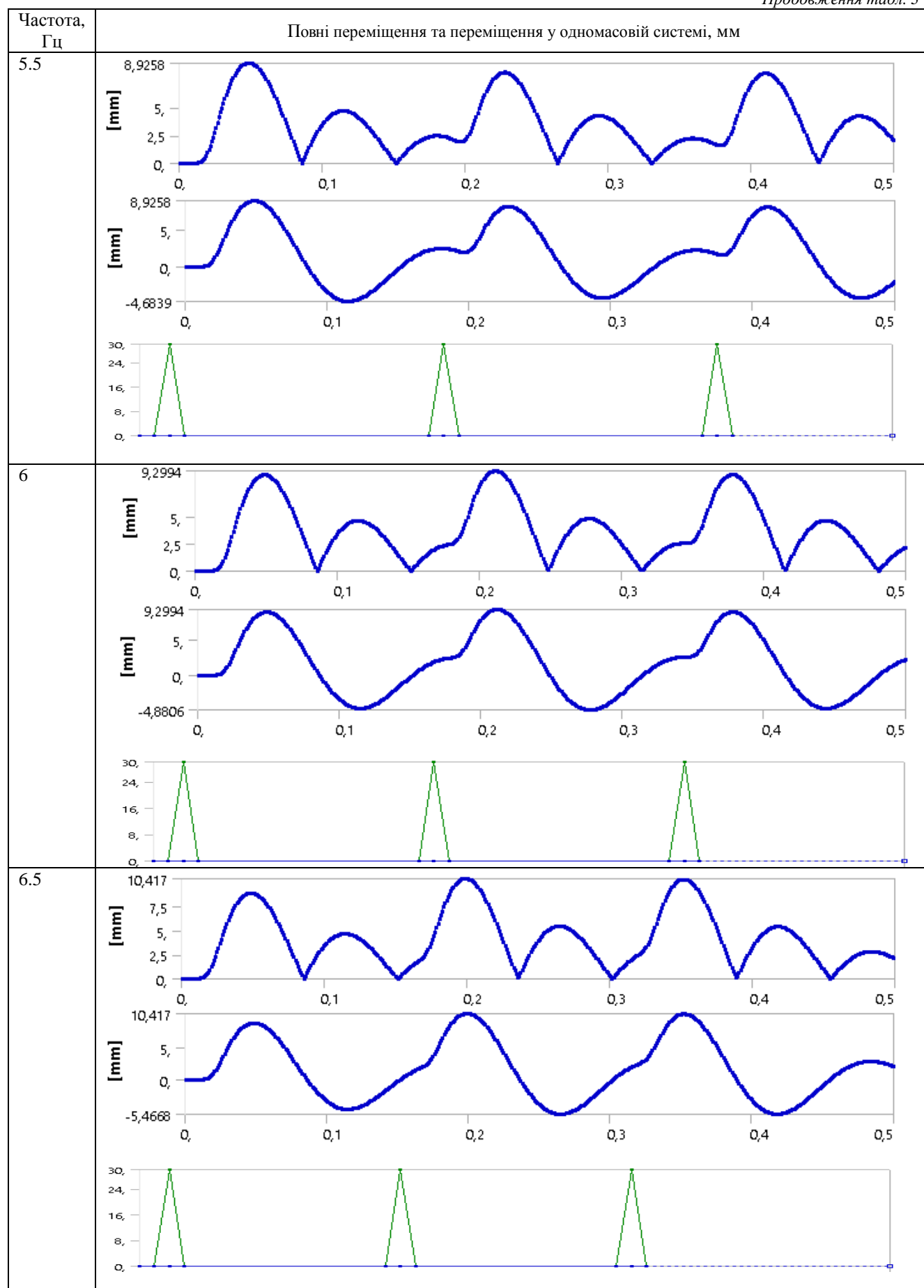
Рисунок 11 – Одномасова система

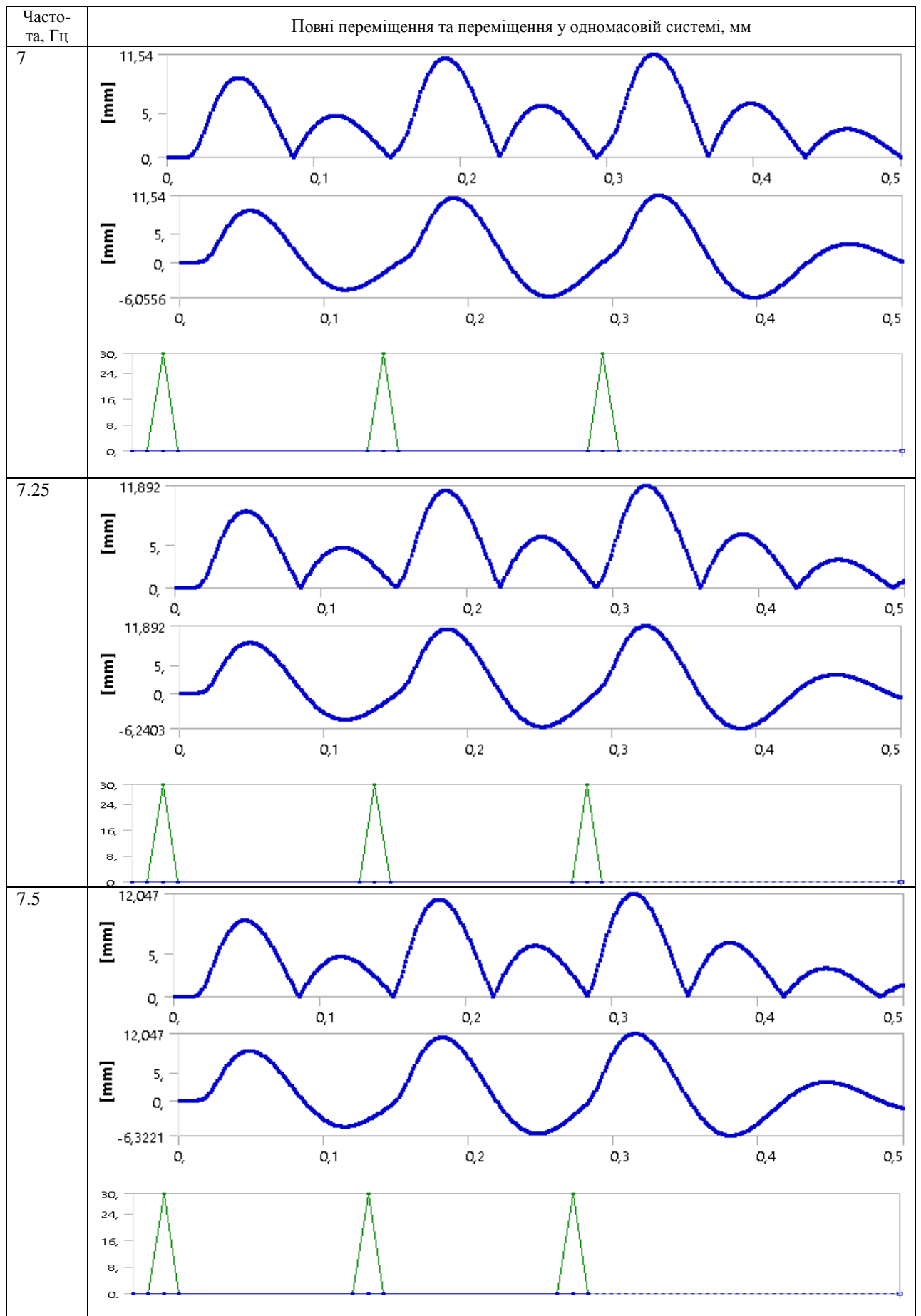
Mode	Frequency [Hz]
