

УДК 623.438:539.3

*М. А. ТКАЧУК, О. В. ЛИТВИНЕНКО, А. В. ГРАБОВСЬКИЙ, І. В. ЦЕБРЮК***ПРОБЛЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОЙОВИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН: ПІДХОДИ, МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ**

Отримала рішення актуальна науково-практична проблема розробки теоретичних основ проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин (ЛБМ) шляхом обґрунтування технічних рішень бронекорпусів за критеріями захищеності, міцності, жорсткості, віброзбудливості від дії комплексу уражаючих чинників, що має велике значення для бронетанкобудування України. На основі розвитку методу узагальненого параметричного моделювання та поширення його на проектно-технологічні рішення розроблений новий підхід до забезпечення заданих тактико-технічних характеристик ЛБМ. Він полягає в їх забезпеченні як результату взаємодії та взаємовпливу конструктивних рішень, технологічних режимів і умов виробництва. При цьому вперше множина технологічних чинників залучена як така, що певною мірою визначає рівень ТТХ, і як варійована, шукана.

Ключові слова: бронекорпус, бойова броньована машина, тактико-технічні характеристики, проектно-технологічні рішення, метод узагальненого параметричного моделювання

Вступ. Бронетанкобудування України склалося як одна із основних галузей військово-промислового комплексу. При цьому для забезпечення тактико-технічних характеристик (ТТХ) військових гусеничних і колісних машин повинна діяти струнка система, що охоплює всі етапи життєвого циклу виробів – від формування тактико-технічних вимог Збройними Силами до полігонних випробувань і бойового застосування. У цій системі, що склалася, найважливішими етапами, на яких закладаються, забезпечуються і втілюються ТТХ бойових легкоброньованих машин (ЛБМ), є відповідно їх конструювання, технологічна підготовка і виробництво. Всі ці етапи потребують відповідного наукового супроводу.

У той же час, аналізуючи сьогоденний стан всіх згаданих вище ланок забезпечення ТТХ ЛБМ у бронетанкобудуванні України, можна зробити висновок, що протягом десяти років основна увага приділялася проектним розробкам нової техніки та її виготовленню. Це зумовлено тим, що в Україні діють флагмани вітчизняного та колишнього радянського бронетанкобудування – ДП "Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова" (ХКБМ ім. О.О. Морозова), ДП "Завод імені В.О. Малишева". Разом із тим набагато менша увага приділялася технологічній підготовці виробництва (ТПВ) і науковому супроводу всіх етапів розробки нової техніки.

Виходячи з того, що ТТХ ЛБМ вимагають дотримання балансу витрат, кваліфікації та рівня діяльності на проектному етапі, при дослідженнях, ТПВ і безпосередньо при їх виготовленні, можна зробити висновок про те, що однією із найважливіших проблемних компонент є якраз технологічна підготовка та науковий супровід розробок. Також слід взяти до уваги, що вітчизняне бронетанкобудування порівняно недавно почало розвивати розробку і виготовлення ЛБМ, зокрема, колісних, для яких, на відміну від бойових машин важкої категорії за масою, виникають властиві тільки їм проблемні питання. По-перше, це зв'язаність багатьох компонент ТТХ, які для важких машин розділялися. Так, масивний і пасивний бронезахист останніх принципово покривав потреби в

жорсткості і міцності корпусу як несучого елемента конструкції, що замикає на собі силові потоки від зусиль підвіски, від реактивних зусиль при стрільбі з власних систем озброєння, від дії силових, вагових та інерційних навантажень з боку двигуна, трансмісії тощо. Таким чином, складові захищеності, деформованості і точності ведення вогню, міцності від динамічних і імпульсних впливів рознесені для цих машин у послідовності проектного забезпечення кінцевих ТТХ. Однак для ЛБМ ці питання у силу тонкостінності конструкцій взаємопов'язані безпосередньо. Наприклад, захищеність зумовлюється розподілом бронелистів за проекціями корпусу, тим самим визначаючи міцнісні та жорсткісні характеристики, а також об'єм і конфігурацію заброньованого простору – важливі компоненти об'ємності, маси і форми зовнішніх обводів, які впливають на характеристики рухливості тощо. Таким чином, усі ці компоненти ТТХ слід забезпечувати узгоджено. При цьому первинним, як і раніше, залишається проблема захищеності і міцності корпусу як відправного елемента при розробці ЛБМ.

Крім того, усі складові ТТХ проявляються на етапі бойового застосування при дії комплексу уражаючих чинників, що супроводжується різними фізико-механічними процесами. Таким чином, ще однією проблемною стороною забезпечення заданих ТТХ є їх органічний зв'язок із процесами і станами, зумовленими режимами бойового застосування ЛБМ, а також проектно-технологічними рішеннями, параметрами та умовами виробництва машин. Відповідно, на етапі розробки отримати певне уявлення про рівень ТТХ бойових машин можна тільки розрахунковим шляхом. Враховуючи, що уражаючі чинники мають тенденцію до зростання інтенсивності і збільшення різноманітності їх типів, застосовувані нові матеріали бронекорпусів характеризуються пошаровою неоднорідністю властивостей, а реалізовані фізико-механічні процеси характеризуються істотною нелінійністю, то мова може йти про комп'ютерне моделювання. У той же час відпрацьовані усталені методики комп'ютерного моделювання всієї сукупності процесів і станів, які повною мірою розв'язують весь комплекс виникаючих

задач, на теперішній час відсутні. Існуючі дослідження вчених ЦНДІ ОВТ ЗСУ, НУО, ХКБМ ім. О.О. Морозова, АСВ, ІЕЗ, ІНМ, НТУ "ХПІ" [1–8] присвячені окремим аспектам моделювання фізико-механічних процесів в ув'язці з досягненням тих чи інших складових ТТХ. Це, наприклад, захищеність від дії кумулятивних боєприпасів, вплив вибухів мін, динаміка руху пересіченою місцевістю та навантаження від елементів підвіски тощо. У той же час не знайшли свого завершеного розв'язання задачі обґрунтування проектно-технологічних рішень, що визначають рівень захищеності і міцності корпусів ЛБМ. Беручи до уваги комплекс перерахованих аспектів, можна зробити висновок, що на теперішній час склалося певне протиріччя між збільшеними потребами бронетанкобудування у науково обґрунтованих проектно-технологічних рішеннях щодо забезпечення ТТХ ЛБМ, з одного боку, і недостатньо розвиненою теоретичною основою досліджень, – з іншого. Для вирішення цієї суперечності необхідний комплекс масштабних розробок, на одну зі складових яких спрямована дана робота.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що розробка методів проектно-технологічного забезпечення заданих ТТХ ЛБМ шляхом обґрунтування технічних рішень їхніх бронекорпусів за критеріями захищеності та міцності при дії уражаючих чинників є актуальною науковою проблемою для бронетанкобудування України.

