

*Ткачук Н. А., д-р техн. наук; Заворотный А. В., Грабовский А. В., канд. техн. наук;
Литвиненко А. В., д-р техн. наук; Климов В. Ф., канд. техн. наук; Богач А. С.,
канд. техн. наук; Храмова И. Я.; Пархонюк И. П.*

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БРОНЕКОРПУСОВ К ИЗМЕНЕНИЮ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Введение. Как отмечается в ряде работ [1, 2, 3, 5, 7-9], при проектировании новых транспортных средств специального назначения (ТССН) типа бронетранспортеров (БТР), боевых машин пехоты (БМП), боевых машин десанта (БМД) и их модернизации возникает масштабный комплекс работ по проектированию, исследованию и технологической подготовке производства. При этом, как известно, преобладающей тенденцией современного бронетанкостроения является широкое применение CAD/CAE/CAM-систем как при проектировании элементов машин, так и при технологической подготовке их производства. Поскольку универсальные компьютерные системы, применяемые на большинстве отечественных предприятий, не всегда в полной мере дают возможность учитывать специфику конструкций БТР, БМП, БМД, технологической оснастки и оборудования отечественных предприятий бронетанкостроения, то возникает актуальная и важная задача интенсификации и повышения качества работ на этапах разработки и изготовления. Для решения получаемой задачи предлагается развитие подхода, описанного в работах [4,5].

Методы исследований. Отличительной особенностью сложившейся в настоящее время ситуации является акцентированное внимание, которое уделяется анализу влияния проектных параметров на характеристики элементов ТССН и на тактико-технические характеристики (ТТХ) машин в целом. При этом существенно меньшее внимание исследователей уделено выявлению влияния технологических режимов, возможностей оборудования, оснастки и условий производства на результирующие ТТХ, реально достигаемые на конкретных изделиях, хотя наличие и важность такого влияния очевидны. В связи с этим актуальной, важной и новой научно-практической проблемой является развитие подходов, методов, моделей, алгоритмов и программного обеспечения, которые предоставляют возможности не только увязать ТТХ проектируемых машин с множеством технологических и производственных факторов, но и создать основы решения задачи обоснования таких параметров, которые бы не ухудшали конструктивно заложенные показатели их ТТХ. Поскольку возникающая проблема выходит за пределы применимости известных подходов [7], а общие принципы, изложенные в этих работах, достаточно привлекательны и имеют значительный потенциал развития и обобщения, то в данной работе предлагается совершенствование обобщенного параметрического моделирования и адаптация на множество технологических и производственных факторов, влияющих на ТТХ проектируемых ЛБМ.

Отталкиваясь от подходов, изложенных в работе [10], рассматривается три типа факторов, обуславливающих ТТХ проектируемых машин. Во-первых, это проектные параметры $P_G^{(i)}, i = 1, \dots, N_G$, которые определяют общую компоновку машин, габаритные и присоединительные размеры отдельных элементов, свойства материалов и т.п. Во-вторых, это режимы боевого применения данных машин $P_B^{(k)}, k = 1, \dots, N_B$, которые в целом определяют виды и степени воздействий на элементы БТР, БМП, БМД. В-третьих, это технологические режимы изготовления элементов исследуемых машин $P_T^{(j)}, j = 1, \dots, N_T$. Последние

© Н.А. Ткачук, 2017

порождаются типами обработки, видами технологических операций и назначенными технологическими режимами. В комплексе все три множества параметров P_G, P_B, P_T образуют множество обобщенных параметров, в целом определяющих уровень достигаемых ТТХ:

$$T = T(p), \quad P = \{P_G, P_B, P_T\}^T. \quad (1)$$

Здесь T – массив ТТХ, P – объединенное множество обобщенных параметров.

Естественно, что для многих компонент ТТХ установление связи (1) требует проведения анализа процессов и состояний, которые сопровождают все этапы жизненного цикла изделия, в особенности – в условиях боевого применения:

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

где L – оператор процесса или состояния, u – массив переменных, описывающих исследуемый процесс или состояние, t – время, f – внешнее воздействие на исследуемый объект.

