

УДК 539.3: 623.4

**О.В. ХЛАНЬ****РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ДОСЛІДЖУВАНИХ СТАНІВ В ЕЛЕМЕНТАХ БОЙОВИХ МАШИН ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЇХ ВИРОБНИЦТВА**

У роботі описано структуру спеціалізованого програмно-модельного комплексу для дослідження процесів і станів в елементах бойових машин та технологічних систем для їх виробництва. Верифікація чисельних моделей досліджуваних об'єктів здійснена на прикладі розв'язання тестових задач. Досягнена висока точність моделювання напружено-деформованого стану та динамічних характеристик низки об'єктів. Це дає можливість розв'язувати за допомогою розробленого спеціалізованого програмно-модельного комплексу прикладні задачі аналізу процесів і станів в елементах бойових машин та технологічних систем для їх виробництва. Крім того, це уможливає також розв'язання задач обґрунтування проектно-технологічно-виробничих чинників, які забезпечують високі технічні та тактико-технічні характеристики елементів досліджуваних механічних систем.

**Ключові слова:** міцність, напружено-деформований стан, власна частота коливань, власна форма коливань, розрахунково-експериментальний метод, метод скінченних елементів, спектр частот власних коливань

**А.В. ХЛАНЬ****РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ИССЛЕДУЕМЫХ СОСТОЯНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ БОЕВЫХ МАШИН И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ИХ ПРОИЗВОДСТВА**

В работе описана структура специализированного программно-модельного комплекса для исследования процессов и состояний в элементах боевых машин и технологических систем для их производства. Верификация численных моделей исследуемых объектов осуществлена на примере решения тестовых задач. Достигнута высокая точность моделирования напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик ряда объектов. Это дает возможность решать с помощью разработанного специализированного программно-модельного комплекса прикладные задачи анализа процессов и состояний в элементах боевых машин и технологических систем для их производства. Кроме того, это делает возможным также решение задач обоснования проектно-технологически-производственных факторов, которые обеспечивают высокие технические и тактико-технические характеристики элементов.

**Ключевые слова:** прочность, напряженно-деформированное состояние, собственная частота колебаний, собственная форма колебаний, расчетно-экспериментальный метод, метод конечных элементов, спектр частот собственных колебаний

**О. V. KHLAN****CALCULATION AND EXPERIMENTAL RESEARCHES FOR JUSTIFICATION OF NUMERICAL MODELS PARAMETERS FOR INVESTIGATED STATES IN ELEMENTS OF COMBAT VEHICLES AND TECHNOLOGICAL SYSTEMS FOR THEIR MANUFACTURING**

The paper describes the structure of a specialized software and model complex for the research of processes and states in elements of combat vehicles and technological systems for their production. Verification of numerical models of investigated objects is carried out on an example of test tasks solving. The high accuracy of the stress-strain state modeling and dynamic characteristics of a number of objects has been achieved. This makes it possible to solve applied problems of analysis of processes and states in the elements of combat vehicles and technological systems for their production with the help of the developed specialized software and model complex. In addition, it also enables to solve the tasks of justification of design and technological-production factors, which provide high technical and tactical and technical characteristics of investigated mechanical systems elements.

**Keywords:** strength, stress-strain state, natural-vibration frequency, natural-vibration form, finite element method, calculation and experimental method, finite element method, natural-vibration frequency spectrum.

**Вступ.** Для обґрунтування проектно-технологічно-виробничих рішень елементів бойових броньованих машин (ББМ) та технологічних систем (ТС) для їх виготовлення необхідно проводити чисельний аналіз процесів і станів у елементах цих машин та систем [1–7]. Для цього був розроблений спеціалізований програмно-модельний комплекс "Баланс" (рис. 1). Розроблена та представлена на рисунку структура роботи спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК) передбачає, крім розв'язання низки прикладних задач, також паралельне проведення процедур верифікації розрахункових моделей досліджуваних елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення (етапи 8, 9). Це дуже важливі етапи досліджень, оскільки саме експериментальні дослідження є об'єктивними джерелами інформації про поведінку реальних об'єктів. При цьому, оскільки вони є завершальними для створеного СПМК,

то тестуються також і етапи та модулі 1–7 (див. рис. 1), які відповідають за формування параметричних моделей, аналіз процесів і станів в елементах бойових машин та технологічних систем для їх виробництва, а також формування бази результатів.