Постановка задач досліджень. Метою роботи є розробка наукових основ проектно-технологічного забезпечення захищеності і міцності легкоброньованих машин на основі результатів математичного моделювання фізико-механічних процесів і станів бронекорпусів при дії засобів ураження із урахуванням технологічних чинників і обґрунтування на їх основі раціональних проектно-технологічних рішень.

Для досягнення заявленої мети в роботі поставлені і розв'язані наступні завдання.

1. Розробка загальних підходів до розв'язання проблеми проектно-технологічного забезпечення необхідних ТТХ об'єктів бронетанкової техніки на основі поповнення узагальненого параметричного простору технологічними чинниками і синтезу раціональних рішень у розширеному просторі.

2. Удосконалення математичних моделей фізико-механічних процесів у бронекорпусах ЛБМ при дії на них різних уражаючих чинників на основі інтеграції більш адекватних нелінійних моделей і узагальненого параметричного моделювання об'єктів досліджень.

3. Програмна реалізація запропонованого підходу і вдосконаленої математичної моделі у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК) для комп'ютерного моделювання реакції бронекорпусів ЛБМ на дію уражаючих чинників.

4. Розв'язання прикладних задач дослідження реакції бронекорпусів низки бойових броньованих машин на дію різних уражаючих чинників та розробка рекомендацій щодо обґрунтування проектно-

технологічних рішень, що забезпечують задані ТТХ ЛБМ.

Для створення теоретичних основ проектно-технологічного забезпечення захищеності ЛБМ був залучений метод узагальненого параметричного моделювання складних механічних систем, доповнений описом проектно-технологічних рішень як варійованих узагальнених параметрів. Формування математичних моделей фізико-механічних процесів і станів здійснено на базі апарату механіки суцільного середовища, в тому числі – теорії пружності та пластичності, рівнянь газодинаміки, теорії коливань. Дискретизація розв'язувальних рівнянь проводиться в основному методом скінченних елементів (МСЕ). Комп'ютерне моделювання здійснюється у середовищі програмних пакетів SolidWorks, Pro/ENGINEER, ANSYS, LS-DYNA, що реалізують МСЕ.

Загальний опис методів та засобів вирішення поставленої проблеми проектно-технологічного забезпечення захищеності і міцності корпусів легкоброньованих машин.

Аналіз стану проектування та застосування ЛБМ свідчить про те, що масштабна проблема забезпечення захищеності бронекорпусів сучасних бойових машин вирішується різними засобами, забезпечується на різних рівнях і різною мірою, моделюється різноманітними засобами, у тому числі – аналітичними, числовими і експериментальними методами. Як видно з умовно показаної на рис. 1 шкали деякого компонента ТТХ, результуючий його рівень визначається нижнім рівнем трьох компонент, відповідно – на етапах II, III, IV. Тим самим природним чином впливає критерій про збалансованість рівнів ТТХ, що досягаються на кожному із етапів II, III, IV. При цьому як відносні провали одного із цих рівнів порівняно із іншими, так і піднесення однаково шкідливі з точки зору кінцевого результату. Таким чином, технологія, образно кажучи, повинна забезпечувати проектні ТТХ, а виробництво – втілювати реальні ТТХ, і всі – наближено до заданого рівня.

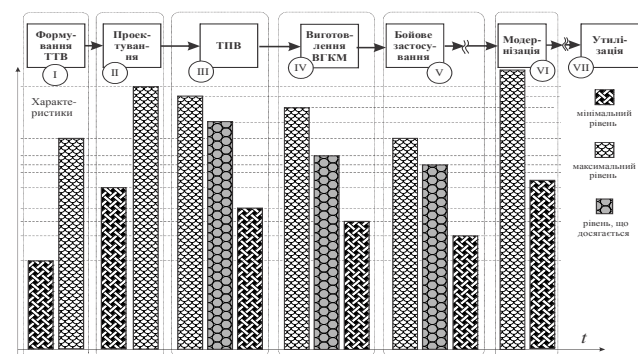


Рис. 1 – Життєвий цикл і ТТХ ЛБМ

Теза про важливість ТПВ, а також організації, оснащення та культури виробництва ЛБМ аж ніяк не нівелює того очевидного факту, що, незважаючи на їх важливість, у той же час усі ТТХ виявляються тільки в умовах бойового застосування, виконання бойових завдань та дії уражаючих чинників. При цьому

виникають певні фізико-механічні процеси і стани: руйнування броньової панелі кінетичними снарядами, НДС при дії ударної хвилі від вибухів боєприпасів, імпульсні процеси при здійсненні пострілів із власної зброї, динамічний вплив від зусиль у підвісці тощо. Таким чином, ТТХ є функцією взаємодії бронетехніки, яка володіє параметрами, закладеними на етапах II, III, IV, і режимів бойового застосування (РБЗ), як це показано на рис. 2.

Проектно-технологічне забезпечення тактико-технічних легкорброньованих машин. Відзначена вище обставина стала відправною точкою у розробці принципово нового підходу до забезпечення ТТХ на базі узагальненого параметричного моделювання. Саме цей підхід, розвинений і адаптований у роботі, дає можливість об'єднати у єдиній множині проектні, виробничі, уражаючі чинники, а також, що відрізняє

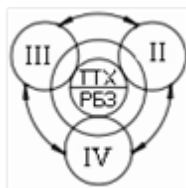


Рис. 2 – ТТХ ЛБМ як результат взаємовпливу проектних (II), технологічних (III), виробничих (IV) чинників із урахуванням РБЗ

його від традиційних, ще й чинники технологічні. У результаті множина узагальнених параметрів (внутрішніх чинників), що ідентифікують ЛБМ в усій повноті його властивостей при дії зовнішніх чинників, поповнюється новою підмножиною. Це переводить дослідження на більш високий рівень повноти, адекватності і керованості в усьому ланцюжку життєвого циклу. При цьому на перший план висуваються числові методи моделювання, які втілюються у комп'ютерних засобах різного призначення.

На даному напрямку існує три значних перешкоди: необхідність удосконалення математичних моделей процесів і станів ЛБМ; потреба у створенні середовища опису (ідентифікації) об'єкта досліджень; необхідність реалізації двох перерахованих вище інструментів у вигляді комп'ютерного програмно-модельного середовища. Для вирішення проблемних протиріч стосовно корпусів машин легкої категорії за масою залучається математичний апарат механіки. Центральною ланкою і методологічною основою теоретичних розробок, здійснених у роботі, є метод узагальненого параметричного моделювання, запропонований у роботах авторів [9–16]. Саме можливості цього методу дають засоби для організації досліджень на етапі математичного, числового і експериментального моделювання.