Например, в качестве системы (2) могут выступать уравнения теории упругости (для определения НДС массивных тел, оболочек, пластин или стержней), уравнения теории колебаний (для определения частот и форм колебаний или переходных процессов). В любом случае система уравнений (2) устанавливает (обычно в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных) связь переменных состояния u с параметрами p , проявляющаяся в виде параметрического семейства:

$$u = u(f, p, t) \quad (3)$$

по итогам интегрирования (2).

Имея в распоряжении соотношения (2), можно ставить задачи обеспечения требуемых ТТХ

$$T^{(s)}(u(p)) \rightarrow \max(\min), \quad s = 1, 2, \dots \quad (4)$$

при некоторых ограничениях H_* на отдельные величины

$$H^{(q)}(u(p)) \leq H_*^{(q)}, \quad q = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Так, например, в качестве критериев (4) могут выступать масса, скорость движения машины, степень деформирования ее отдельных элементов и т.п. Как ограничения могут фигурировать прочностные свойства используемых материалов, допустимые амплитуды или частоты колебаний и другие величины.

Таким образом, соотношения (1)-(5) формируют систему соотношений, позволяющих ставить и решать задачи параметрического анализа, чувствительности, а также структурного и параметрического синтеза. При этом, в отличие от традиционных подходов, пространство варьируемых параметров содержит также новое, ранее не учитываемое множество величин – технологические и производственные параметры P_T (см. выше). Это существенно расширяет возможности и результативность предлагаемого усовершенствованного подхода как в плане полноты математической модели, ее адекватности, так и в плане практической эффективности получаемых результатов исследований. Также важным вопросом является точность компьютерного моделирования, используемого для получения решений (2), способ-

ность бесконфликтного обмена информацией между этапами и системами геометрического моделирования (CAD), исследований (CAE) и технологической подготовки производства (CAM). Кроме того, не менее важной является проблема верификации параметров математической и численной моделей, описывающих исследуемый объект.

Все описанные выше задачи формально могут быть охвачены подходами, описанными в работе [10]. В то же время, как отмечалось выше, само множество определяющих параметров в настоящей работе расширено именно за счет неучитываемых ранее технологических и производственных факторов. Это составляет существенное дополнение с точки зрения решения конечной задачи обеспечения требуемых ТТХ проектируемых машин специального назначения.

Следует заметить, что в зависимости от типа исследуемого процесса или состояния (2), критериев и ограничений (4), (5) порядок и содержание решения возникающих при этом задач видоизменяются. В связи с этим предлагается проиллюстрировать некоторые этапы исследований на примере анализа изменения спектра собственных частот колебаний (СЧК) бронекорпусов транспортных средств специального назначения при изменении их проектно-технологических параметров.

Анализ влияния толщины и свойств материалов элементов бронекорпусов на спектр собственных частот их колебаний. Рассмотрим бронекорпус транспортного средства специального назначения, определяемый проектно-технологическими его параметрами (форма и размеры бронепанелей в плане, карта распределения толщин листов и силовой структуры в проекциях, свойства материалов элементов бронекорпуса и сварных швов и т.п.). Поскольку корпус является основным элементом, объединяющим и интегрирующим все агрегаты и системы машины, то он в процессе эксплуатации и боевого применения подвергается множеству динамических воздействий (как от внешних, так и от внутренних источников). В связи с этим чрезвычайно важным является вопрос определения спектра собственных частот его колебаний, поскольку собственные частоты и формы колебаний во многом определяют наблюдаемые переходные и установившиеся колебательные процессы. В свою очередь это влияет, например, на точность стрельбы (за счет деформирования подбашенного листа), на прочность и жесткость элементов бронекорпуса (определяют уровень защищенности) и т.п. Более того, вследствие разброса технологических режимов изготовления бронекорпусов (получается вследствие разброса толщин листов-заготовок, поступающих от металлургических производств; вследствие применения тех или иных типов сварных швов и конкретных условий и качества выполнения сварки; вследствие разнородности микроструктуры, химического состава, твердости и прочности слоев материалов бронепанелей по толщине; вследствие изменения свойств материалов бронепанелей в зонах сварных швов и т.п.).

Учитывая, что данное варьирование накладывается на варьирование проектных параметров бронекорпусов, получаемое множество варьируемых величин сильно разрастается, приводя к лавинообразному росту объема исследований. В то же время можно отметить, что во многих случаях диапазон варьирования отдельных параметров незначителен. Так, массо-геометрические характеристики сварных конструкций изменяются в пределах 2-5 %; такой же порядок диапазона варьирования – для распределения толщины в плане в пределах бронепанелей, а также массы и моментов инерции размещаемых в/на бронекорпусе систем и агрегатов и т.п.

