

Є.В. ПЕЛЕШКО, канд. техн. наук, н.с. каф. ТММ і САПР, НТУ «ХПІ»,
М.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, проф., зав. каф. ТММ і САПР, НТУ «ХПІ»,
С.Т. БРУЛЬ, канд. техн. наук, заст. нач. Управління з організації
матеріально-технічного забезпечення військ (сил) Генерального штабу
Збройних Сил України (м. Київ),
О.В. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, провідний інженер проекту
ВАТ «Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний
інститут» (м. Маріуполь),
І.М. КАРАПЕЙЧИК, голова правління - генеральний директор
ВАТ «Азовмаш» (м. Маріуполь)

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ЖОРСТКОСТІ КОРПУСІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В статье решается задача разработки методов, алгоритмов и способов генерации моделей бронекорпусов легкобронированных боевых машин с целью обоснования параметров, которые обеспечивают заданные тактико-технические характеристики, на основе оперативного решения задач анализа их напряженно-деформированного состояния при осуществлении выстрелов с учетом лавинообразного роста количества типов проектируемых машин, их конструктивных схем, конструктивных и технологических параметров, а также возможных режимов боевого использования.

The task of development of methods, algorithms and generation technique for armored hulls light fighting vehicles models is solving in the paper. Fast growth of designed machines types, their structural charts, technological parameters and also possible modes of battle application are taken into account.

1. Вступ. У сучасному світовому бронетанкобудуванні на даний час приділяється значна увага проектуванню і випуску легкоброньованих машин (ЛБМ). Цьому сприяє характер бойових дій, що носять у багатьох випадках участь в регіональних конфліктах, антитерористичних і миротворчих операціях. При цьому на перший план виступають такі характеристики як рухливість, достатньо низька вартість, можливість створення на базі єдиного шасі декількох модифікацій ЛБМ. Крім того, найважливішою обставиною на користь легкоброньованих машин виступає можливість порівняно недорогої модернізації ЛБМ, що перебувають на озброєнні, до рівня сучасних вимог за тактико-технічними характеристиками (ТТХ) шляхом установки нових бойових модулів (БМ), силових агрегатів, систем управління і т.д. Специфіка складних задач, що виникають при цьому, полягає в тому, що для досягнення заданих ТТХ рухливості, озброєності, захищеності потрібне проведення великої кількості експериментальних, аналітичних, числових досліджень фізико-механічних процесів, які супроводжують процес експлуатації і бойового застосування цих машин. Оскільки в розробці можуть знаходитися

декілька типів машин одночасно, причому кожна в декількох модифікаціях, і режими бойового застосування яких є достатньо різноманітними, то це спричиняє ситуацію «лавина моделей» і «лавина режимів бойового застосування».

Через високу відповідальність конструктивних рішень, які безпосередньо визначають ТТХ спроектованих бойових машин, сам процес моделювання стає незамінним у сучасній практиці проектування. Причому для отримання оптимальних рішень із забезпеченням підвищення ТТХ ця складова проектного процесу є визначальною, а, отже, і обов'язковою [1-5]. У зв'язку з цим виникає масштабна науково-технічна проблема, що полягає в необхідності, з одного боку, інтенсифікації і підвищення якості проектування з метою забезпечення заданих ТТХ ЛБМ, а з іншого – у відсутності теоретичних розробок, алгоритмів і програмно-модельного забезпечення розв'язання цих задач в сучасних умовах. Зокрема, однією із складових цієї проблеми є *актуальна і важлива* задача забезпечення заданих ТТХ спроектованих ЛБМ на основі нових підходів до моделювання динамічних процесів і напружено-деформованого стану (НДС) сімейств бронекорпусів як найбільш відповідальних і навантажених елементів конструкції при дії зусиль віддачі в процесі здійснення пострілів із скорострільних артилерійських систем на основі розробки і застосування спеціалізованих параметризованих моделей і систем, інтегрованих в універсальні CAD/CAM/CAE-системи.

Мета досліджень. *Метою* роботи є розробка нових підходів до забезпечення на етапі проектування заданих ТТХ рухливості, точності стрільби, захищеності легкоброньованих машин шляхом обґрунтування масових, міцнісних і жорсткісних характеристик їх корпусів при підвищених навантаженнях від зусиль віддачі в процесі стрільби за рахунок науково-обґрунтованого вибору конструктивних параметрів із застосуванням створюваного спеціалізованого програмно-модельного комплексу, інтегрованого в сучасні CAD/CAM/CAE-системи.

Досліджуються динамічні процеси напружено-деформованого стану корпусів ЛБМ при здійсненні пострілів із скорострільних артилерійських установок.