Теоретичні основи розв'язання поставленої задачі. Спираючись на роботи [9–16], був розроблений загальний підхід до проектно-технологічного забезпечення захищеності і міцності бронекорпусів ЛБМ. Аналіз процесу формування ТТХ (рис. 3, 4) дав змогу висунути 3 критерії для обґрунтування раціональних проектно-технічних рішень (критерії синтезу).

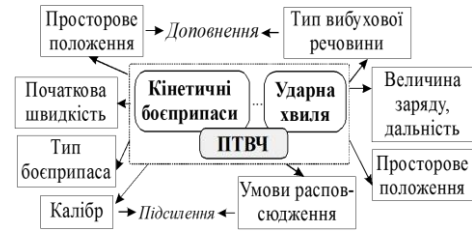


Рис. 3 – Формування РДУЧ

Їх умовно можна назвати критеріями мінімальної необхідності, збалансованості та стійкості (у деяких нормах $\|\bullet\|$) відповідно:

$$\max \|P_k(T^*, P_{yi}) - P_k(T^*, P_{dj}^*)\| \rightarrow \min \forall i \neq j, \forall k, (1)$$

$$\|P_{II}^* - P_T^*\| \rightarrow \min; \|P_T^* - P_{II}^*\| \rightarrow \min, (2)$$

$$\left. \begin{aligned} & \|T(P^{**} + \Delta P, P^{**} + \Delta P)\| \leq \delta; \\ & \forall (P^{**} + \Delta P, P^{**} + \Delta P) \in \Omega^{**} \end{aligned} \right\} (3)$$

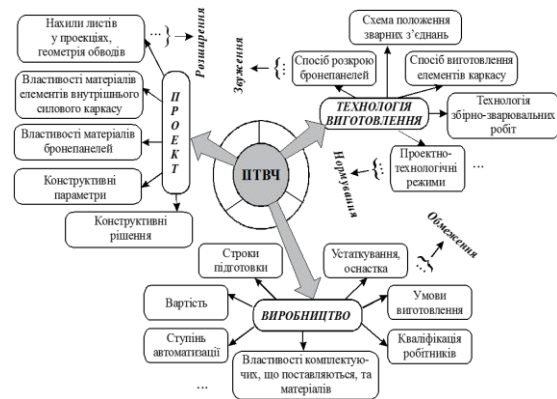


Рис. 4 – Формування ПТВЧ

Тут P_{II}, P_T, P_{II} – проектні, технологічні й виробничі параметри (чинники), P_y, P_d – режими дії уражаючих чинників (підсилюючі та доповнюючі, див. рис. 4). При цьому вимагається не стільки знайти проектно-технологічно-виробничі чинники (ПТВЧ) P^* та режими дії уражаючих чинників (РДУЧ) P^* , що доставляють максимум ТТХ T^* :

$$P^*, P^* = \arg \max T(P, P); P, P \in \Omega, (4)$$

а визначити те поєднання ПТВЧ та РДУЧ, що, по-перше, дає достатньо високий рівень ТТХ, а, по-друге, при деякому незначному збуренні P і P не призводить до різкого зниження $T = T(P, P)$. Цим самим декларується прагнення до визначення не стільки оптимального, скільки стійко переважного раціонального проектно-технологічного рішення (рис. 5). На відміну від традиційних підходів, даний підхід адаптований до умов реального проектування, технологічної підготовки й виробництва ЛБМ та забезпечення їхніх ТТХ і передбачає можливість інтеграції у реальні процеси проектування й

ТПВ.

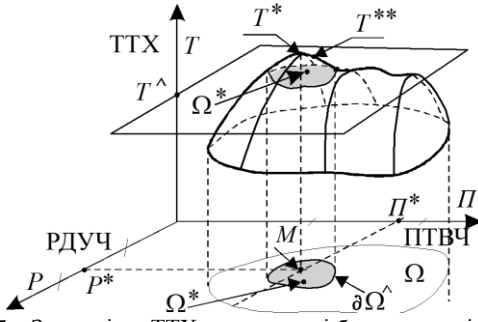


Рис. 5 – Залежність ТТХ захищеності бронекорпусів ЛБМ від РДУЧ та ПТВЧ

Природно, що задача синтезу передбачає багатоваріантне розв'язання задач аналізу. У зв'язку із різноманіттям ТТХ задачі аналізу розглядаються на основі пошарової декомпозиції. Це розщеплення і подальше об'єднання здійснено на основі узагальненого параметричного моделювання. Крім того, цей підхід застосовано для імплементації узагальнених параметрів у більш адекватні нелінійні математичні моделі. Саме такі підходи є методологічною основою і новизною роботи. На цій основі побудовано низку моделей. Зокрема, при побудові математичної моделі пружно-пластичного деформування бронекорпусів при проходженні ударної хвилі сформульовані нові рівні та критерії захищеності при дії ударної хвилі на бронекорпуси бойових броньованих машин. На додаток до традиційних критеріїв типу недопущення пластичних деформацій (тобто неперевихнення еквівалентними напруженнями $\sigma_{екв}$ межі текучості σ_T):

$$\sigma_{екв} \leq \sigma_T, \tag{5}$$

або збереження герметичності (тобто неперевихнення деформаціями допустимого рівня δ):

$$\varepsilon \leq \delta, \tag{6}$$

висувається вимога збереження цілісності бронекорпусу (тобто неперевихнення $\sigma_{екв}$ межі міцності σ_B) – новий критерій, більш адекватний:

$$\sigma_{екв} \leq \sigma_B. \tag{7}$$

У роботі, на відміну від традиційних підходів, враховані різні властивості й поведінка матеріалу бронепанелі і внутрішньої силової структури. Також вперше врахована залежність межі міцності і пластичності від швидкості деформування (рис. 6).

Використані закони пластичної течії інкрементального типу і геометрично нелінійні співвідношення для деформацій:

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1-2\nu} d\varepsilon_{ij} + 2G de_{ij} + \alpha_{ijkl} d\varepsilon_{kl} + \beta_{ijkl} d\dot{\varepsilon}_{kl}; \tag{8}$$

$$i, j, k, l = 1, 2, 3.$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}), \tag{9}$$

де $u, \varepsilon, \sigma, \alpha, \beta$ – компоненти вектора переміщень, тензорів деформацій, напружень та пружних констант матеріалів відповідно. Розв'язувальні співвідношення замикають початкові і крайові умови. Для опису процесу обтікання бронекорпусів ударною хвилею застосовуються рівняння Нав'є-Стокса.