**Структура досліджень.** Для проведення досліджень залучаються раніше запропоновані у роботах [6, 7] методи та моделі. Слід відзначити проблемні моменти, які супроводжують етапи досліджень за допомогою СПМК "Баланс". Вони стосуються того, що традиційні підходи передбачають проведення експериментальних досліджень на кінцевій їх стадії. При цьому невідповідність результатів чисельних і експериментальних досліджень, встановлена наприкінці цілого комплексу розробок, змушує проводити коригування моделей та методів комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів і станів, а потім –

© О. В. Хлань, 2018

повторення розрахунків. Це – дуже неекономний підхід. На противагу йому у роботах [1–5] було запропоновано багатостадійний процес паралельного розрахунково-експериментального дослідження за схемою "фрагмент – макет – виріб". Це значно підвищує точність та оперативність розв'язання поставлених задач. Разом із тим є потенціальні можливості удосконалення навіть цих підходів. Вони стосуються того, що можливо розділити розрахунково-експериментальні дослідження на етапи не тільки в аспекті "об'єкту" (тобто поступово його наближаючи фрагментом, макетом, а на завершення – самим дослідним зразком). Дійсно, можна виокремити окремі важливі напрямки у розрізі "математична

модель – чисельні методи – комп'ютерні моделі", і створювані моделі узгоджуватимуться за окремими показниками, не прив'язуючись до реального об'єкту, а тільки до суттєвих особливостей модельованих процесів і станів. Це дає ще більшу оперативність досліджень, оскільки ще до з'ясування конкретних конструктивних, технологічних чи виробничих рішень з'являється можливість уточнення окремих властивостей математичних, чисельних чи експериментальних моделей. Це відображено на рис. 2 у вигляді багатоступових етапів *I*, *D*, *E*, *C* (на відміну від одношарових, як у [1–5]).