1,	7,7473
2,	83986
3,	84183
4,	96168
5,	96529
6,	98284

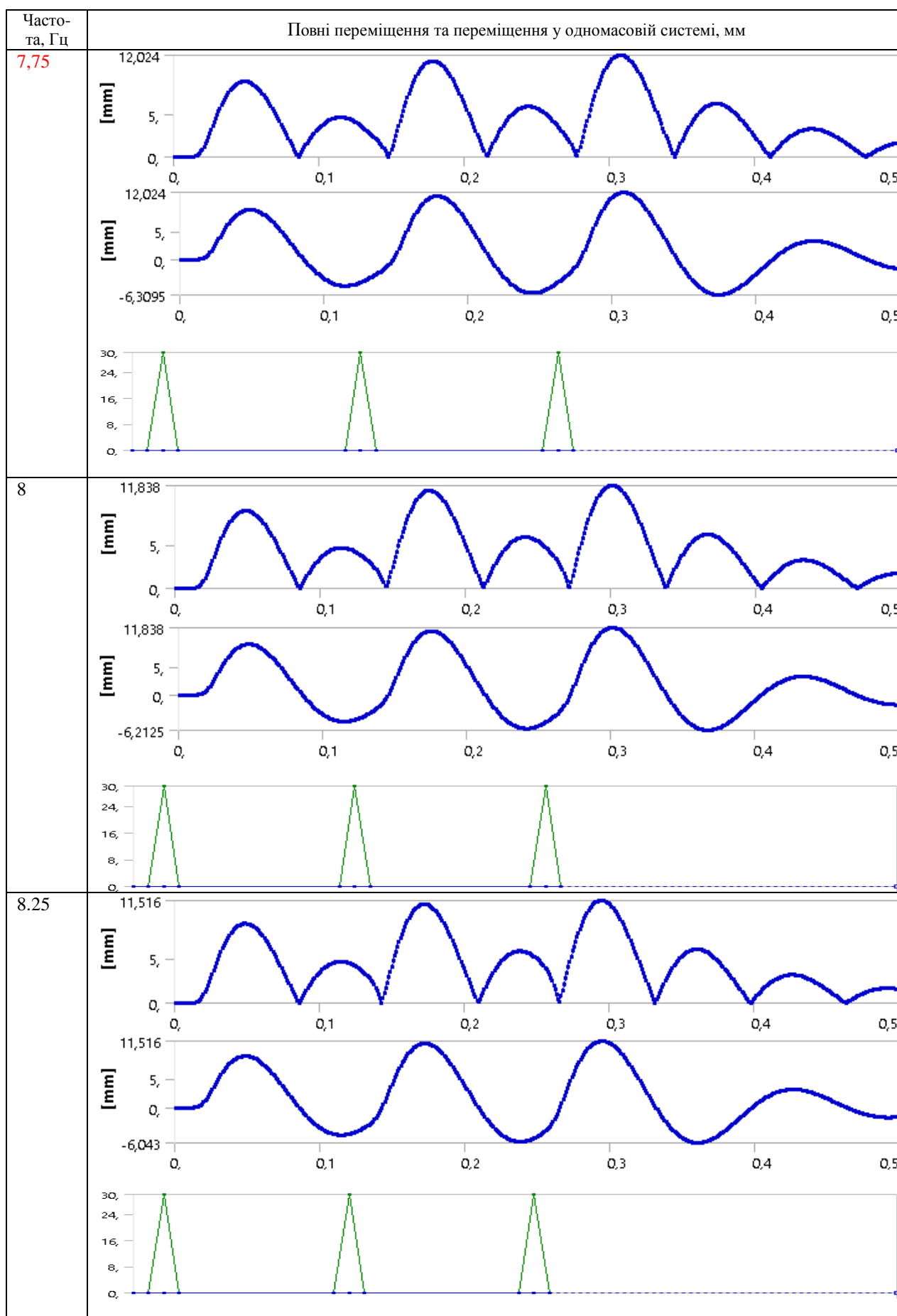
Рисунок 12 – Спектр ВЧК одномасової системи