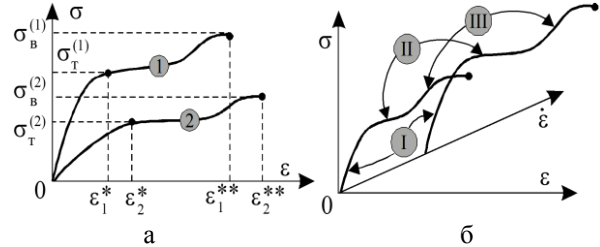


Рис. 6 – Діаграми « $\sigma - \varepsilon$ » для матеріалів бронепанелей 1 та внутрішнього силового каркасу 2 бронекорпусів (а) та характер залежностей « $\sigma - \varepsilon - \dot{\varepsilon}$ » при швидкісному деформуванні матеріалів бронекорпусів (б)

Математична модель процесу бронепробиття будується на основі рівнянь механіки суцільного середовища: збереження маси, енергії та кількості руху. Поряд із цим застосовуються емпіричні формули для оцінки інтегральних характеристик бронепробиття. У той же час у ході тестових розрахунків встановлено, що всі ці формули і підходи, хоча і мають кількісні відмінності, тим не менш тенденції зміни розв'язків відображають однаково. У зв'язку із цим надалі базова модель будується на співвідношеннях Жакоб-де-Марра для отримання множини 3D діаграм бронестійкості:

$$V_c = K_{br} d^{0,75} L_0^{0,7} / G^{0,5} \cos \psi_0. \tag{10}$$

Тут V_c – швидкість кондиційного пробиття перешкоди, а L_0 – товщина броні. При цьому, на відміну від традиційних підходів, запропонована математична формалізація вимоги збільшення об'єму простору бронестійкості (рисунок 8): $V^-(S(p), S(p + \Delta p)) \rightarrow \max, V^+(S(p), S(p + \Delta p)) \rightarrow \min.$

Тут V^+ – об'єм простору зовні поверхні бронестійкості $S(p)$, обмежений поверхнею $S(p + \Delta p)$, а V^- – всередині неї. Крім того, на основі методу граничних елементів проведений якісний аналіз впливу форми головної частини снаряду і пружних властивостей матеріалу його оболонки на розподіл контактного тиску у системі "індентор – перешкода".

При дослідженні динамічного НДС бронекорпусів при дії зусиль віддачі записується система лінійних рівнянь механіки суцільного середовища, а також початкові і крайові умови. Для статичного НДС тонкостінної конструкції встановлюється можливість лінеаризації його компонент при варіюванні проектно-технологічних параметрів. Ця закономірність поширена і на динамічний НДС.

Оскільки збуджуючий вплив на бронекорпуси ЛБМ є височастотним, то виникає проблема відлаштування від резонансів. Відштовхуючись від рівнянь Лагранжа

другого роду, для дискретизованої моделі бронекорпусу при варіюванні, наприклад, товщин бронепанелей:

$$h_k = h_k^0(1 - \alpha_k), k \quad (11)$$

де α_k – ступені варіювання товщин бронепанелей порівняно з номіналом ($k=1,2,\dots$), отримуємо для елементів матриць жорсткості і мас співвідношення

$$K(\alpha) = K_0 - K'_0, \quad M(\alpha) = M_0 - M'_0, \quad (12)$$

у яких перші компоненти залежать тільки від номінальних товщин панелей, а другі є лінійними формами від масиву компонент α_k .

Матриці мас і жорсткості формують визначальну систему рівнянь відносно масиву узагальнених координат x :

$$M \ddot{x} + Kx = 0. \quad (13)$$

Частинні розв'язки цього рівняння мають вигляд: $x = \lambda \sin \omega t$, де λ – деяка форма коливань, ω – власна частота коливань. Тоді із (12), (13) отримуються системи рівнянь

$$(M - \omega^2 K) \cdot \lambda = 0, \quad \text{Det}(K(h) - \omega^2 M(h)) = 0. \quad (14)$$

З використанням формули Релея отримуємо лінеаризовані співвідношення для визначення власних частот коливань

$$\omega^2(\alpha) = \omega_0^2 \frac{1 - \sum_{i,j} K'_{ij} A_i A_j / \sum_{i,j} K_{ij}^0 A_i A_j}{1 - \sum_{i,j} M'_{ij} A_i A_j / \sum_{i,j} M_{ij}^0 A_i A_j}. \quad (15)$$

Тут A – компоненти власних форм коливань λ , що відповідають певній власній частоті. Позначаючи через δ з відповідними індексами лінійні форми від α , присутні у чисельнику та знаменнику виразу (15), отримуємо лінеаризовані співвідношення:

$$\omega(\alpha) \approx \omega_0(1 - (\delta_K - \delta_M)/2). \quad (16)$$

Отже, поверхня відгуку (у даному випадку – залежність власної частоти коливань від варіювання певного параметру) може бути лінеаризована в околі поточної точки.

У роботі для представлення функції відгуку запропоновано використовувати кусково-лінійну апроксимацію у кожному квадранті (рис. 7). Для цього використовується методологія "реперних" розв'язків. На відміну від відомих підходів, запропонована нова методологія уточнення скінченно-різницевої апроксимації (16):

$$\omega(p_1(1 - \alpha_1), \dots, p_i(1 - \alpha_i), \dots, p_N(1 - \alpha_N)) = \omega_0 - \sum_j \alpha_j \cdot [\omega(\alpha_j^*) - \omega_0] / \alpha_j^*. \quad (17)$$

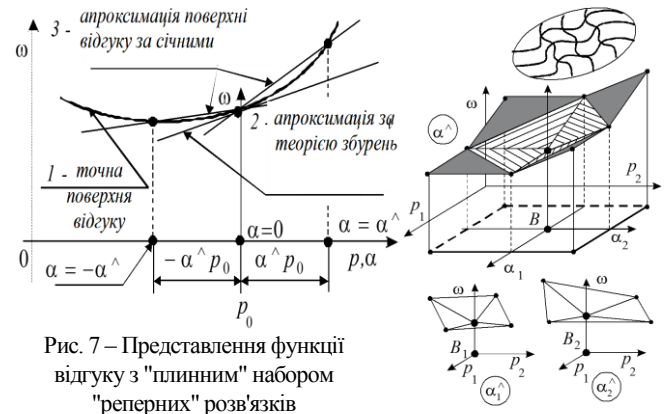


Рис. 7 – Представлення функції відгуку з "плинним" набором "реперних" розв'язків

Тут $\omega(\alpha_j^*)$ – точні розв'язки (14), наприклад, за допомогою МСЕ, при зміні тільки одного із компонент масиву α (такі розв'язки називаються "реперними"). Вона базується на використанні поступового покрокового уточнення подання (17) в ході уточнення розв'язку. Таким чином, на відміну від технологій "чорної" та "білої (прозорої) скриньок", розроблена нова технологія "сірої скриньки". При цьому ступінь "прозорості" цієї "скриньки" збільшується шляхом поєднання двох процедур: 1) за рахунок зменшення кроку дискретизації області параметричного простору; 2) в результаті локалізації зони розміщення поточного наближення розв'язку. У цьому – принципова відмінність даного методу. Він пропонує поєднання точності та оперативності розв'язання задач синтезу. Крім того, він зводить задачу синтезу до стандартної задачі лінійного програмування. Розроблений підхід застосовний для широкого кола задач: і бронезахищеності, і міцності, і відлаштування від резонансів.