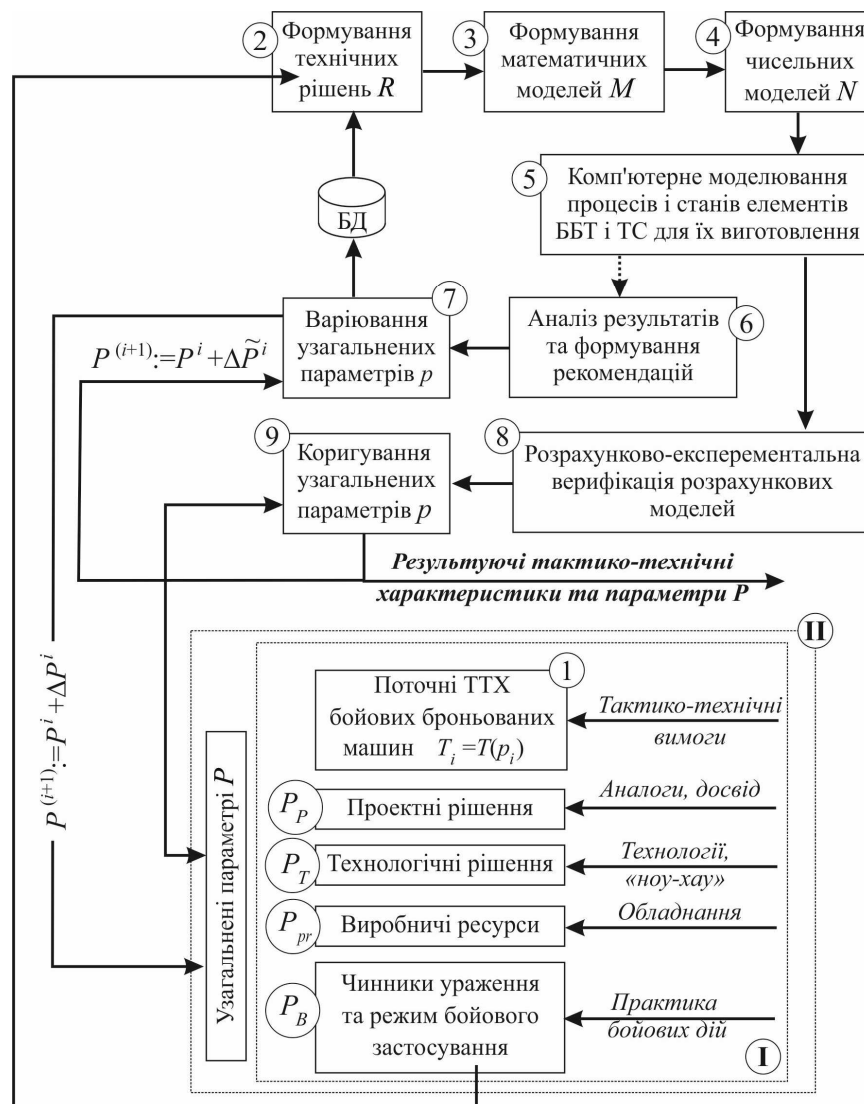


Рис. 1 – Структура роботи спеціалізованого програмно-модельного комплексу "Баланс"

Кожний шар будь-якого етапу може стосуватися тільки певних проблемних властивостей досліджуваного об'єкта. Наприклад, для елементів типу базових плит оснащення для верстатів з ЧПК важливим є визначення допустимості застосування для визначення їхнього напружено-деформованого стану, власних частот та форм коливань моделей тон-

костінних пластин. Для дисків при пружно-пластичному деформуванні важливим є установлення кількості скінчених елементів, які моделюють НДС із прийнятною точністю. Для критичних швидкостей обертання важливим є похибка чисельного моделювання порівняно із експериментальними даними.

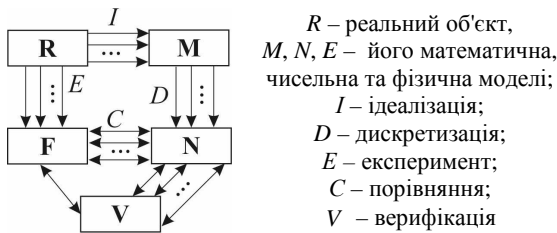


Рис. 2 – Пропонована структура розрахунково-експериментальних досліджень

Усі перелічені властивості стосуються різних математичних, чисельних та фізичних моделей відповідно.

Завдяки цьому проблемні питання верифікації можна вирішувати на різних етапах на різних моделях, навіть не маючи у розпорядженні кінцевої картини технічних рішень для елементів ББМ та ТС, а тільки – концептуальні варіанти. Отже, стає можливим перенести етапи верифікації на більш ранні етапи розробок, тим самим досягаючи суттєвої економії термінів та коштів на етапах проектування, технологічної підготовки виробництва та виготовлення об'єктів бронетанкової техніки.

Ефективність запропонованого варіанту методу продемонстрована на прикладі напружено-деформованого стану та власних коливань пластин із системою отворів (визначається допустимість моделювання НДС елементів технологічних систем типу базових плит на основі моделей пластин).

Експериментальні дослідження проводяться або на стендах із довільно обраними виробами, які мають характерні властивості, або як побічний результат обов'язкових випробувань виробів, передбачених чинними нормативними вимогами. Це ще один із принципово нових аспектів методу розрахунково-експериментальної верифікації розрахункових моделей досліджуваних об'єктів.

Отже, досягається, по-перше, економія, а, по-друге, – забезпечується достовірність результатів. Відповідно до нього, додатковою базою експериментальних даних є результати не тільки спеціально підготовлених додаткових експериментів, але й обов'язкових випробувань, передбачених документацією на виріб.

**Результати розрахунково-експериментальних досліджень.** Для прикладу обирається пластина із сталі 20 із розмірами у плані  $180 \times 180$  мм, жорстко закріплена на контурі. Товщина пластини – 1, 2, 3, 4 та 5 мм. У пластині – система отворів  $\varnothing 5, 10,$

20 мм. (рис. 3).