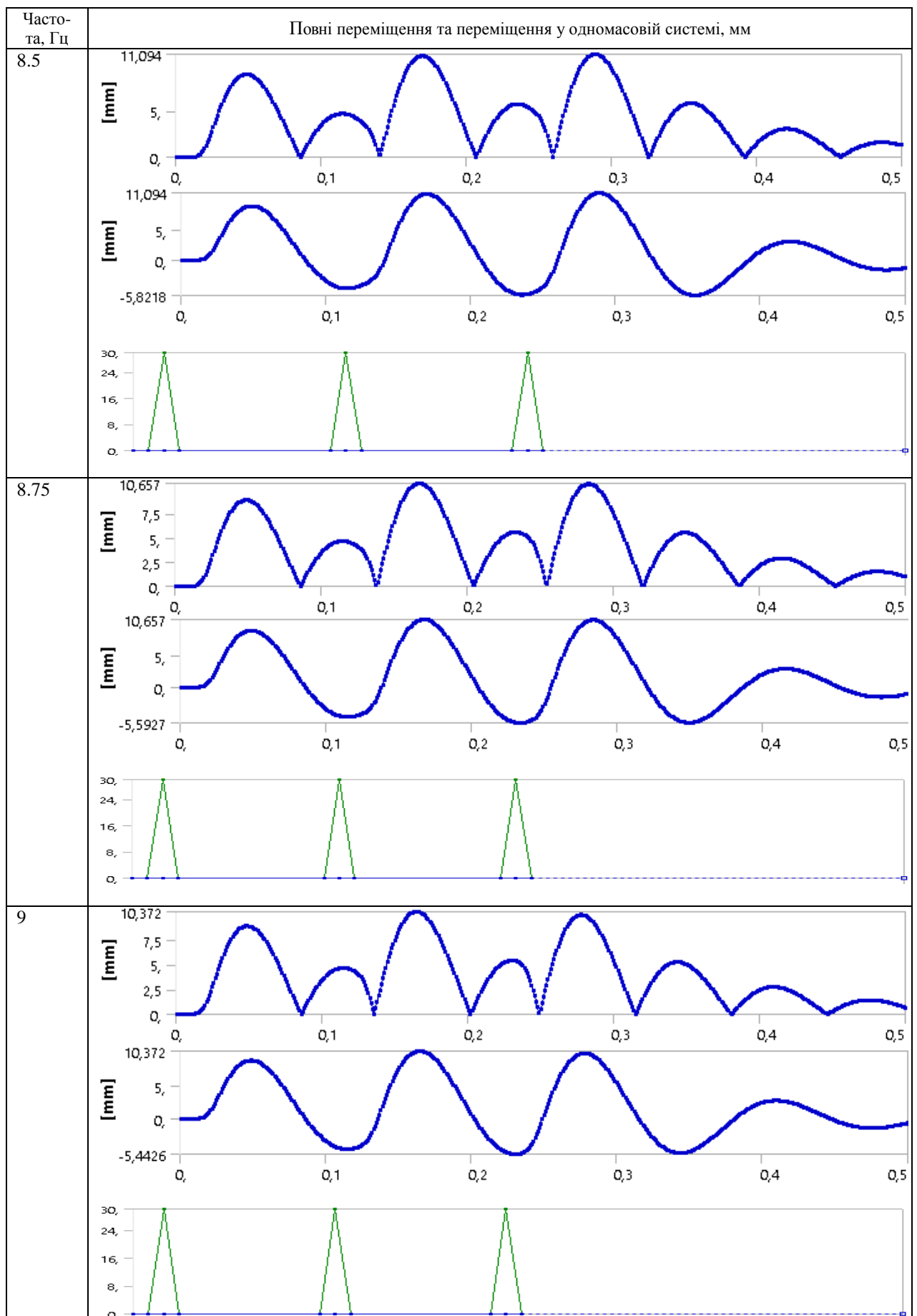
Таблиця 3 – Повні переміщення та переміщення (мм) у одномасовій системі для різних частот збурення, Гц