Програмна реалізація теоретичних розробок. При розв'язанні цієї задачі основний наголос робиться на впровадженні методу узагальненого параметричного моделювання та реалізації математичних моделей у вигляді спеціалізованих програмно-моделних комплексів. Основна ідея – поєднання переваг потужності універсальних програмних пакетів і націленість на об'єкт досліджень за рахунок спеціалізованих модулів. Основою СПМК є параметризовані моделі, які дають змогу варіювати сам об'єкт досліджень, зберігаючи його цілісність із точки зору геометричної форми, властивостей матеріалів, діючих навантажень і граничних умов (рисунку 8).

Створені підсистеми моделювання ударно-хвильової

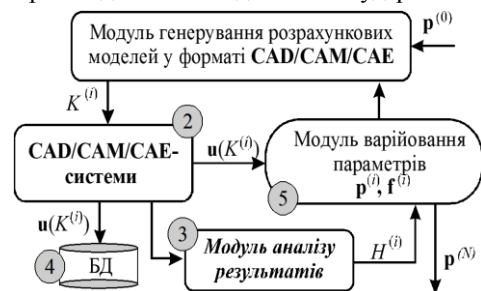


Рис. 8 – Структура СПМК для розв'язання задач аналізу та синтезу

дії на бронекорпус, дії на нього кінематичних боеприпасів, динамічних зусиль, а також чутливості динамічних характеристик до зміни проектно-технологічних параметрів бронекорпусів. Вони були апробовані на тестових задачах. Зокрема, СПМК "Хвиля" передбачає двоетапний процес: 1) моделюється обтікання ударною хвилею бронекорпусу; 2) до бронекорпусу прикладається визначений на першому етапі надлишковий тиск. Крім того, моделюється процес виникнення ударної хвилі. СПМК "Індентор" об'єднує різні моделі оцінки бронезахищеності; СПМК "Динаміка" дає можливість дослідження реакції бронекорпусів на дію реактивних зусиль віддачі; а СПМК "Спектр" – інструментарій для дослідження реакції спектра власних частот коливань бронекорпусу на варіюванні проектно-технологічні параметри. Усі ці СПМК не просто реалізують створені математичні моделі, але й розширюють потенційні можливості за рахунок гнучких переналагоджуваних модулів.

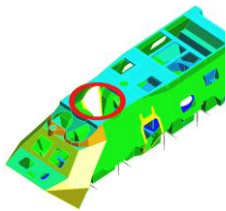


Рис. 9 – Геометрична модель бронекорпусу БТР-3Е

Розв'язання прикладних задач. Із використанням різних СПМК проведено комп'ютерне моделювання реакції бронекорпусів на дію уражаючих чинників. Зокрема, для дослідження реакції бронекорпусу на вплив реактивних зусиль віддачі при здійсненні стрільби з бойових модулів, оснащених скорострільними арт системами, на першому етапі проводився аналіз НДС "монотовщинного бронекорпусу" (тобто з однаковою товщиною бронепанелей в усіх проекціях) при варіюванні цих товщин. На рис. 9 представлена геометрична модель бронекорпусу. До погонного кільця прикладається пробне зусилля віддачі 10 кН. На рис. 10-12 – графічне представлення інтегральних залежностей, а на рис. 13 – характерні розподіли компонент НДС бронекорпусів. У таблиці 1 наведено характеристики НДС залежно від товщини бронепанелей.

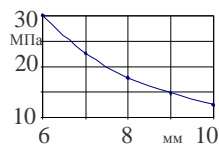


Рис. 10 – $\sigma_{екв}^{max}$ (МПа) у всьому корпусі БТР-3Е при варіюванні товщини бронепанелей

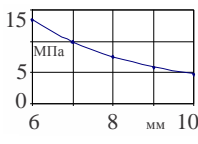


Рис. 11 – $\sigma_{екв}^{max}$ (МПа) у даху корпусу БТР-3Е при варіюванні товщини бронепанелей

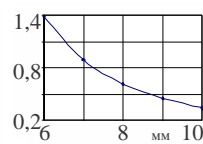


Рис. 12 – u_{max} (мм) точок корпусу БТР-3Е при варіюванні товщини бронепанелей

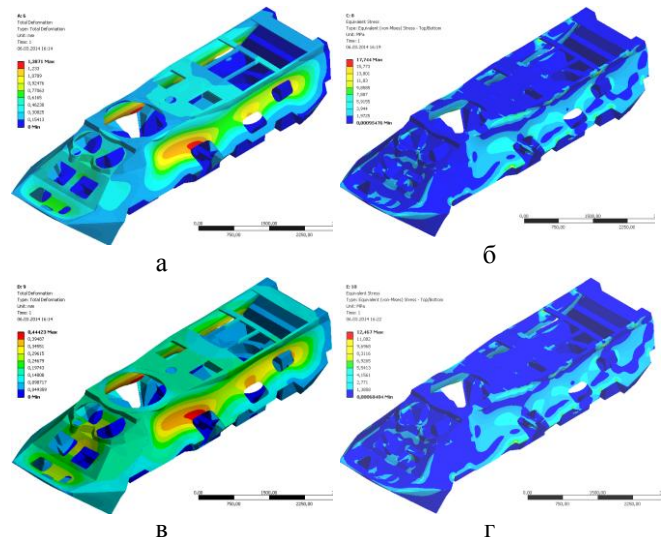


Рис. 13 – Характерні картини розподілу компонент НДС при варіюванні товщини бронепанелей корпусу БТР-3Е: а – 6 мм, б – 8 мм, в – 9 мм, г – 10 мм

При цьому можна відзначити, що лінеаризація в околі точки, що відповідає товщині 8мм, дає при варіюванні товщини в діапазоні $\pm 25\%$ похибку в межах $5 \div 7\%$ від точних кривих ("поверхні відгуку"). Таким чином, можна зробити висновок про застосовність лінеаризації представлених залежностей, а також про ефективність впливу на НДС за рахунок зміни товщини бронепанелей в усіх проекціях бронекорпусу. На другому етапі проведено комплексне дослідження НДС бронекорпусу БТР-3Е при динамічній дії зусиль віддачі. Варіювалися: товщина бронеліста у верхній та бічній проекції, товщина днища. На основі цих та інших досліджень рекомендований раціональний варіант розподілу товщин бронепанелей.