Таким образом, исходная задача модифицируется, приобретая характер анализа чувствительности исследуемых характеристик бронекорпусов на конечное, но малое изменение проектно-технологических параметров. Для ее решения предлагается применить подходы, предложенные к использованию для тонкостенных элементов конструкций в ряде работ [5, 8, 9] и развитые в работе в работе [10]. Следуя этому подходу, переходим от континуальной формулировки задачи (2) к дискретной ее форме. Применительно к задаче определения

спектра СЧК бронекорпусов наиболее эффективно применение метода конечный элементов (МКЭ) [6]. С учетом варьирования отдельных параметров получаем соотношения для определения собственных частот $\omega_i(p)$, где $p = \{p_1, \dots, p_n\}^T$. Разрешающая система уравнений принимает вид:

$$\det(K(p) - \omega^2 M(p)) = 0, \quad (6)$$

где K, M – матрицы жесткости и масс конечно-элементных ансамблей, моделирующих исследуемые бронекорпуса.

В соотношениях (6) можно отвлечься от природы параметрических зависимостей, сконцентрировав внимание, например, на зависимости собственных частот ω_i от карты распределения толщин по панелям бронекорпуса:

$$h_\mu = h_\mu(p), \mu = 1, \dots, N_n. \quad (7)$$

Здесь h_μ – реальная толщина элемента μ бронекорпуса (детализация – вплоть до размеров конечного элемента) как функция проектно-технологических параметров p . Как отмечалось выше, в силу действия множества факторов p , распределение h_μ представляет определенную функцию и учитываемых параметров p , и неучитываемых стохастических воздействий p ; в результате чего

$$h_\mu = h_\mu^0 - \Delta h_\mu(p, p^\sim), \quad (8)$$

где h_μ^0 – распределение "номинальных" толщин (т.е. толщин для некоторого базового варианта бронекорпуса), Δh_μ – отклонения этих толщин в актуальном варианте по сравнению с базовым.

В уравнениях (8), как уже отмечалось, можно отвлечься на определенном этапе от природы возникновения Δh_μ , обратив внимание лишь на их малости:

$$\Delta h_\mu / h_\mu \ll 1 \forall \mu. \quad (9)$$

Применив используемые в работе [5] обозначения $\alpha_\mu = \Delta h_\mu / h_\mu$ и сформировав соответствующий массив относительных параметров $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{N_h}\}^T$, для определения собственных частот колебаний бронекорпусов можно применить следующий прием: СЧК представляются в виде зависимости

$$\omega_i(\alpha) \approx \omega_i^{(0)} \left(1 - \frac{1}{2} (\delta_K^G - \delta_M^G) \right), i = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

где $\omega_i^{(0)}$ – решения (6) при $h_\mu = h_\mu^{(0)}$, а коэффициенты

$$\delta_K = \sum_k r_k \alpha_k; \quad (11) \quad \delta_M = \sum_k s_k \alpha_k, \quad (12)$$

где r, s – некоторые коэффициенты линейных форм от массива параметров α .

Таким образом, соотношения (10) декларируют примерно линейную зависимость $\omega_i(\alpha)$. В то же время можно обратиться к существующим нормам на допустимое изменение толщин h_{μ} , что диктует справедливость соотношений

$$\alpha \leq \alpha^*, \quad (13)$$

где α^* – предельно допустимое варьирование толщин отдельных элементов бронекорпуса на этапе проектирования и технологической подготовки производства.

С учетом этого предлагается также привлечь для вычисления чувствительности вместо соотношений (10)-(12) альтернативные конечно-разностные соотношения [5, 8, 9]:

$$\omega_i(\alpha_p^{\sim}) = \omega_i^{(0)} \left(1 - \sum_s \Delta_s \cdot \alpha^* \right), \quad (14)$$

где $\alpha_p^{\sim} = \{0; 0; \dots \alpha^*; \dots 0\}^T$ – массив параметров, в котором ненулевым является только компонента α под номером p , $\Delta_s^{(i)}$ – компоненты чувствительности.