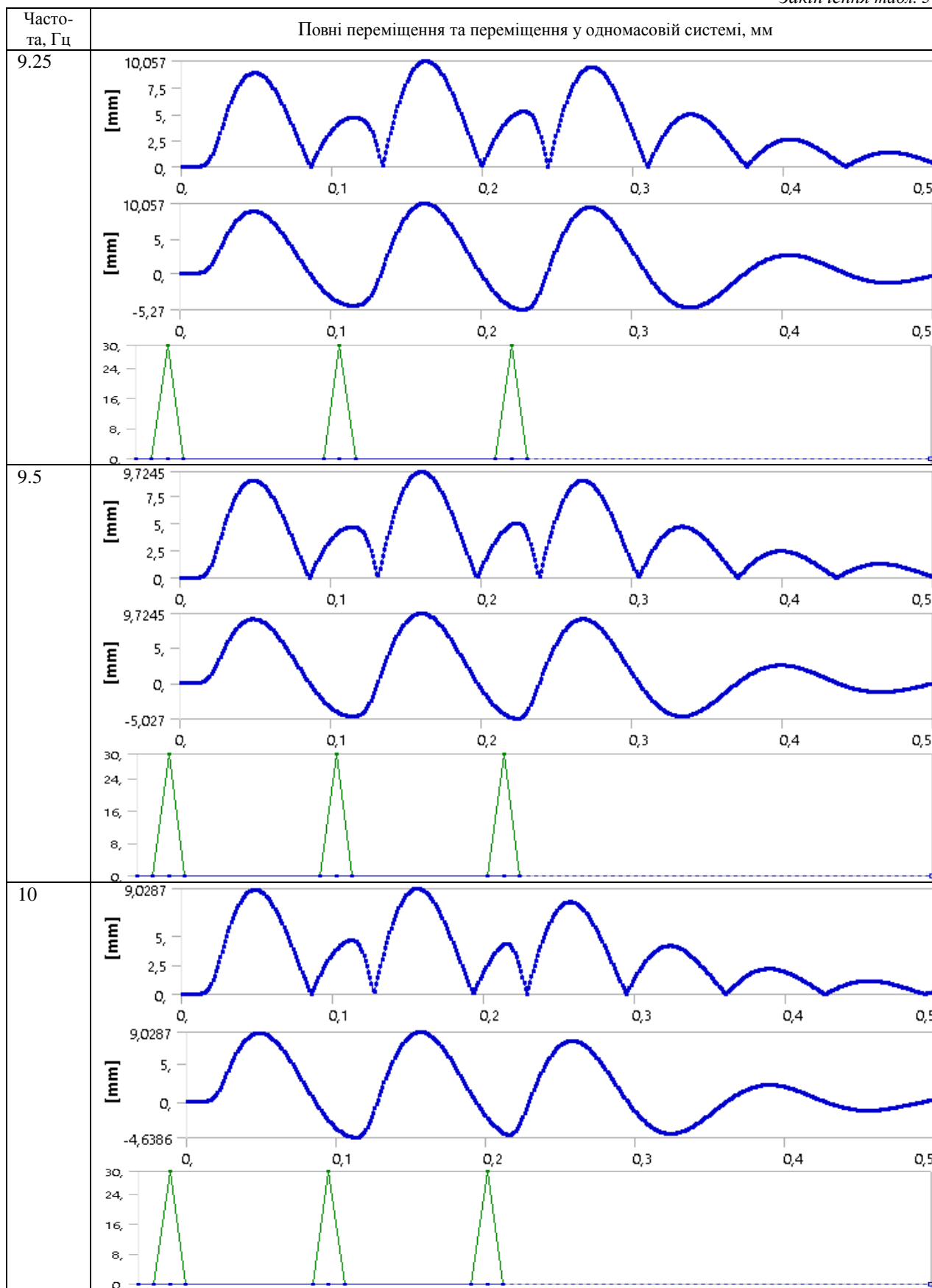












Аналіз отриманих результатів. Як видно із співставлення результатів чисельного моделювання реакції повномасштабної скінченно-елементної мо-

делі (I), спрощеної моделі (II) та найпростішої моделі (III), спостерігається якісна відповідність характеру динамічних процесів у всіх цих випадках. При

цьому слід відзначити, що ці системи піддаються не гармонійному, а поліімпульсному впливу. Разом із тим:

1) у цих системах через деякий час установлюється усталений процес;

2) розподіли переміщень у часі подібні для усіх систем;

3) при варіюванні частоти збудження у білярезонансній зоні характер процесів змінюється для всіх систем однотипно (рис. 13–15). Тут наведені такі позначення: USUM – максимум повних переміщень (мм); UZmin – мінімальні вертикальні переміщення (мм); UZmax – максимальні вертикальні переміщення (мм); UZmin – UZmax – розмах вертикальних переміщень (мм). Вони віднесені до відповідних значень на резонансній частоті. Вісь абсцис відповідає частоті збудження, віднесений до резонансної.