Таблиця 1 – Характеристики НДС корпусу БТР-3Е

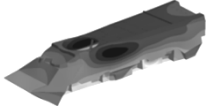
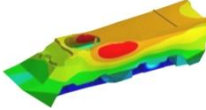
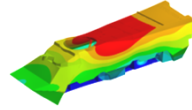
Товщина, мм	$\sigma_{екв. *}^{max}$ МПа	$\sigma_{екв. **}^{max}$ МПа	$u_{полн. *}^{max}$ мм	$u_{полн. **}^{max}$ мм
6	29,94	13,39	1,39	0,43
7	22,55	9,81	0,89	0,32
8	17,74	7,45	0,61	0,25
9	14,74	5,82	0,44	0,2
10	12,47	4,65	0,33	0,17

На третьому етапі отримана рекомендована конфігурація бронекорпусу БТР-3Е була піддана детальному аналізу НДС. Як показує аналіз отриманих результатів, рекомендований набір проектно-технологічних параметрів дає прийнятний рівень напружень і переміщень. Крім того, максимальні напруження та зони розташування зварних швів рознесені у просторі.

Аналіз чутливості вібраційних характеристик ЛБМ на зміну проектно-технологічних параметрів було проведено у 2 етапи. Для ілюстрації застосовності запропонованого підходу досліджується спектр власних частот коливань бронекорпусу БТР-3Е при варіюванні товщини його бронепанелей. Як ілюстративний обрано

базовий варіант номінальних товщин 8 мм для всіх елементів бронекорпусів. Варіювання усіх товщин здійснюється в межах $\pm 20\%$. У таблиці 2 наведена перша власна форма коливань для номінальних та змінених товщин, а на рис. 14 – графічна ілюстрація зміни власних частот коливань бронекорпусу при різних ступенях його потоншення/потовщення порівняно з базовим варіантом. Видно, що власні форми коливань зберігають свій характер, а частоти змінюються практично лінійно в досить широкому діапазоні варіювання товщин – $\pm 25\%$.

Таблиця 2 – Перша власна форма коливань бронекорпусу БТР-3Е при варіюванні товщин бронепанелей

6 мм	8 мм	10 мм
		

Далі із урахуванням отриманих результатів було проведено дослідження впливу різних параметрів на спектр власних частот коливань бронекорпусу БТР-3Е. Зокрема, проведено аналіз впливу товщини бронепанелей верхньої (дах), бокової (боки) і нижньої (днище) проекції бронекорпусу на спектри його власних частот коливань.

Виходячи із аналізу отриманих результатів, а також інших (компонувальних, технологічних, виробничо-організаційних та економічних) міркувань, було прийнято рішення про відповідний вибір карти товщин бронепанелей. Для отриманого варіанту бронекорпусу був проведений детальний аналіз власних частот і форм його коливань з відкритими і закритими люками. У результаті формування карти товщин бронепанелей і профілів поперечних перерізів елементів внутрішньої силової структури вдається відлаштуватися від резонансних частот, що відповідають темпу стрільби із малокаліберних автоматичних гармат. Таким чином, можна зробити висновок, що шляхом цілеспрямованої зміни проектно-технологічних параметрів удалося розв'язати важливу задачу відлаштування спектра власних частот коливань бронекорпусу БТР-3Е від резонансних режимів збудження.

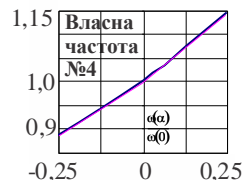
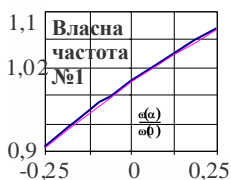


Рис. 14 – Власні частоти коливань бронекорпусу БТР-3Е, віднесені до власних частот з номінальною товщиною, залежно від відносного варіювання товщини бронепанелей

При числовому моделюванні реакції бронекорпусів ЛБМ на дію ударно-хвильового навантаження досліджені варіанти приходу ударної хвилі під різними кутами до бронекорпусу, а також різні варіанти його підсилення на прикладі МТ-ЛБ. Отримані результати комп'ютерного

моделювання свідчать про те, що залежно від напрямку приходу ударної хвилі напруження і переміщення точок бронекорпусу можуть змінюватися досить суттєво. При цьому важливою особливістю є висока роль внутрішньої силової структури у забезпеченні загального рівня захищеності бронекорпусів від дії ударної хвилі.

Таким чином, першочерговим заходом щодо підвищення захищеності бронекорпусів від дії ударної хвилі є посилення внутрішньої силової структури за рахунок збільшення товщини її елементів.

Числові оцінки захищеності бронекорпусів ЛБМ від дії кінетичних боеприпасів проводилися в кілька етапів. Спочатку був проведений аналіз бронестійкості корпусу БТР-80, у тому числі – способів і зон посилення бронелістів у різних проекціях. Оскільки критеріїв багато, потрібне компромісне проектно-технологічне рішення із використанням функціоналу якості (рівень бронезахищеності за наявності обмежень, лінійних за параметрами (товщини окремих бронеплит)). Крім того, цей критерій необхідно пов'язувати також із іншими: міцність, жорсткість, рухливість. У результаті виходить задача максимізації істотно нелінійного функціоналу.

Із використанням розроблених методів і моделей проведено також обґрунтування за критерієм захищеності від кінетичних боеприпасів карт розподілу товщин бронепанелей бронекорпусів інших ЛБМ. Завдяки цьому вдалося поліпшити бронестійкість цих легкоброньованих машин.

У результаті розв'язання комплексу описаних задач розроблено конкретні рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних параметрів.

Висновки. У роботі отримала рішення актуальна науково-практична проблема розробки теоретичних основ проектно-технологічного забезпечення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин шляхом обґрунтування технічних рішень бронекорпусів за критеріями захищеності, міцності, жорсткості, віброзбудливості від дії комплексу уражаючих чинників, що має велике значення для бронетанкобудування України. У ході досліджень отримані наступні наукові результати.

1. На основі розвитку методу узагальненого параметричного моделювання та поширення його на проектно-технологічні рішення розроблений новий підхід до забезпечення заданих тактико-технічних характеристик ЛБМ, який полягає в їх забезпеченні як результату взаємодії та взаємовпливу конструктивних рішень, технологічних режимів і умов виробництва. При цьому вперше множина технологічних чинників залучена як така, що певною мірою визначає рівень ТТХ, і як варійована, шукана.