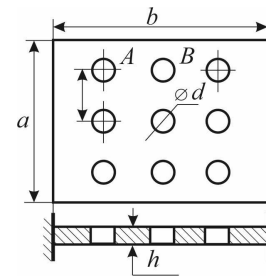


Рис. 3 – Приклад розрахункової схеми пластини, жорстко закріпленої на контурі й навантаженої силою в центрі

На систему в центрі діє сила  $P$ , яка спричиняє прогин у точці прикладання сили на величину  $\Delta$  (1 мм). Визначається напружено-деформований стан пластини на основі математичних моделей вигину пластин, з одного боку, та тривимірного напружено-деформованого стану тіла складної форми, – з іншого. Результати розрахункових досліджень за цими двома моделями порівнюються між собою, а надалі – із даними експериментальних досліджень НДС пластин методом голографічної інтерферометрії.

На рис. 4 наведено скінченно-елементні моделі досліджуваних пластин. Як САЕ-система використовувався ANSYS-Workbench. Зокрема, аналізувалися: напружено-деформований стан та власні частоти коливань при варіюванні різних параметрів. На рис. 5–10 наведені картини розподілу компонент напружено-деформованого стану досліджуваної пластини при рівних товщинах  $h$ , в табл. 1, на рис. 11–17 – власні форми коливань та спектр власних частот коливань залежно від зміни тих же параметрів. Порівняння із раніше отриманими результатами свідчить про їх задовільну узгодженість.

Таким чином, для експрес-аналізу жорсткісних характеристик пластинчастих елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення можливе застосування моделей вигину пластин. Це дає змогу оперативного визначити їхній напружено-деформований стан, формувати рекомендації щодо проектно-технологічно-виробничих параметрів, а для більш детального визначення розподілу переміщень  $i$  (особливо) деформацій та напружень (зокрема, у районах отворів) необхідне залучення моделей у повній просторовій постановці задачі теорії пружності.

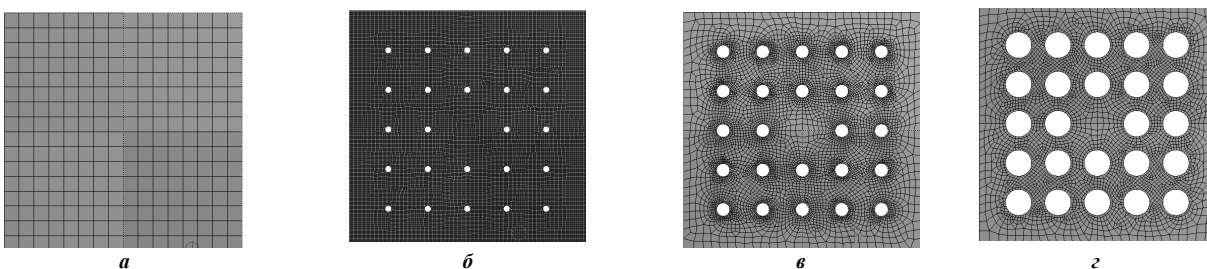


Рис. 4 – Скінченно-елементні моделі досліджуваних пластин, діаметр отворів:  $a$  – без отворів,  $b$  – 5 мм,  $v$  – 10 мм,  $z$  – 20 мм

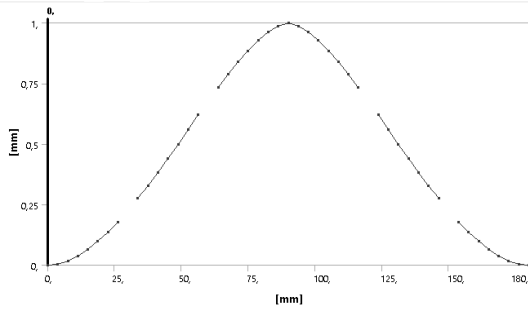


Рис. 5 – Розподіл прогинів у пластині з отворами  $\varnothing$  5 мм

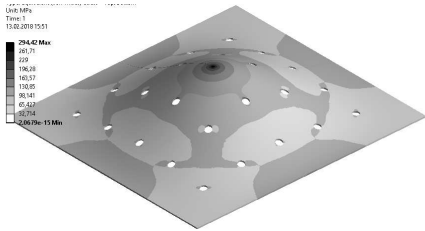
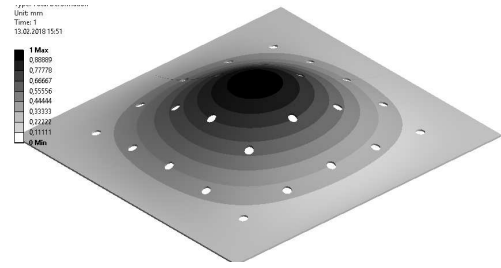