Постановка задачі. Розглядаючи стан питання моделювання фізико-механічних процесів у бронекорпусах з метою обґрунтування конструктивних параметрів, що забезпечують задані ТТХ легкоброньованих машин, можна відзначити певне просування у цьому напрямі, описане, зокрема, у роботах [3-10]. Проте повного розв'язання дана задача у цих роботах не знайшла. Так, при розробці варіантів модернізації легких за масою бойових машин (БТР-60, БТР-70, БТР-80, МТ-ЛБ, БМП-2), а також при проектуванні, наприклад, БТР-3Е, БТР-70УМ, БТР-80УМ, БТР-4, БТР-94 і оснащенні їх при цьому новими БМ виникає важлива задача забезпечення міцності і жорсткості легкоброньованих корпусів. Оскільки корпусні

елементи даних машин в процесі бойового використання піддаються дії цілого комплексу динамічних і імпульсних дій, то початкова задача призводить до необхідності дослідження НДС просторових пластинчато-стержневих конструкцій при різних варіантах конструктивного посилення, з різними варіантами озброєння і силового агрегату, а також при варіюванні режимів бойового застосування. При цьому слід вирішувати проблему створення нової технології розв'язання проектних задач з великою кількістю різних типів конструкцій.

Методи досліджень. У роботі запропонована загальна постановка задачі, параметрична математична модель НДС досліджуваного класу конструкцій і основні підходи до розв'язання виникаючих задач.

Розглянемо напружено-деформований стан корпусу колісної або гусеничної бойової машини, що описується системою рівнянь

$$L(u, p, r, t) = f(r, t), \quad (r \in \Omega, t \in [t_n, t_k]), \quad (1)$$

де L – оператор початково-крайової задачі, $u = u(r, t)$ – вектор переміщень точок конструкції, віднесений до просторових координат r і часової координати t , $f(r, t)$ – масив навантажень на досліджувану конструкцію з параметрами p .

Специфіка досліджуваної задачі полягає в тому, що масив $p \in V$, по-перше, варіюваним (як за складом, так і за значеннями); по-друге, він частково є шуканим на основі деяких критеріїв; по-третє, як параметри тут розглядаються узагальнені параметри. Таким чином, для деякої точки параметричного простору $p \in V$ внаслідок розв'язання задачі (1) отримуємо

$$u = u(p, r, f, t). \quad (2)$$

Тоді можна визначити деякі характеристики досліджуваного процесу:

$$g_i = g_i(u), i = 1, \dots, N_g \quad (3)$$

де N_g – кількість досліджуваних характеристик.

Такими характеристиками можуть бути максимальне напруження, переміщення, прискорення, кути повороту в конструкції в цілому або в її частині протягом заданого часу, маса, об'єм або інші інтегральні характеристики. Оскільки відповідно до (2, 3) характеристики g_i є функціями параметрів p , то формально можна поставити наступні задачі:

– визначення залежностей

$$g_i = g_i(p), p_s \in [p_s^u, p_s^k], s = 1, \dots, N_p, \quad (4)$$

де $[p_s^u, p_s^k]$ – інтервал варіювання компонентів N_p параметрів p_s ;

– визначення чутливості досліджуваних характеристик g_i до зміни варіюваних параметрів

$$\lambda_{jq} = \partial g_j / \partial p_q; \quad (5)$$

– визначення оптимальної в деякому розумінні конструкції:

$$p^* = \arg \min G(p), p \in S, \quad (6)$$

$$S = \{p : S_k(p) \geq 0, k = 1, \dots, N_s\}, \quad (7)$$

де G – деяка цільова функція (один з параметрів g_i або їх комбінація), S_k – обмеження, що накладається на N_s варіюваних параметрів.

Для розв'язання поставленого комплексу задач необхідно вичленити два принципових моменти. Перший момент стосується задачі (1): її розв'язання для досліджуваної конструкції (корпус бронетранспортера, бойової машини, тягача і так далі) саме по собі є достатньо складною процедурою, оскільки потрібне залучення числових методів для аналізу просторово-часових розподілів переміщень, деформацій і напружень точок корпусів. Другий принциповий момент: як показує практика *реального* проектування, розв'язок задач (5, 6) втрачає свою цінність через мінливість конструктивних схем, варіантів модернізації, економічних вимог, технологічних і часових обмежень і так далі вже в ході проектування. Формально це призводить при розв'язанні задачі оптимального проектування до зміни цільової функції $G(p)$, обмежень $S(p)$, самого складу параметричного простору V .

Природно, що оптимальний розв'язок p^* у даному випадку змінюється, причому всі обчислювальні і часові витрати на його отримання просто пропадають. Таким чином, в ситуації, що створилася, традиційні підходи до розв'язання поставленої задачі неефективні. У зв'язку з цим потрібна розробка нових підходів, використання потужних сучасних методів числового моделювання і потужного програмного забезпечення.

Розглянемо методи розв'язання задач з урахуванням відмічених вище особливостей. Для числового визначення НДС корпусів ЛБМ найбільш доцільне застосування методу скінченних елементів (МСЕ). При цьому початково-крайова задача після скінченно-елементної дискретизації набирає вигляду:

$$Mq + Cq + Kq = \varphi, \quad (8)$$

де M, C, K, q, φ – матриці мас, демпфування і жорсткості досліджуваної конструкції, масив шуканих вузлових параметрів і вузлових навантажень.

Для розв'язання рівняння (8) пропонується використовувати покроковий метод Ньюмарка. В результаті числового розв'язування визначається шуканий розподіл $u = u(t)$. Враховуючи, що матриці M, C, K є явними або неявними функціями параметрів p , то отримуваний числовим методом розв'язок є неявною функцією даних параметрів: $u = u(p)$. Відповідно параметричні залежності можуть в даному випадку визначатися за принципом «чорного ящика»: на вході – набір параметрів p , на виході – параметри стану u (після процесу інтерполяції – $u(r, t)$). Принципова схема

організації досліджень може бути реорганізована у вигляді комплексу, побудованого за модульним принципом (рис. 1).