2. Запропонований новий підхід інтегрований у комплекс математичних моделей, які, на відміну від відомих спрощених, є нелінійними та більш адекватними, і в них імплементовано усі варійовані, у тому числі технологічні, параметри. Також у цих моделях відображені не тільки фізичні, геометричні, структурні нелінійності, але і параметричні, що відрізняє їх від відомих. При цьому новими якостями створених моделей є те, що складові ТТХ можуть визначатися у ході аналізу

фізико-механічних процесів і станів як їхній прямий результат. Важливою відмінною особливістю даних моделей є врахування раніше неврахованих фізичних чинників, зокрема: залежність напружень не тільки від деформацій, а й від швидкості деформування; наявність декількох ділянок на кривій "напруження-деформації", а, відповідно, і формування критеріїв захищеності за різними умовами і рівнями; вплив технологічно зумовлених неоднорідностей за товщиною бронепанелей та в їх плані, що викликається термохімічними впливами при прокатці, гарячому штампуванні і при зварюванні бронелистів, на їх захисні властивості; вплив проектно-технологічних параметрів на динамічний НДС і віброзбудливість бронекорпусів; розширено множини чинників, що враховуються при моделюванні уражаючих впливів.

3. Комплекс математичних моделей на основі нового, заявленого в роботі, підходу реалізований у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу, який, на відміну від відомих, побудований на поєднанні переваг універсальних програмних продуктів і спеціалізованих модулів, які враховують особливості того чи іншого конкретного об'єкта досліджень і переводять їх у предметну область. На цій основі створені моделі газодинамічного обтікання бронекорпусів машин типу МТ-ЛБ, БТР-80, БТР-3Е та інших, а також їх пружно-пластичного деформування і руйнування під дією ударної хвилі та кінетичних боєприпасів, моделі динамічного НДС та віброзбудливості бронекорпусів при дії зусиль віддачі та інших чинників. Створений СПМК дає змогу інтегрувати його у системи автоматизованого проектування, ТПВ та досліджень, експлуатованих в КБ, НДІ, університетах, на підприємствах, причому у режимі їх штатного функціонування.

4. Проведений на цій основі комплекс числових досліджень реакції бронекорпусів ЛБМ на дію ударної хвилі, кінетичних снарядів, зусиль віддачі при стрільбі дав можливість установити закономірності їх впливу на захищеність та розробити рекомендації щодо обґрунтування проектно-технологічних параметрів. Зокрема, встановлено рівні надлишкового тиску, які призводять до початку руйнування елементів бронекорпусу. Як один із найбільш дієвих заходів запропонована заміна матеріалу внутрішньої силової структури бронекорпусів, що дає можливість підвищити граничне значення уражаючого надлишкового тиску за рахунок раціонального розкряку бронепанелі і розміщення зварних з'єднань на віддаленні від зон високих напружень, за рахунок чого вдається на підвищити стійкість до дії зусиль віддачі при здійсненні пострілів; шляхом відповідного розподілу товщини бронепанелей за проекціями бронекорпусу вдається забезпечити відлаштування від резонансних режимів. Рекомендовано також застосування нових бронесталей із більш високими механічними характеристиками.

У ході експериментальних досліджень всі результати числових розрахунків підтвердили свою точність. Було також підтверджено обґрунтованість розроблених на їх основі рекомендацій, причому як при полігонних випробуваннях, так і в ході експлуатації та бойового застосування ЛБМ.

Список літератури. 1. *Чепков И. Б.* К вопросу о методологии защитных устройств динамического типа / *И. Б. Чепков* // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2004. – № 4. – С. 14-18. 2. *Ларин А. Ю.* Повышение стойкости противопульной брони за счет увеличения угла нутации кинетического боеприпаса до его взаимодействия с преградой / *А. Ю. Ларин, И. Б. Чепков* // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2005. – № 1. – С. 36-39. 3. *Чепков И. Б.* Классификация защитных устройств динамического типа / *И. Б. Чепков* // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2004. – № 3. – С. 24-28. 4. *Кучинский А. В.* Метод оценки демпфирующих устройств взрывной защиты боевых бронированных машин / *А. В. Кучинский, М. И. Васковский, И. Б. Чепков* [и др.] // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2007. – № 1. – С. 3-8. 5. *Чепков И. Б.* Принципы и методы решения проблемы повышения защищенности и живучести ББМ с использованием защитных устройств динамического типа / *И. Б. Чепков, М. И. Васковский, А. Н. Неговский* // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2006. – № 1. – С. 11-16. 6. *Чепков И. Б.* Модель обоснования технических решений защитных устройств боевых бронированных машин / *И. Б. Чепков* // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2011. – № 4. – С. 42-46. 7. *Тимошенко А. Б.* Поражающее действие комбинированных преград снарядоформирующими зарядами / *А. Б. Тимошенко, И. Б. Чепков* // Артиллер. и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – С. 25-27. 8. *Основы военно-технических исследований.* Теория и приложения: монография: [в 4 т.]. Т. 4. Методология исследования сложных систем военного назначения / *С. В. Лапицкий, А. В. Кучинский, А. И. Сбитнев* [и др.]; ред.: С. В. Лапицкий. – К.: 2013. – 477 с. 9. *Ткачук Н. А.* Основы обобщенного параметрического описания сложных механических систем / *Н. А. Ткачук, А. Д. Чепурной, Г. Д. Гриценко* [и др.] // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2007. – №9(115), част. 1. – С. 196-205. 10. *Ткачук Н. А.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / *Н. А. Ткачук, Г. Д. Гриценко, А. Д. Чепурной* [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – № 1. – С. 57-79. 11. *Бруль С. Т.* Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты / *С. Т. Бруль, Н. А. Ткачук, А. Ю. Васильев* [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – № 1. – С. 66-73. 12. *Ткачук Н. А.* Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза элементов транспортных средств специального назначения / *Н. А. Ткачук, С. Т. Бруль, А. Н. Малакей* [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – №1. – с.184-194. 13. *Литвиненко А. В.* Общий подход к проектно-технологическому обеспечению защищенности бронекорпусов транспортных средств специального назначения / *А. В. Литвиненко, Н. А. Ткачук, Б. Я. Литвин* [и др.] // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – № 2. – С. 221-229. 14. *Ткачук Н. А.* Линеаризация функции отклика прочностных и динамических характеристик тонкостенных конструкций на изменение толщины / *Н. А. Ткачук, А. В. Литвиненко, Ю. В. Костенко* [и др.] // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – №14 (1057). – С. 138-154. 15. *Ткачук Н. А.* Чувствительность прочностных и жесткостных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций к неравномерному изменению толщины / *Н. А. Ткачук, А. В. Литвиненко, А. В. Ткачук* [и др.] // Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – Вип. 137. – С.187-191. 16. *Танченко А. Ю.* Метод прямого конечного возмущения конечно-элементных моделей при численном исследовании динамических, жесткостных и прочностных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций / *А. Ю. Танченко, А. В. Литвиненко, А. Д. Чепурной* [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – Брянск: БГУ, 2014. – № 4(44). – С. 114-124.