Рис. 6 – Розподіл еквівалентних напружень у пластині з отворами  $\varnothing$  5 мм

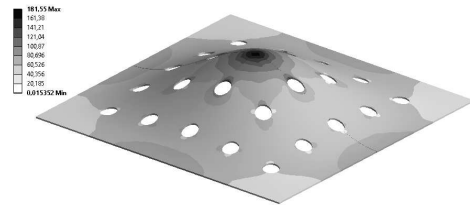


Рис. 7 – Розподіл еквівалентних напружень у пластині з отворами  $\varnothing$  10 мм

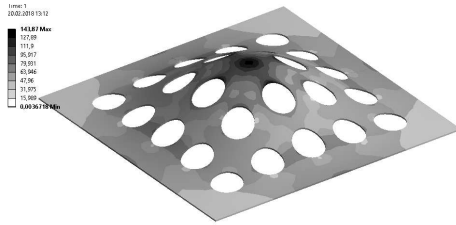


Рис. 8 – Розподіл еквівалентних напружень у пластині з отворами  $\varnothing$  20 мм

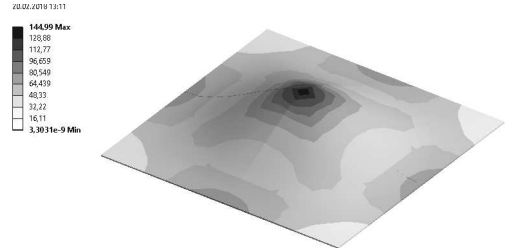


Рис. 9 – Розподіл еквівалентних напружень у суцільній пластині

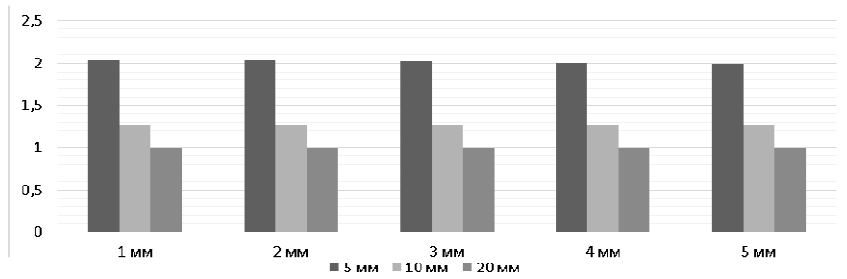


Рис. 10 – Залежність напружень, віднесених до напружень у суцільній пластині, від діаметра отворів