Определив из (14) $\Delta_s^{(i)}$, для произвольного набора α получаем:

$$\omega_i(\alpha) = \omega_i^{(0)} \left(1 - \sum \alpha \cdot \Delta^{(i)} \right). \quad (15)$$

Соответственно, для определения величин $\Delta_s^{(i)}$ необходимо вычислять корни системы уравнений (6) при наборах параметров $\alpha_p^{\sim}$. Учитывая высокие возможности современных программных комплексов, реализующих МКЭ, многовариантные расчеты спектров собственных частот $\omega_i(\alpha_p^{\sim})$ не составляют значительных затруднений. В силу этого получаемые решения дают возможность отслеживать тенденции и величины изменения СЧК при варьировании толщин элементов бронекорпусов. Таким образом, общие соотношения, изложенные в работе [10], получили свою удобную для алгоритмизации форму.

Структура специализированного программно-модельного комплекса (СПМК).

Структура специализированного ПМК, реализующего заявленные исследования, предлагается в следующем виде (рис. 1). Отличительной особенностью функционирования данного СПМК является целенаправленное варьирование параметров на этапе 6 на основе данных о чувствительности, получаемых на этапе 5. Важно, что, в отличие от известных подходов, здесь реализована процедура "плавающего" набора реперных решений, т.е. он периодически изменяется, локализуясь и сужаясь. Это повышает точность решения задачи.

В качестве иллюстрирующего примера представлено исследование реакции спектра СЧК бронекорпуса МТ-ЛБ на изменение толщин бронепанелей. Общий вид модели бронекорпуса МТ-ЛБ и его конечно-элементная модель (КЭМ) (на основе Shell-элементов) представлены на рис. 2 (при толщинах элементов корпуса 6 мм), на рис. 3 приведены некоторые формы колебаний корпуса МТ-ЛБ, а на рис. 4 – зависимость собственных частот колебаний от толщины. Эти иллюстрации подтверждают возможность линеаризации зависимостей $\omega_s = \omega_s(\alpha)$ с сохранением точности до существенных значений α .

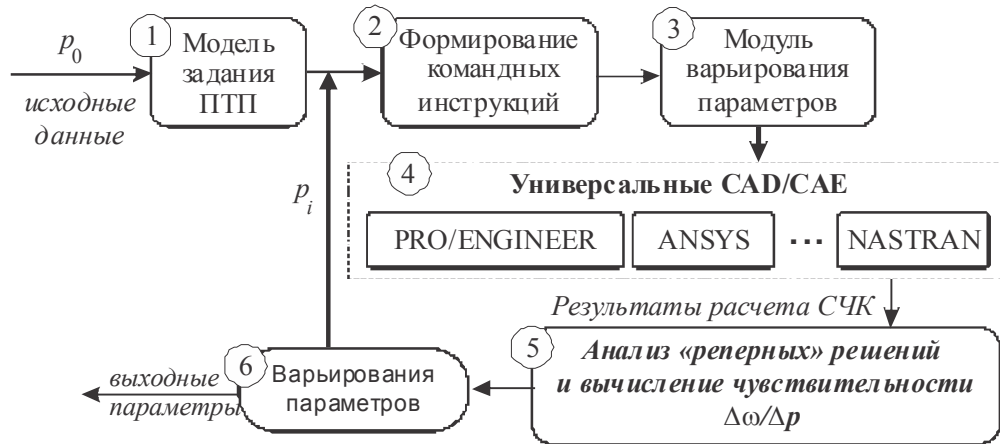


Рис. 1. Структура СПМК для анализа чувствительности вибрационных характеристик бронекорпуса (СЧК) на варьирование проектно-технологических параметров (ПТП)



Рис. 2. Общий вид корпуса МТ-ЛБ: *a* – модель корпуса бронетранспортера с одинаковой толщиной бронепанелей во всех проекциях; *б* – КЭМ (на основе Shell-элементов)