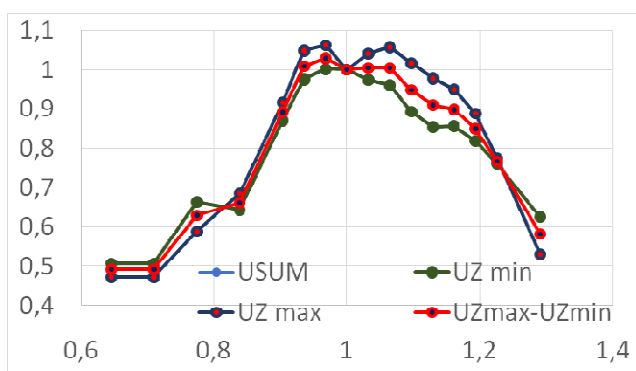


Рисунок 13 – Відносні переміщення у погонному кільці тестової моделі БТР-80

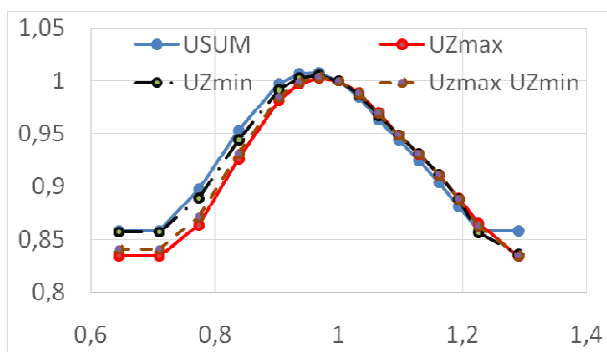


Рисунок 14 – Відносні переміщення у спрощеній системі

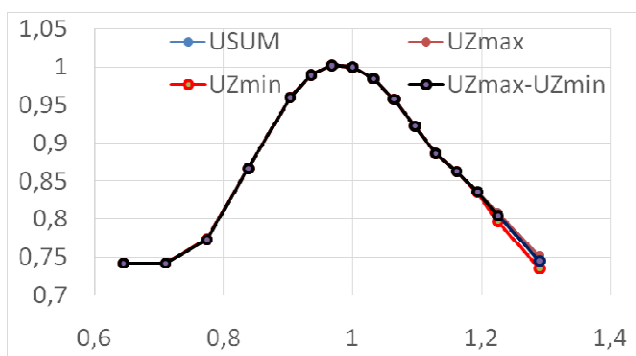


Рисунок 15 – Відносні переміщення у одномасовій системі

Висновки.

У роботі запропоновано новий підхід до аналізу динамічних процесів у корпусах легкоброньованих машин при дії серії імпульсних впливів. При цьому розв'язані такі задачі та отримані такі результати.

1. Розроблено концепцію створення множини параметричних моделей динамічних процесів у корпусах легкоброньованих машин на основі поєднання методу скінчених елементів та методу узагальненого параметричного моделювання. Це дає можливість варіювати об'єкт досліджень у ході розв'язання задач аналізу, а також обґрунтувати раціональні технічні рішення у ході розв'язання задач синтезу, наприклад, за критеріями міцності бронекорпусу чи забезпечення точності стрільби.

2. Для підвищення оперативності багатоваріантних чисельних досліджень реакції бронекорпусів на дію серії імпульсних впливів запропоновано застосувати спрощені моделі руху динамічної системи. При цьому виділяються власні форми, відповідні яким частоти близькі до основних гармонік збудження або їм кратних. Здійснюється аналіз процесів на спрощеній одномасовій моделі, що відповідає виділеній власній формі з еквівалентними масою та жорсткістю. При цьому варіюються параметри досліджуваної системи у інтервалі, який забезпечує близькість власних частот до визначених для повної моделі. На основі аналізу результатів досліджень на спрощених моделях розробляються рекомендації стосовно обґрунтування раціональних технічних рішень. При забезпеченні більш високої оперативності зберігається помірна точність результатів.

3. Після обґрунтування раціональних параметрів на спрощених моделях здійснюється поглиблений аналіз реакції бронекорпусів на дію серії імпульсних впливів.

Розроблений підхід апробований на тестовій конструкції «монотовщинного» макету бронекорпусу БТР-80. Продемонстровано його спроможність до розв'язання задач аналізу динамічних процесів при дії серії імпульсних впливів, які імітують реактивні сили віддачі при здійсненні стрільби.

Надалі буде розширено множину задач досліджень із застосуванням запропонованого підходу.