Запропонований метод дослідження дає можливість на основі параметричного підходу *автоматизувати* процес розв'язання задач аналізу, що в свою чергу створює передумови для організації в автоматизованому же режимі процедур спрямованого пошуку раціональних розв'язків.

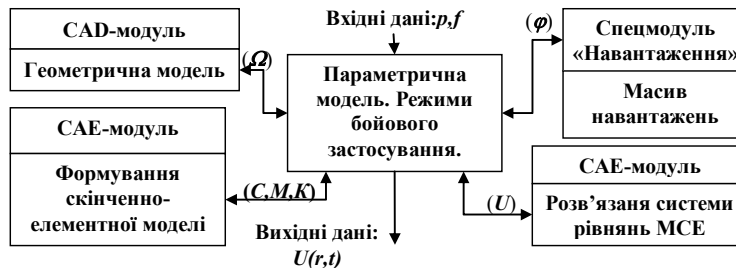


Рисунок 1 – Етапи дослідження НДС корпусів ЛБМ із застосуванням спеціалізованого інтегрованого програмно-модельного комплексу

Методи розв'язання задач синтезу у розширеній постановці. Суть запропонованого підходу полягає в тому, що в просторі V визначається покриваюча множина $\bar{S} \supset S$, і для її дискретного розбиття $D_s = \{p_{ij} = p_{in} + (j-1) \cdot (p_{ik} - p_{in}) / (N_i - 1), i = 1, \dots, N_p, j = 1, \dots, N_i\}$, де N_i – кількість точок дискретизації інтервалу зміни параметра p_i , розв'язується задача визначення

$$u_{ij} = u_{ij}(p_{ij}), g_{sij} = g_{sij}(p_{ij}). \quad (9)$$

Оскільки при зміні G, V, S, p завжди є можливість за наявною базою даних (9) визначити з наперед заданою точністю $\Delta p_i = (p_{ik} - p_{in}) / (N_i - 1)$ оптимальний розв'язок $p^{**} \approx p^*$, то або цей розв'язок можна прийняти як шуканий, або вибрати його як початкове наближення для визначення p^* .

Безперечною перевагою запропонованого підходу є величезне заощадження часу на розв'язання задач оптимального проектування при варійованих критеріях. Очевидним його недоліком – необхідність «великих початкових капітальних вкладень» у вигляді багатоваріантних розв'язань задач аналізу при створенні бази даних (9). Запропонована стратегія переміщає основні витрати обчислювальних зусиль на початкові етапи проектних робіт. Саме на цих етапах розробникам особливо необхідні дані результати.

Для визначення інтегральних характеристик НДС корпусів

транспортних засобів спеціального призначення пропонується використовувати узагальнений параметричний підхід. Його суть в тому, що як узагальнені параметри приймаються не лише геометричні параметри, величини сил, фізико-механічні характеристики (тобто параметри в традиційному розумінні), але і види конструкторських рішень, характерні особливості розрахункових схем, вживані способи дискретизації задач аналізу. Для побудови параметричних інтегрованих моделей і розрахунків НДС пропонується використовувати універсальну систему високого рівня Pro/ENGINEER/ Pro/Mechanica. Для взаємодії між різними системами, варіювання параметрів і задавання навантажень пропонується використовувати спеціалізовану параметричну інтегровану модель (СПІМ), що є основою для організації досліджень в універсальних системах (рис. 2).



Рисунок 2 – Схема спеціалізованої інтегрованої системи автоматизованого аналізу і синтезу

Як силову дію при розрахунку НДС корпусів пропонується використовувати екстремальні режими експлуатації транспортних засобів спеціального призначення при веденні стрільби чергою із гармат в різних напрямках.

Для оцінки НДС корпусу як характерні жорсткісні параметри на основі досвіду пропонується взяти переміщення, кути повороту і напруження в характерних точках, наприклад, розташованих на корпусі в області погонного кільця бронетранспортера БТР-80 (або іншої машини).

Після отримання значень жорсткісних та міцнісних параметрів знаходяться відносні податливості конструкції (інтегральні характеристики)

$$(w = c_w \cdot P, \varphi_x = c_{\varphi x} \cdot P, \varphi_y = c_{\varphi y} \cdot P) \Rightarrow (c_w = w / P, c_{\varphi x} = \varphi_x / P, c_{\varphi y} = \varphi_y / P), \quad (10)$$

де w, φ_x, φ_y – кінематичні параметри, що визначають відхилення осі цапф гармати від заданого напрямку при стрільбі; P – навантаження; $c_w, c_{\varphi x}, c_{\varphi y}$ – податливості конструкції, що утворюють деякий масив (поповнюваний і змінний).