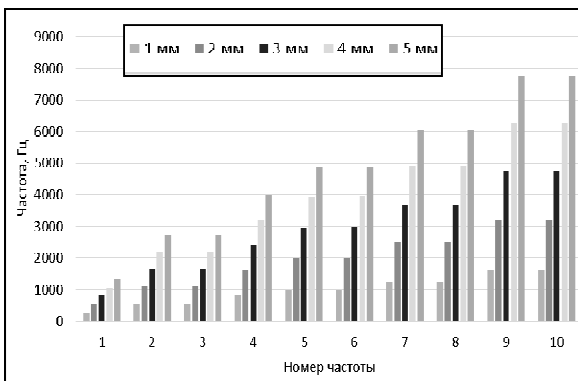


Рис. 11 – Власні форми коливань для суцільної пластини

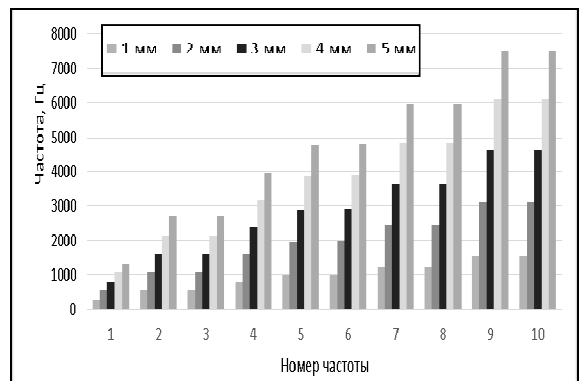


Рис. 12 – Власні форми коливань пластин з отворами  $\varnothing$  5 мм

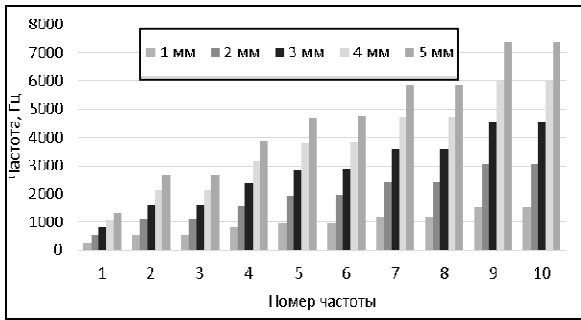


Рис. 13 – Власні форми коливань пластин з отворами  $\varnothing$  10 мм

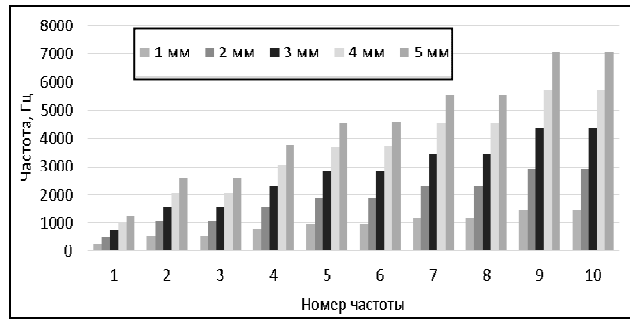


Рис. 14 – Власні форми коливань пластин з отворами  $\varnothing$  20 мм

Таблиця 1 – Власні форми коливань ( $\varnothing$  10 мм, товщина – 1 мм)

№ частоти	Максимальні значення, Гц	Власні форми коливань	№ частоти	Максимальні значення, Гц	Власні форми коливань
1	160,27 160,27 Max 142,46 104,65 89,099 71,231 53,423 35,615 17,888 0 Min		2	169,93 169,93 Max 151,05 132,17 113,29 94,404 75,523 56,643 37,762 18,881 0 Min	
4	148,21 148,21 Max 131,24 112,49 94,009 76,241 58,472 40,704 22,936 14,648 0 Min		6	188,78 188,78 Max 167,81 146,89 125,85 104,88 83,903 62,927 41,951 20,976 0 Min	
7	171,4 171,4 Max 152,26 133,31 114,27 95,223 76,179 57,134 38,089 19,045 0 Min		10	160,24 160,24 Max 142,43 124,63 106,83 89,021 71,217 53,413 35,609 17,804 0 Min	