Bibliography (transliterated): 1. *Chepkov I. B.* "K voprosu o metodologii zaschitnyh ustroystv dinamicheskogo tipa." *Artiller. i strelkovoe vooruzhenie.* No. 4. 2004. 14-18. Print. 2. *Larin A. Yu., Chepkov I. B.* "Povyishenie stoykosti protivopulnoy bronii za schet uvelicheniya ugla nutatsii kineticheskogo boeprpasa do ego vzaimodeystviya s pregradoy". *Artiller. i strelkovoe vooruzhenie.* No. 1. 2005. 36-39. Print. 3. *Chepkov I. B.* "Klassifikatsiya zaschitnyh ustroystv dinamicheskogo tipa" *Artiller. i strelkovoe vooruzhenie.* No. 3.

2004. 24–28. Print. **4.** Kuchinskiy A.V., Vaskovskiy M.I., Chepkov I.B. "Metod otsenki dempfiruyuschih ustroystv vzryivnoy zashchity boevyih bronirovannyih mashin". *Artiller. i strelkovoe vooruzhenie*. No1. 2007. 3–8. Print. **5.** Chepkov I.B., Vaskovskiy M.I., Negovskiy A.N. "Printsipy i metody resheniya problemy povyisheniya zashchischnosti i zhivuchesti BBM s ispolzovaniem zashchitnyh ustroystv dinamicheskogo tipa" *Artiller. i strelkovoe vooruzhenie*. No1. 2006. 11–16. Print. **6.** Chepkov I.B. "Model obosnovaniya tehniceskikh resheniy zashchitnyh ustroystv boevyih bronirovannyih mashin". *Artiller. i strelkovoe vooruzhenie*. No 4. 2011. 42–46. Print. **7.** Timoshenko A.B., Chepkov I.B. "Porazhayushee deystvie kombinirovannyih pregrad snaryadoformiruyuschimi zaryadami". *Artiller. i strelkovoe vooruzhenie*. No3. 2011. 25–27. Print. **8.** "Osnovy voenno-tehniceskikh issledovaniy. Teoriya i prilozheniya": monografiya: [v 4 t.]. T. 4. Metodologiya issledovaniya slozhnyh sistem voennogo naznacheniya / S.V. Lapitskiy, A.V. Kuchinskiy, A.I. Sbitnev [i dr.]; Kyiv: 2013. Print. **9.** N.A. Tkachuk, A.D. Chepurnoy, G.D. Gritsenko [i dr.] "Osnovy obobschennogo parametricheskogo opisaniya slozhnyh mehanicheskikh sistem". *Visnik Shidnoukr. nats. un-tu im. V.Dalya*. No9(115), ch. 1. 2007. 196–205. Print. **10.** Tkachuk N.A., Gritsenko G.D., Chepurnoy A.D. [i dr.] "Konechno-elementnyie modeli elementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologiya avtomatizirovannoy generatsii i parametrizovannogo opisaniya". *Mehanika ta mashinobuduvannya*. No 1. 2006. 57–79. Print. **11.** Brul S.T., Tkachuk N.A., Vasilev A.Yu. [i dr.] "Modelirovanie fiziko-mehanicheskikh protsessov v korpusah

legkobronirovannyih mashin: podhody, modeli, efekty". *Mehanika ta mashinobuduvannya*. No 1. 2011. 66–73. Print. **12.** Tkachuk N.A., Brul S.T., Malakey A.N. [i dr.] "Struktura spetsializirovannyih integrirovannyih sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza elementov transportnyh sredstv spetsialnogo naznacheniya". *Mehanika ta mashinobuduvannya*. No1. 2005. 184–194. Print. **13.** Litvinenko A.V., Tkachuk N.A., Litvin B.Ya. [i dr.] "Obschiy podhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniyu zashchischnosti bronekorpusov transportnyh sredstv spetsialnogo naznacheniya". *Mehanika ta mashinobuduvannya*. No 2. 2012. 221–229. Print. **14.** Tkachuk N.A., Litvinenko A.V., Kostenko Yu.V. [i dr.] "Linearizatsiya funktsii otklika prochnostnyh i dinamicheskikh karakteristik tonkostennyh konstruktсий na izmenenie tolschiny". *Visnik NTU "KhPI"*. No14 (1057). 2014. 138–154. Print. **15.** Tkachuk N.A., Litvinenko A.V., Tkachuk A.V. [i dr.] "Chuvstvitelnost prochnostnyh i zhestkostnyh karakteristik tonkostennyh elementov mashinostroitelnyh konstruktсий k neravnomernomu izmeneniyu tolschiny". *Visnik SevNTU. SerIya: Mehanika, energetika, ekologiya*. Vyp. 137. 2013. 187–191. Print. **16.** Tanchenko A.Yu., Litvinenko A.V., Chepurnoy A.D. [i dr.] "Metod pryamogo konechnogo vozmuscheniya konechno-elementnyh modeley pri chislenom issledovanii dinamicheskikh, zhestkostnyh i prochnostnyh karakteristik tonkostennyh elementov mashinostroitelnyh konstruktсий" *Vestnik Bryansk. gosud. tehnic. universiteta*. No 4(44). 2014. 114–124. Print.

Надійшла (received) 01.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», тел.: (057) 7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Tkachuk Mykola Anatoliyovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chief of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Литвиненко Олександр Віталійович – кандидат технічних наук, директор Науково-інженерного центра керуючої компанії «Рейлтрансхолдінг», м. Маріуполь, тел.: (0629) 409917; e-mail: niz.office@ukrth.com.

Litvinenko Alexandr Vitaliyevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Director of Scientific and Engineering Center of Management Company "Railtransholding", Mariupol, tel.: (0629) 409917; e-mail: niz.office@ukrth.com.

Грабовський Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; тел.: (057) 7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Grabovskiy Andrey Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057) 7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Цебрюк Іван Вікторович – кандидат технічних наук, Національна академія Національної гвардії України, м. Харків, доцент кафедри експлуатації та ремонту автомобілів та бойових машин.

Cebrjuk Ivan Viktorovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), The National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, assistant professor of maintenance and repair of cars and military vehicles.