Список літератури

1. Чепков І. Б., Голуб В. А., Купрінко О. М., Лапицький С. В. Концептуальний підхід до формування перспективних типів бойових броньованих машин. *Науково-теоретичний та науково-практичний журнал*. 2013. № 2. С. 35–41.
2. 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*. Київ: ТОВ "Міжнародний виставковий центр". 2015. С. 8–14.
3. Чепков І. Б., Нор П. І. Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2014. № 1. С. 4–13.
4. Толстолуцкий В. А. *Математическое моделирование и анализ процессов в шасси колесных и гусеничных машин* / В. А. Толстолуцкий; под ред. Д. О. Волонцевича. Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. 171 с.
5. G. Liu [et al.] Dynamic Virtual Prototyping Modeling and Simulation of Special Vehicle. *Appl. Math.* 2015. Vol. 9. № 2L. P. 627–636.

6. Бруль С.Т., Ткачук Н.А., Васильев А.Ю., Карапейчик И.Н. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты. *Механіка та машинобудування*. 2011. №1. С. 66–73.
7. Ткачук Н.А. [и др.]. Ударные резонансы в бронекорпусах военных гусеничных и колесных машин при осуществлении стрельбы. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 3. С. 137–144.
8. Мельник Б.А. К вопросу о влиянии поперечно-угловых колебаний корпуса легкобронированных колесных машин на точность стрельбы. *Механіка та машинобудування*. X: НТУ «ХПИ». 2012. № 2. С. 118–121.
9. Танченко А. Ю., Ткачук М. А., Набоков А. В., Грабовський А. В., Малакей А. М. Нелінійні коливання елементів легкоброньованих машин: модельні задачі та якісні особливості. *Вісник НТУ «ХПИ», серія: Транспортне машинобудування*. 2018. № 29 (1305). С. 108–128.
10. Веретельник О. В., Мартиненко О. В., Костенко Ю. В., Набоков А. В., Мазур І. В. Динамічні процеси в елементах військових колісних та гусеничних машин при бойовому застосуванні. *Наука: безпека країни та розвиток військово-промислового комплексу: Інформаційно-комунікативний захід* (м. Київ, 12-13 жовтня 2016), відп. ред. В.С.Шовкалюк. Київ: ТОВ «Міжнародний виставковий центр». 2016. С. 37–42.
11. Jeng-Tzong C., Jia-Wei L., Kuen-Ting L. Analytical and numerical studies for solving Steklov eigenproblems by using the boundary integral equation method/boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Volume 114. P. 136–147.
12. Zhang Y. P., Wang C. M., Pedroso D. M., Zhang H. Extension of Hencky bar-net model for vibration analysis of rectangular plates with rectangular cutouts. *Journal of Sound and Vibration*. 2018. Volume 432. P. 65–87.
13. Smetankina N. V., Shupikov A. N., Sotrikhin S. Yu., Yareschenko V. G. Dynamic response of an elliptic plate to impact loading. Theory and experiment. *International Journal of Impact Engineering*. 2007. Vol. 34, № 2. P. 264–276.
14. Chakraverty S., Laxmi Behera. Free vibration of rectangular nanoplates using Rayleigh-Ritz method. *Physica E*. 2014. 56. P. 357–363.
15. Datta N. A., Thekinen J. D. Rayleigh-Ritz based approach to characterize the vertical vibration of non-uniform hull girder. *Ocean Engineering*. 2016. 125. P. 113–123.
16. Shia D., Liua T., Wangb Q., Lan Q. Vibration analysis of arbitrary straight-sided quadrilateral plates using a simple first-order shear deformation theory. *Results in Physics*. 2018. 11. P. 201–211.
17. Yu H., Wujun C., Yufeng C., Daxu Z., Zhenyu Q. Modal behaviors and influencing factors analysis of inflated membrane structures. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 132. P. 413–427.
18. Грабовський А. В., Ткачук Н. А., Танченко А. Ю., Ткачук Н. Н., Мазур І. В. Чувствительность собственных форм колебаний систем с несколькими степенями свободы к варьированию параметров динамической системы. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2015. №43 (1152). С. 25–29.
19. Грабовський А. В. Зависимость собственных частот и собственных форм колебаний от инерционно-жесткостных характеристик систем с конечным числом степеней свободы. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2015. №46 (1155). С. 11–16.
20. Ткачук Н. А., Заворотный А. В., Грабовський А. В., Литвиненко А. В., Климов В. Ф., Богач А. С., Храмова И. Я., Пархонюк И. П. Анализ чувствительности вибрационных характеристик бронекорпусов к изменению проектно-технологических параметров. *Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал*. Харків: НТУ «ХПИ». 2017. № 1. С. 38–46.
21. Грабовський А. В., Ткачук М. А., Мерецька К. О., Ткачук М. М., Васильев А. Ю., Бондаренко М. О., Скрипченко Н. Б. Вплив варіюваних параметрів на власні коливання бронекорпусів легкоброньованих машин. *Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал*. Харків: НТУ «ХПИ». 2018. № 1. С. 65–74.
22. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Чепурной А.Д., Орлов Е.А., Ткачук Н.Н. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания. *Механіка та машинобудування*. 2006, №1. С. 57–79.
23. Ткачук Н. А., Рикунев О. Н., Танченко А. Ю., Малакей А. Н., Мазур А. Н., Мазур И. В., Набоков А. В. Влияние массово-инерционных характеристик боевого модуля, бронекорпуса и подвески на динамические процессы при осуществлении стрельбы. *Механіка та машинобудування*. 2014. №1. С. 83–91.
24. Рикунев О.Н., Набоков А.В., Мазур И.В., Белов Н.Л., Шейко А.И., Ткачук Н.А. Специализированные программно-модельные комплексы для анализа динамических процессов. *Механіка та машинобудування*. 2014. № 1. С. 123–127.
25. Пановко Я. Г., Губанова И. И. *Устойчивость и колебания упругих систем*. Москва: Наука, 1979. 384 с.