Оскільки бронекорпус розглядається в процесі здійснення пострілів з БМ, оснащеного скорострільними артилерійськими системами, то зі всього комплексу ТТХ бойової машини можна виділити ті, які визначаються параметрами корпусу і ТТХ бойового модуля. Відповідно зі всієї

різноманітності параметрів виділяється певна підмножина (рис 3). Зокрема, на рис. 4 схематично зображений взаємозв'язок НДС корпусів ЛБМ при здійсненні пострілів з БМ з їх ТТХ. Природно, що реальна картина взаємозв'язків складніша і за складом характеристик, і за структурою їх відношень. Проте загалом запропоновану схему можна в першому наближенні прийняти як початкову.

Таким чином, із всього комплексу параметрів узагальненого параметричного простору V , що ідентифікує досліджуваний об'єкт, виходячи із запропонованої загальної схеми і зважаючи на специфіку конкретної проекрованої ЛБМ, можна встановити вузький клас критерійних, варійованих, обмежувальних параметрів. Найбільший вплив на цей вибір здійснюють специфіка конструкції корпусу і ТТХ комплексу озброєння бойового модуля.



Рисунок 3 – Тактико-технічні характеристики бойової машини в системі формування оціночних критеріїв конструкції корпусу легкоброньованої машини і характеристик бойового модуля

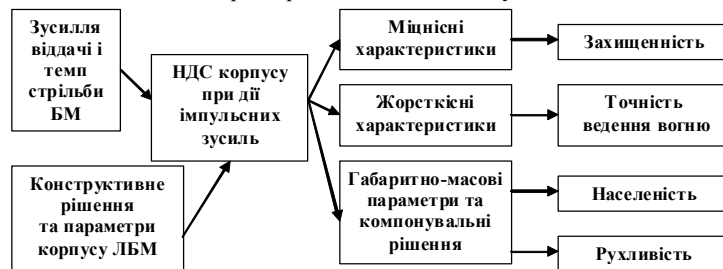
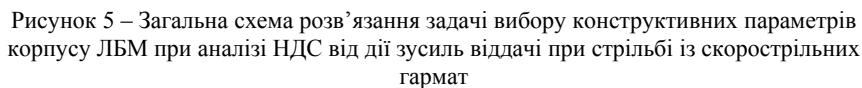


Рисунок 4 – Взаємозв'язок характеристик напружено-деформованого стану корпусів ЛБМ при здійсненні пострілів з БМ з їх тактико-технічними характеристиками

Прикладні задачі. Розглянемо як приклад корпус БТР-80. При здійсненні пострілів до найбільших деформацій і напружень схильна верхня його частина. Відповідно до цього як вихідну множину *контрольованих* (*керованих*) параметрів можна запропонувати (множина I): максимальне

В процесі досліджень запропонований як інструмент програмно-модельний комплекс дає можливість оперувати не лише із статично заданою («замороженою») множиною $I, K, Constr, Var$, але і з динамічно змінюваною («плинною»). Цим самим забезпечується відхід від традиційної, жорстко регламентованої і лінійної за схемою виконання процедури проектування, і перехід до гнучкої схеми з урахуванням результатів числового моделювання НДС корпусів безпосередньо в режимі реального часу.



При побудові бази даних про геометрію застосовується структурний підхід. В основі «класифікації» корпусів лежить тип. Так, для вітчизняних

машин як базові можна вибрати існуючі типи машин, такі як: МТ-ЛБ, БМП-1, БМП-3, БТР-80, БРДМ та інші. Подальший поділ геометричних моделей здійснюється за структурними рішеннями, оскільки існує багато структурних виконань модифікації тієї чи іншої ЛБМ.

Зокрема, ставиться задача створення бази даних моделей корпусів ЛБМ і проведення комплексу їх досліджень. На сьогоднішній день не існує скільки-небудь універсального алгоритму формалізації опису проєктованих конструкцій. В процесі проєктування і бойової машини в цілому, і бойового модуля, і бронекорпусу враховується складна множина критеріїв, обмежень, вимог, а також використовується досвід проєктування аналогічних конструкцій. В той же час можна виділити деякі узагальнені ознаки, що дозволяють проводити ідентифікацію або вже створеного об'єкту, або проєктованого. Нехай, наприклад $\vec{\alpha} = \{\alpha_1 \dots \alpha_N\}$ - деякий вектор таких узагальнених класифікуючих ознак. Ввівши у розгляд узагальнений класифікаційний простір A , побудований на компонентах α_i , що приймаються за узагальнені осі, можна трактувати об'єкт (ЛБМ), що ідентифікується, як точку даного простору $M = M(\alpha_1 \dots \alpha_N)$. Тоді можна встановити наступну формалізовану відповідність:

$$M(\alpha_1 \dots \alpha_N) \longrightarrow P(M, \gamma_1 \dots \gamma_N), \quad (11)$$

де P - узагальнений вектор-функція, що задає деякий опис конструкції бойової машини через узагальнені параметри $\gamma_1 \dots \gamma_M$.