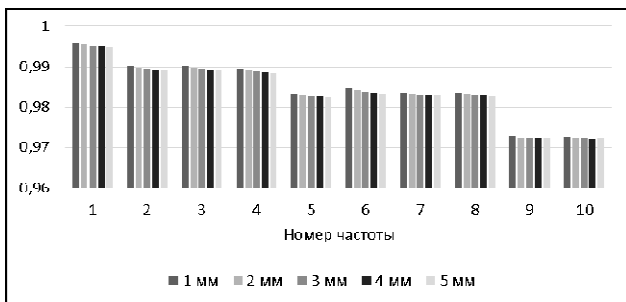


Рис. 15 – Відносні власні частоти коливань для пластин товщиною 5 мм

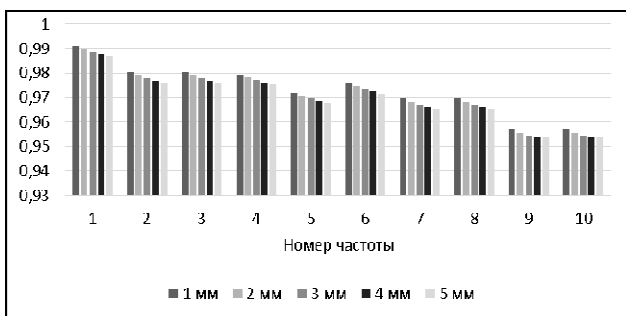


Рис. 16 – Відносні власні частоти коливань для пластин товщиною 10 мм

Підсумовуючи результати проведення розрахунково-експериментальних досліджень, можна зробити загальний висновок, що при їх здійсненні отримали підтвердження або обґрунтовану корекцію побудованих чисельні та математичні моделі, методи та підходи до розв'язання прикладних задач. На цій основі різко підвищується рівень адекватності побудованих моделей, точності результатів та достовірності рекомендацій.

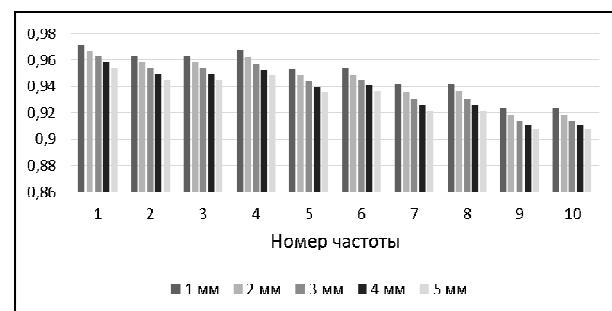


Рис. 17 – Відносні власні частоти коливань для пластин товщиною 20 мм

Важливо, що ці дослідження або передують основним етапам досліджень, або побудовані, так-

би мовити, на побічних результатах обов'язкових випробувань. Таким чином, економляться час та ресурси, а на основні етапи досліджень можна виходити з уже верифікованими моделями, що гарантує високу ефективність проектно-технологічно-виробничого забезпечення технічних і тактико-технічних елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення.

**Висновки.** У роботі описано структуру розробленого на основі нових підходів, методів та моделей спеціалізованого програмно-модельного комплексу, результати розв'язання низки тестових задач, а також розрахунково-експериментальної верифікації розрахункових моделей елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення. При цьому можна зробити наступні висновки.

1. Розроблена структура спеціалізованого програмно-модельного комплексу не просто реалізує запропоновані на основі узагальненого параметричного моделювання підходи, моделі та методи досліджень, але й розширює їх; зокрема, передбачено ітераційне покрокове уточнення не тільки поточного наближення шуканого розв'язку задачі синтезу проектно-технологічно-виробничих параметрів, але й коригування параметрів чисельних моделей. Це створює, на відміну від відомих підходів, основу для більш точних, обґрунтованих та достовірних технічних рішень елементів бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виготовлення.

2. Розрахунково-експериментальні дослідження, які були проведені на пластинах, додатково продемонстрували важливість урахування множини проектно-технологічно-виробничих чинників, які раніше або не брали до уваги, або враховувалися неналежним чином, причому як у бік надмірного підвищеного рівня вимог, так і – необґрунтовано заниженого. При цьому такі дослідження здійснено, на відміну від традиційних методик, не на натурному об'єкті, фрагменті чи макеті, а на простих об'єктах, де ці чинники присутні та яскраво виражені. Таким чином, без залучення додаткових ресурсів та без суттєвих часових витрат досягається висока достовірність та точність комп'ютерного моделювання процесів і станів у елементах бойових броньованих машин та технологічних систем для їх виробництва, які проектуються, проходять технологічну підготовку, виготовляються на підприємствах вітчизняного бронетанкобудування.

Таким чином, розроблена інноваційна структура СПМК була апробована, протестована та адаптована для подальших досліджень. Зокрема, надалі передбачається розв'язання низки прикладних задач.

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

**Хлань Олександр Володимирович (Хлань Александр Владимирович, Khlan Oleksandr)** – генеральний директор ДП "Завод ім. В.О. Малишева", м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902, e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org).