References (transliterated)

1. Chepkov I. B., Golub V.A., Kuprinenko O.M., Lapy`cz`ky`j S.V. Konceptual`ny`j pidxid do formuvannya perspekty`vny`x ty`piv bojovy`x bron`ovany`x mashy`n. *Naukovo-teorety`chny`j ta naukovo-prakty`chny`j zhurnal*. 2013, no. 2, pp. 35–41.
2. Chepkov I. B. Osnovni napryamy` rozvy`tku ozbroynnya i vijs`kovoyi teknyky`. *Organizacijni i ekonomichni mexanizmy` derzhavnoi pidtry`mky` oboronomoi promy`slivosti. Perspekty`vy` naukovo-tekhnologichnogo zabezpechnya oboronno-promy`slivogo kompl`ksu Ukrainy`*: *Informacijno-komunikaty`vny`j zaxid*. Ky`yiv: TOB «Mizhnarodny`j vy`stavkovy`j centr». 2015, pp. 8–14.
3. Chepkov I. B., Nor P. I. Zagal`ni tendencyi rozvy`tku ozbroynnya ta vijs`kovoyi teknyky`. *Ozbroynnya ta vijs`kova teknyka*. 2014, no. 1, pp. 4–13.
4. Tolstoluckij V. A. *Matematicheskoe modelirovanie i analizy` processov v shassi kolesnyh i gusenichnyh mashin* / V. A. Tolstoluckij; pod red. D. O. Voloncevicha. Khar`kov: NTU «KhPI», 2013. 171 p.
5. G. Liu [et al.] Dynamic Virtual Prototyping Modeling and Simulation of Special Vehicle. *Appl. Math*. 2015, Vol. 9, no. 2L, pp. 627–636.
6. Brul` S.T., Tkachuk N.A., Vasil`ev A.Ju., Karapejchik I.N. Modelirovanie fiziko-mehaničeskich processov v korpusah legkobronirovannyh mashin: podhody, modeli, jeffekty. *Mexanika ta mashy`nobuduvannya*. 2011, no.1, pp. 66–73.
7. Tkachuk N.A. [i dr.]. Udarnye rezonansy v bronekorpusah voennyh gusenichnyh i kolesnyh mashin pri osushhestvlenii strel`by. *Integrovani tekhnologiyi ta energozberezhennya*. 2014, no. 3, pp. 137–144.
8. Mel`nik B.A. K voprosu o vlijanii poperečno-uglovyh kolebanij korpusa legkobronirovannyh kolesnyh mashin na točnost` strel`by. *Mexanika ta mashinobuduvannya*. Kharkiv: NTU «KhPI». 2012, no. 2, pp. 118–121.
9. Tanchenko A. Yu., Tkachuk M. A., Nabokov A. V., Grabovs`ky`j A. V., Malakej A. M. Nelinijni koly`vannya elementiv legkobron`ovany`x mashy`n: model`ni zadachi ta yakisni osobly`vosti. *Visny`k NTU «KhPI», seriya: Transportne mashy`nobuduvannya*. 2018, no. 29 (1305), pp. 108–128.
10. Veretel`ny`k O. V., Martynenko O. V., Kostenko Yu. V., Nabokov A. V., Mazur I. V. Dy`namichni procesy` v elementax vijs`kovy`x kolisny`x ta gusenychny`x mashy`n pry` bojovomu zastovuvanni. *Nauka: bezpeka krayiny` ta rozvy`tok vijs`kovopromy`slivogo kompleksu: Informacijno-komunikaty`vny`j zaxid* (m. Ky`yiv, 12-13 zhovtnya 2016), vidp. red. V.S.Shovkalyuk. Ky`yiv: TOB «Mizhnarodny`j vy`stavkovy`j centr». 2016, pp. 37–42.
11. Jeng-Tzong C., Jia-Wei L., Kuen-Ting L. Analytical and numerical studies for solving Steklov eigenproblems by using the boundary integral equation method/boundary element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020, Volume 114, pp. 136–147.
12. Zhang Y. P., Wang C. M., Pedroso D. M., Zhang H. Extension of Hencky bar-net model for vibration analysis of rectangular plates with rectangular cutouts. *Journal of Sound and Vibration*. 2018, Volume 432, pp. 65–87.
13. Smetankina N. V., Shupikov A. N., Sotrikhin S. Yu., Yareschenko V. G. Dynamic response of an elliptic plate to impact loading. Theory and experiment. *International Journal of Impact Engineering*. 2007, Vol. 34, no. 2, pp. 26–276.
14. Chakraverty S., Laxmi Behera. Free vibration of rectangular nanoplates using Rayleigh-Ritz method. *Physica E*. 2014, 56, pp. 357–363.
15. Datta N. A., Thekinen J. D. Rayleigh-Ritz based approach to characterize the vertical vibration of non-uniform hull girder. *Ocean Engineering*. 2016, 125, pp. 113–123.