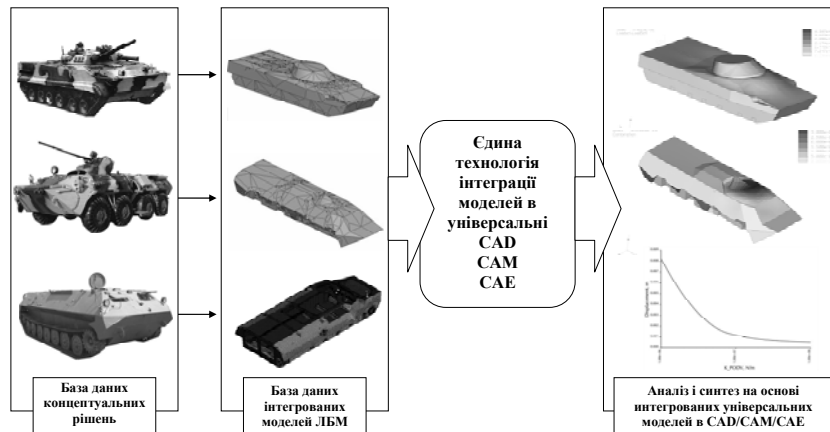


Рисунок 6 – Запропонована технологія досліджень з розробкою параметричних моделей, інтегрованих в універсальні CAD/CAM/CAE

У свою чергу ТТХ цього об'єкту можуть бути представлені у вигляді:

$$T = T(M, P, H), \quad (12)$$

де T – узагальнений вектор тактико-технічних характеристик; H – характеристики фізико-механічних процесів в корпусі.

Задача (12) є задачею зв'язку ТТХ з параметрами H , які в свою чергу визначаються в ході розв'язання різного типу задач аналізу (1).

Природно, що всі розглянуті параметри, характеристики є багатовимірними, а отримувані результати досліджень фізико-механічних процесів утворюють розгалужену структуру даних. При проведенні досліджень «в ручному режимі» одного або декількох об'єктів в принципі можливо відстежувати залежності P і T як в «прямому» напрямі $P \rightarrow u \rightarrow H \rightarrow T$, так і в «зворотному» $T \rightarrow H \rightarrow u \rightarrow P$. Першу задачу можна визначити як задачу узагальненого параметричного аналізу, другу – узагальненого параметричного синтезу.

У рамках створеного програмно-модельного комплексу розроблене в системі Pro/ENGINEER сімейство ЛБМ, зокрема, БТР-70, БТР-80, БТР-94, БМП-1, БМП-3, БРДМ, МТ-ЛБ.

Для геометричної моделі корпусу БТР-80 в системі Pro/Mechanica був проведений розрахунок напружено-деформованого стану (результати – на рис. 7). У системі автоматизованого моделювання Pro/Mechanica для моделі корпусу БТР-80 були отримані також власні частоти. Також був проведений розрахунок НДС корпусу при дії динамічного навантаження. Була промодельована серія пострілів по курсу з артилерійської системи.

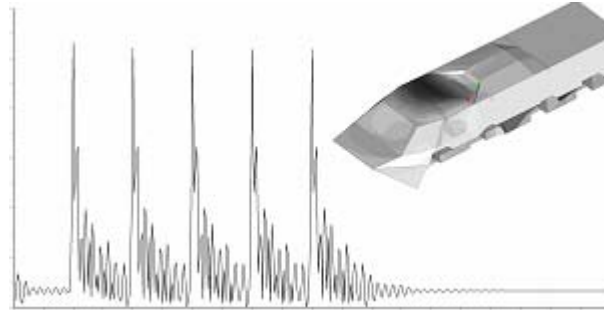


Рисунок 7 – Характер часового розподілу абсолютних переміщень у бронекорпусі БТР-80 при пострілах

За аналогією були побудовані моделі корпусів броньованої машини БМП-3, БРДМ, здійснено розрахунок їх НДС при здійсненні серії пострілів (рис. 8).

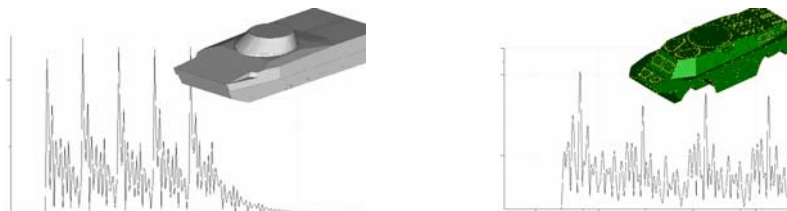


Рисунок 8 – Характер часового розподілу абсолютних переміщень та напружень по фон Мізесу в точках корпусу БМП-3 та БРДМ відповідно при динамічному навантаженні

Проведений також розрахунок НДС корпусу БТР-80 при варіюванні параметрів: товщина пропонованого «поясу» підсилення в районі БМ, товщина підбаштового листа, жорсткість підвіски, напрям стрільби. Одержані відповідні залежності максимальних переміщень та напружень від варійованих параметрів.

Також були проведені розрахунки з варіюванням напрямку стрільби. Проведений комплекс досліджень є масивом даних, які можуть бути покладені в основу при розробці рекомендацій по проектуванню і модернізації нових та існуючих конструкцій ЛБМ. На цій основі отримані характерні риси розв'язання задачі про визначення конструктивних параметрів корпусів, що забезпечують заданий рівень ТТХ бойових машин.

Експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження бронекорпусів ЛБМ пропонується здійснювати за удосконаленою схемою. Пропонується комбінована схема забезпечення точності розрахункових моделей, що поєднує розрахунково-розрахункове і розрахунково-експериментальне обґрунтування їх параметрів. На рис. 9 представлена загальна схема цього процесу. У табл. 1 – власні частоти, отримані в різних розрахункових системах.