#### Список літератури

1. Карапейчик И.Н., Литвиненко А.В., Бруль С.Т. [и др.] Расширенная расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств специального назначения. *Вісник НТУ "ХПИ"*. Харків, 2012. № 22. С. 69–77.
2. Литвиненко А.В. Комплексные экспериментальные исследования динамических характеристик фрагментов, макетов и натуральных образцов элементов бронекорпусов транспортных средств специального назначения. *Вісник НТУ "ХПИ"*. Харків, 2013. № 1 (975). С. 85–93.
3. Ткачук Н.Н., Чепурной А.Д., Литвиненко А.В. [и др.] Расчетно-экспериментальная идентификация математических и численных моделей элементов сложных механических систем. *КШП. ОМД*. М.: ООО "Тисо Принт", 2014. № 2. С. 3–9.
4. Ткачук Н.А., Хлань А.В., Шейко А.И. [и др.] Разработка математического аппарата для решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов механических систем. *Вісник НТУ "ХПИ"*, 2017, № 25 (1247). С. 110–131.
5. Бондаренко М. А., Пелешко Е. В., Васильев А. Ю. [и др.] Расчетно-экспериментальная верификация динамической модели макета корпуса бронетранспортера. *Вестник НТУ «ХПИ»*. Харьков, 2017. № 32 (1254). С. 5–13.
6. Хлань А.В., Малакей А.Н., Ткачук Н.А. [и др.] Проектно-технологически-производственное обеспечение тактико-технических характеристик боевых бронированных машин: подходы, модели и методы. *Механіка та машинобудування*, 2017. №1. С. 156–182.
7. Ткачук Н.А., Климов В.Ф., Хлань А. В. [и др.] Компьютерный программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов объектов бронетанковой техники *Вісник НТУ "ХПИ"*, 2017. № 12 (1234). С. 96–109.

#### References (transliterated)

1. Karapejchik I.N., Litvinenko A.V., Brul' S.T. [i dr.] Rasshirennaja raschetno-jeksperimental'naja identifikacija parametrov chislennyh modelej korpusnyh jelementov transportnyh sredstv special'nogo naznachenija. *Visnik NTU "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2012, no. 22, pp. 69–77.
2. Litvinenko A.V. Kompleksnye jeksperimental'nye issledovanija dinamicheskikh harakteristik fragmentov, maketov i naturnykh obrazcov jelementov bronekorpusov transportnyh sredstv special'nogo naznachenija. *Visnik NTU "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2013, no. 1 (975), pp. 85–93.
3. Tkachuk N.N., Chepurnoy A.D., Litvinenko A.V. [i dr.] Raschetno-eksperimentalnaya identifikatsiya matematicheskikh i chislennykh modeley elementov slozhnykh mehanicheskikh sistem. *KShP. OMD*. M.: ООО "Tiso Print", 2014, no. 2, pp. 3–9.
4. Tkachuk N.A., Hlan A.V., Sheyko A.I. [i dr.] Razrabotka matematicheskogo apparata dlya resheniya zadach raschetno-eksperimental'nogo issledovaniya elementov mehanicheskikh sistem. *Vіsnik NTU " KhPI"*, 2017, no. 25(1247), pp. 110–131.
5. Bondarenko M. A., Peleshko E. V., Vasilev A. Yu. [i dr.] Raschetno-eksperimentalnaya verifikatsiya dinamicheskoy mode-li maketa korpusa bronetransportera. *Vestnik NTU "KhPI"*. Kharkov, 2017. no.32 (1254), pp. 5–13.
6. Hlan A.V., Malakey A.N., Tkachuk N.A. [i dr.] Proektno-tehnologicheski-proizvodstvennoe obespechenie taktiko-tehnicheskikh harakteristik boevykh bronirovannykh mashin: podhody, modeli i metody. *Mehanika ta mashinobuduvannya*, 2017, no. 1, pp. 156–182.
7. Tkachuk N.A., Klimov V.F., Hlan A. V. [i dr.] Kompyuterniy programno-apparatnyy kompleks dlya analiza i sinteza modeley elementov ob'ektov bronetankovoy tehniki. *Vіsnik NTU "KhPI"*, 2017, no. 12(1234), pp. 96–109.

*Надійшла (received) 08.10.2017*