16. Shia D., Liua T., Wangb Q., Lan Q. Vibration analysis of arbitrary straight-sided quadrilateral plates using a simple first-order shear deformation theory. *Results in Physics*. 2018, 11, pp. 201–211.
17. Yu H., Wujun C., Yufeng C., Daxu Z., Zhenyu Q. Modal behaviors and influencing factors analysis of inflated membrane structures. *Engineering Structures*. 2017, Vol. 132, pp. 413427.
18. Grabovskij A. V., Tkachuk N. A., Tanchenko A. Ju., Tkachuk N. N., Mazur I. V. Chuvstvitel'nost' sobstvennyh form kolebanij sistem s neskol'kimi stepenjami svobody k var'irovaniyu parametrov dinamičeskoj sistemy. *Vestnik NTU «KhPI»*. Khar'kov: NTU «KhPI». 2015, no. 43 (1152), pp. 25–29.
19. Grabovskij A. V. Zavisimost' sobstvennyh chastot i sobstvennyh form kolebanij ot inercionno-zhestkostnyh harakteristik sistem s konečnym chislom stepenej svobody. *Vestnik NTU «KhPI»*. Khar'kov: NTU «KhPI». 2015, no.46(1155), pp. 11-16.
20. Tkachuk N. A., Zavorotnyj A. V., Grabovskij A. V., Litvi-nenko A. V., Klimov V. F., Bogach A. S., Hramcova I. Ja., Pa-rhonjuk I. P. Analiz chuvstvitel'nosti vibracionnyh harakteristik bronekorpusov k izmeneniju proektno-tehnologičeskih parametrov. *Mexanika ta mashy'nobuduvannya. Naukovo-technichnyj zhurnal*. Khar'kov: NTU «KhPI». 2017, no. 1, pp. 38–46.
21. Grabovs'kyj A. V., Tkachuk M. A., Merecz'ka K. O., Tka-chuk M. M., Vasy'Gyev A. Yu., Bondarenko M. O., Skry'pchenko N. B. Vplyv varijovany'x parametriv na vlasni koly'vannya bronekorpusiv legkobron'ovany'x mashy'n. *Mexanika ta mashy'nobuduvannya. Naukovo-technichnyj zhurnal*. Khar'kov: NTU «KhPI». 2018, no 1, pp. 65–74.
22. Tkachuk N.A., Gricenko G.D., Chepurnoj A.D., Orlov E.A., Tkachuk N.N. Konečno-jelementnye modeli jelementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija. *Mexanika ta mashy'nobuduvannya*. 2006, no. 1, pp. 57–79.
23. Tkachuk N.A., Rikunov O.N., Tanchenko A.Ju., Malakej A.N., Mazur A.N., Mazur I.V., Nabokov A.V. Vlijanie massovo-inercionnyh harakteristik boevogo modulja, bronekorpusa i podveski na dinamičeskie processy pri osushhestvlenii strel'by. *Mexanika ta mashy'nobuduvannya*. 2014, no. 1, pp.83–91.
24. Rikunov O.N., Nabokov A.V., Mazur I.V., Belov N.L., Shejko A.I., Tkachuk N.A. Specializirovannye programmno-model'nye komplekсы dlja analiza dinamičeskih processov. *Mexanika ta mashy'nobuduvannya*. 2014, no. 1, pp. 123–127.
25. Panovko Ja. G., Gubanova I. I. *Ustojchivost' i kolebanija uprugih sistem*. Moscow: Nauka, 1979. 384 p.

Поступила (received) 20.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola A.) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачий кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

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.

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey) – 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: <http://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Рікунов Олег Миколайович (Рикунов Олег Николаевич, Rikunov Oleg) – кандидат технічних наук, викладач, Національна академія Національної гвардії України, кафедра «Експлуатація та ремонт автомобілів та бойових машин»; м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902.

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

Марусенко Світлана Іванівна (Марусенко Светлана Ивановна, Marusenko Svitlana) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1340-5491>; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Храмцова Ірина Яківна (Храмцова Ирина Яковлевна, Khramtsova Iryna) – науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «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) – провідний інженер, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин»; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076901; e-mail: olgavk12@gmail.com

Прокопенко Микола Вікторович (Прокопенко Николай Викторович, Prokopenko Nickolay) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет, «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; тел.: (050) 754-41-35; e-mail: kola0123@ukr.net.

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

Чала Юлія Сергійівна (Чалая Юлия Сергеевна, Chala Yuliia) – студентка гр. МІТ87Б(ТМ), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: s1713@tmm-sapr.org