Таблиця 1 – Власні частоти коливань моделі корпусу, Гц

№	Pro/Mechanica, Гц	ANSYS, Гц	ANSYS (уточн.), Гц	Різниця %
1	21.500	21.762	21,365	1.2%
2	26.700	26.678	26,748	0.1%
3	28	27.472	27,234	1.9%
4	28	27.578	27,234	1.5%
5	33.1	33.470	33,229	1.1%
6	33.1	33.575	33,284	1.4%
7	35.2	35.344	35,051	0.4%

Комплексний аналіз результатів показує, що отримуване максимальне напруження в системах ANSYS і Pro/Mechanica відрізняється не більше ніж на 2 %, переміщення - 1 %, власні частоти – 3 %. Характер часових і просторових розподілів переміщень і напружень у корпусі, отриманий в різних системах, ідентичний. Початкова неоптимізована СЕМ давала грубіше

наближення: за напруженням 8-10 %, за переміщеннями – 5-6 %, за власними частотами – 10 %.

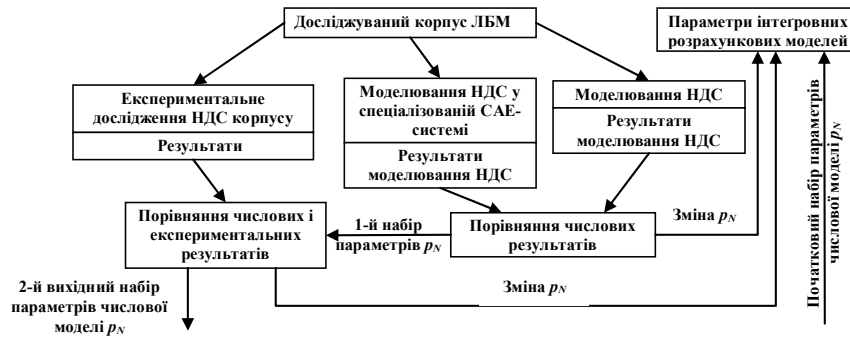


Рисунок 9 – Процес комбінованого уточнення параметрів числової моделі, що забезпечують необхідну точність моделювання НДС корпусу легкоброньованої машини

Таким чином, отримані порогові значення параметрів інтегрованої моделі корпусу БТР-80 (максимальна ступінь інтерполюючого полінома $P = 9$, розмір елемента $\Delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м). В процесі проведення числових досліджень використовувалися набагато жорсткіші умови для цих параметрів. Це дозволяє стверджувати, що результуюча похибка – на рівні 5%.

На додаток до проведених розрахунково-розрахункових досліджень корпусу БТР-80 (БТР-94) був проведений додатковий комплекс досліджень корпусів БМП-3 і МТ-ЛБ за запропонованою схемою. Порівняльна відмінність не перевищує 10%, що є прийнятним результатом для розроблених експрес-моделей.

Для підтвердження достовірності числових моделей був проведений комплекс розрахунково-експериментальних досліджень за допомогою створеного програмно-модельного комплексу. Об'єктом досліджень виступив корпус БТР-80. Був проведений експеримент по знаходженню власних частот моделі корпусу БТР, в ході якого отримані таблиці переміщень, швидкостей і прискорень в часі. Графічні результати експерименту проілюстровані на рис. 10. Були також проведені розрахунки власних частот конструкції і реакції конструкції на імпульсні дії. Порівнювані частоти, отримані числовим шляхом і при проведенні експерименту, наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Власні частоти досліджуваної конструкції, Гц

Експериментально отримані частоти	18-20	–	190-210	–	420-440
Чисельно отримані частоти	–	79	237	266	418

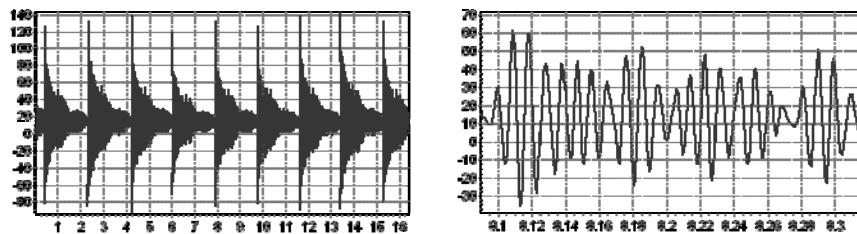


Рисунок 10 – Графіки розподілу в часі прискорень в точці підбаштового листа (експеримент)

Отримані результати служать базою для встановлення точності результатів і достовірності параметрів інтегрованих СЕМ досліджених в роботі корпусів. Аналіз показав, що і за характером, і за величинами отримувані розподіли відповідають один одному, причому похибка знаходиться в межах 6%.

Як додаткове дослідження верифікації було проведено розрахунково-експериментальне визначення власних частот макету фрагмента корпусу БТР-80 на спеціальному лабораторному стенді, з одного боку, і чисельно – з іншого. На рис. 11-12 показані зафіксовані експериментально і отримані чисельно власні форми і спектри власних коливань моделей верхніх частин корпусів БТР-80.

Отримані результати служать базою для встановлення точності результатів і достовірності параметрів інтегрованих СЕМ досліджених в роботі корпусів. Аналіз показав, що і за характером, і за величинами отримувані розподіли відповідають один одному, причому похибка знаходиться в межах 6%.

Як додаткове дослідження верифікації було проведено розрахунково-експериментальне визначення власних частот макету фрагмента корпусу БТР-80 на спеціальному лабораторному стенді, з одного боку, і чисельно – з іншого. На рис. 11-12 показані зафіксовані експериментально і отримані чисельно власні форми і спектри власних коливань моделей верхніх частин корпусів БТР-80.

Проведений комплекс розрахунково-розрахункових і розрахунково-експериментальних досліджень корпусів ЛБМ підтвердив: адекватність опису розробленими фізичними, геометричними, математичними і числовими моделями корпусів легкоброньованих машин досліджуваних фізико-механічних процесів при здійсненні пострілів; задовільну якісну і кількісну відповідність числових і експериментальних результатів моделювання НДС корпусів легкоброньованих машин; прийнятність використання інтегрованих моделей для моделювання реакції корпусу на бойове застосування скорострільних артилерійських систем з похибкою, що припускається при цьому, не вище 10%.

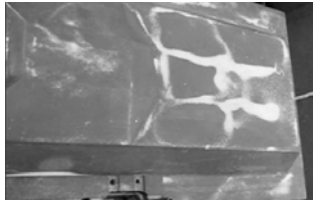
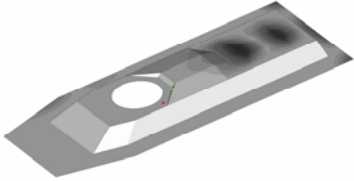
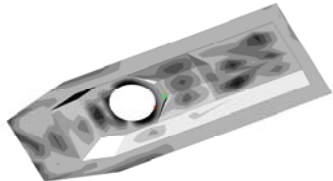
Експеримент	 280 Гц	 680 Гц
Розрахунок	 276 Гц	 673 Гц

Рисунок 11 – Деякі форми коливань моделі верхньої частини корпусу БТР-80

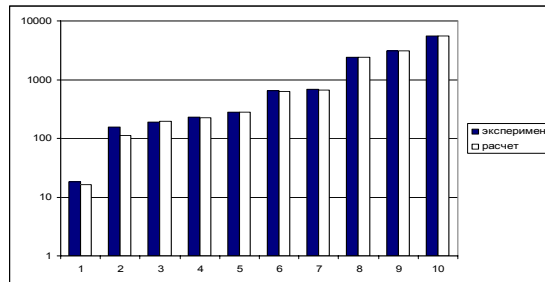


Рисунок 12 –Частоти МВЧК БТР-80, отримані експериментальним і числовим шляхом

Виконані розробки і дослідження дозволили створити в результаті спеціалізований інтегрований програмно-модельний комплекс, який з успіхом застосовувався при виконанні бюджетних тем та господарських договорів. У практичному плані отримані результати були впроваджені в процес проектування бронетранспортера БТР-94 та при проведенні проектних робіт з модернізації БТР-70, 80.

Зокрема, в процесі проектування були враховані наступні рекомендації.

1. Немодернізовані корпуси бронетранспортерів БТР-70, 80 не забезпечують необхідної міцності елементів корпусу, оскільки від багатоциклової дії зусиль віддачі можливе руйнування конструкції. У зв'язку з цим запропонований варіант підсилення горизонтальних швелерів. Це забезпечило міцність корпусу БТР-80 зі встановленими новими бойовими модулями з точки зору цілісності і довговічності корпусу як основного захисного елементу конструкції.
2. При оснащенні модернізованих бронетранспортерів БТР-70, БТР-80 новими бойовими модулями виникла проблема забезпечення точності стрільби, оскільки визначальним чинником при проведенні темпової стрільби

є кутові переміщення гармати відносно осі цапф. У зв'язку з цим запропоновано поєднати заходи щодо зміцнення корпусу із заходами щодо його посилення. Внаслідок цього коливання осі цапф від деформації корпусу зменшуються.

Висновки. Робота містить розв'язання актуальної і важливої науково-практичної задачі розробки методів і засобів забезпечення в процесі проектування заданих ТТХ легкоброньованих бойових машин на основі аналізу НДС їх корпусів при дії зусиль віддачі в процесі стрільби із скорострільних гармат. На основі розроблених підходів, методів і створеного програмно-модельного комплексу проведений багатоваріантний аналіз НДС корпусів ЛБМ при дії імпульсних навантажень, результати якого покладені в основу розробки рекомендацій з проектування корпусів машин.

Одержані результати дають підставу для наступних висновків.

1. У статті міститься теоретичне узагальнення і нове розв'язання актуальної і важливої наукової задачі, що полягає у створенні методів автоматизованого аналізу і синтезу корпусів колісних і гусеничних ЛБМ на базі розроблених спеціалізованих *інтегрованих параметризованих* моделей за критеріями міцності і жорсткості при дії зусиль віддачі при стрільбі, що забезпечує досягнення заданого рівня ТТХ рухливості, захищеності і вогневої потужності проєктованих ЛБМ.
2. У роботі вперше запропонована комплексна модель, що об'єднує фізичну, математичну, геометричну і числову моделі, яка, на відміну від традиційних, створюється на основі єдиного наскрізного параметричного опису.
3. Створена нова математична модель для опису динамічних процесів у корпусах ЛБМ при здійсненні пострілів, що відрізняються комплексним підходом до забезпечення заданого рівня ТТХ і орієнтацією на впровадження моделей, що розробляються, в універсальні системи автоматизованого проектування типу Pro/ENGINEER.
4. У роботі описано *сімейство* інтегрованих параметризованих моделей корпусів БТР-80, БМП-2, БМП-3, БРДМ, МТ-ЛБ, які вирізняються єдиним підходом до їх створення, єдиною технологією їх дослідження в середовищі Pro/ENGINEER. Застосування цих моделей дає можливість різко (у 3-4 рази і більше) скоротити на ранніх етапах проектування терміни дослідження фізико-механічних процесів в корпусах легкоброньованих машин при стрільбі.
5. Створений та описаний у роботі спеціалізований програмно-модельний комплекс відрізняється властивостями гнучкості, переналаджованості, доповнюваності інтегрованих моделей і носить характер достатньо універсального інструменту для обґрунтування проектних рішень і забезпечення заданих ТТХ.
6. Розроблені із застосуванням методів, алгоритмів і програмно-модельного комплексу практичні рекомендації дозволяють при проектуванні бронетранспортерів забезпечити задані складові ТТХ.
7. Достовірність отриманих результатів досліджень і точність розрахункових

моделей Pro/ENGINEER забезпечується в роботі на основі оригінального варіанту розрахунково-експериментального методу досліджень корпусів: порівняно з експериментальними даними похибка не перевищує 10 %; порівняно з результатами числових досліджень із застосуванням еталонних моделей і системи ANSYS – 5% за максимальними переміщеннями і 10% – за максимальним напруженням. При цьому якісна відповідність результатів – повна.

Напрями подальшої роботи полягають у реалізації запропонованих підходів у вигляді фізичних, геометричних і скінченно-елементних інтегрованих моделей для впровадження на вітчизняних підприємствах, в НДІ, КБ на етапі проектування з метою проведення необхідних досліджень для забезпечення заданих ТТХ шляхом науково обгрунтованого вибору конструктивних схем і параметрів корпусів, забезпечуючи міцність і жорсткість в процесі навантажень зусиль віддачі при здійсненні пострілів із скорострільних гармат.

Список літератури. 1. Веретельник Ю.В., Миргородский Ю.Я., Пелешко Е.В., Ткачук Н.А. Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных систем // Механіка та машинобудування. – 2003. – № 1. – Том 2. – С.3–8. 2. Глуценко Э.В., Пелешко Е.В., Шаталов О.Е., Колесник В.А. Формирование математических моделей для исследования прочности и жесткости элементов корпусов транспортных средств специального назначения // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск «Колесные и гусеничные машины специального назначения». Харків – 2003. – №27. – С.62-70. 3. Васильев А.Ю., Пелешко Е.В. Построение параметрических моделей корпусов многоцелевых транспортеров для расчета их прочностных и жесткостных характеристик // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск «Колесные и гусеничные машины специального назначения» – 2003. – №28. – С.102-112. 4. Васильев А.Ю., Малакей А.Н., Пелешко Е.В., Шаталов О.Е. К вопросу интегрированных систем анализа динамических процессов в корпусах транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування. – 2004. – №1 – С. 51-60. 5. Пелешко Е.В., Ткачук Н.Н., Гриценко Г.Д., Ткачук Н.А. Специализированный интегрированный программно-модельный комплекс на основе обобщенного параметрического описания сложных механических систем // Вісник НТУ “ХПИ” Тематичний випуск “Машинознавство і САПР” – Харків: НТУ “ХПИ”, 2007.– № 3.– С.101-117. 6. Пелешко Е.В. Применение обобщенно-параметрического подхода к анализу корпусов транспортных средств специального назначения // Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал.– Харків: НТУ “ХПИ” – 2005. - №1. – С.83-87. 7. Пелешко Е.В. Интегральные характеристики напряженно-деформированного состояния корпусов транспортных средств специального назначения // Вісник Національного технічного університету “ХПИ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ “ХПИ”, 2005.– № 47. – С.128-133. 8. Пелешко Е.В., Васильев А.Ю., Гриценко Г.Д., Бруль С.Т., Пономарев Е.П. Расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей корпусных элементов транспортных средств // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал – Харків.: НТУ «ХПИ», 2007. - №1. С. 95-100. 9. Пелешко Е.В., Васильев А.Ю., Гриценко Г.Д., Бруль С.Т., Пономарев Е.П. К вопросу о расчетно-экспериментальном определении параметров численных моделей корпусов транспортных средств // Вісник НТУ “ХПИ” Тематичний випуск “Транспортне машинобудування” – Харків: НТУ “ХПИ”, 2007.– № 33. – С.140-144. 10. Ткачук Н.А., Гриценко Г.Д., Пелешко Е.В. Комплексное экспериментальное исследование элементов корпусов транспортных средств специального назначения // Вісник НТУ “ХПИ” Тематичний випуск “Машинознавство і САПР” – Харків: НТУ “ХПИ”, 2008.– № 2. – С.42-53.

Поступила в редколлегию 30.09.2010