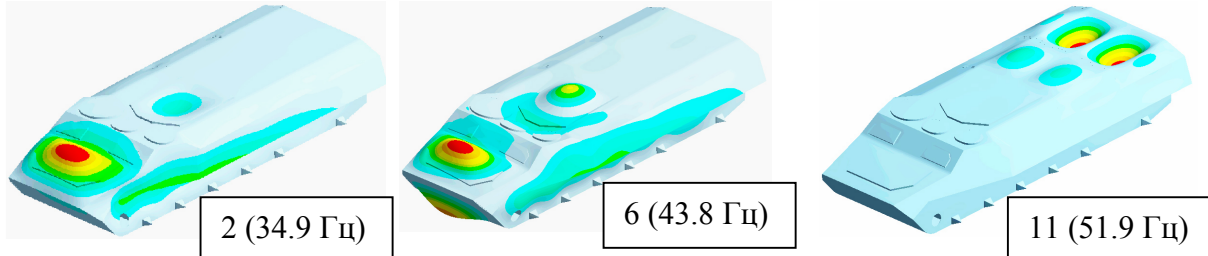


Рис. 3. Некоторые собственные формы колебаний корпуса МТ-ЛБ (при толщинах элементов корпуса 6 мм)

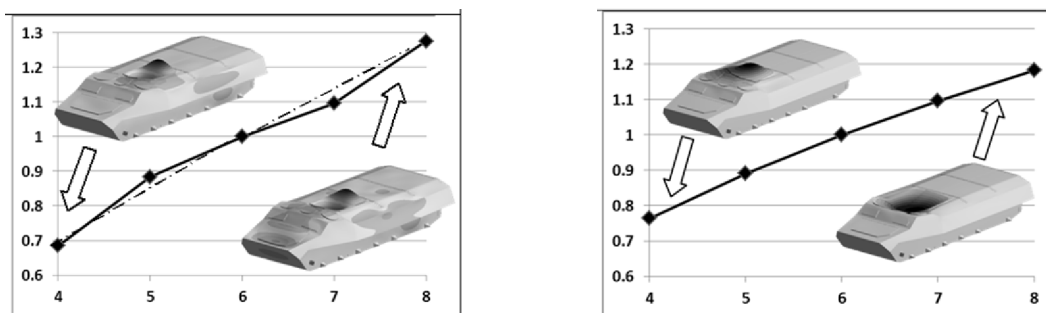


Рис. 4. Изменения собственной частоты, отнесенной к собственной частоте при толщине элементов корпуса 6 мм, и изменение соответствующей ей формы колебаний при варьировании толщин элементов корпуса в диапазоне 6 ± 2 мм

Выводы. Можно заключить, что в работе описан новый подход к расчету бронекорпусов транспортных средств специального назначения путем анализа чувствительности характеристик вибровозбудимости бронекорпусов на варьирование проектно-технологически-производственных параметров. Получены следующие результаты.

1. Путем пополнения множества обобщенных параметров, определяющих ТТХ проектируемого и изготавливаемого ТССН, удастся, в отличие от известных подходов, за счет неучитываемых ранее технологических и производственных факторов расширить постановку задачи об обосновании рациональных проектно-технологических параметров вновь создаваемой или модернизируемой машины.

2. На примере бронекорпусов машин типа МТ-ЛБ исследовано влияние варьирования толщин бронепанелей на изменения отдельных характеристик. При этом установлено, что малые степени изменения толщин оказывают близкое к линейному влияние на отдельные характеристики бронекорпуса. В частности, на примере спектра собственных частот бронекорпуса МТ-ЛБ подтверждены близкие к линейному закону тенденции изменения отдельных частот при малом, но конечном (в пределах $\pm 33\%$) утонении/утолщении его бронепанелей.

3. С учетом возможности линеаризации отклика характеристик бронекорпусов на варьирование толщин бронепанелей предложен новый подход к решению задач параметрического анализа и синтеза. Он состоит в том, что исходную задачу целесообразно решать в два этапа. На первом устанавливаются линеаризованные зависимости контролируемых характеристик от толщин бронепанелей h или степеней их утонения α , и по этим зависимостям решаются те или иные конкретные задачи в координатах h , α ; на втором этапе конкретизируются зависимости h , α от проектно-технологических параметров p , и решение переводится в эти координаты.

4. Предложенный подход с декомпозицией задач параметрического анализа и синтеза разделяет исходную постановку на 2 этапа, в которых соединяются: на первом – сложные задачи анализа процессов и состояний, но линеаризованные упрощенные зависимости – для задач параметрического анализа и синтеза; на втором – сложные зависимости толщин от проектных параметров, но без необходимости решения сложных задач анализа процессов и состояний. Таким образом, находят рациональное сочетание требования к необходимым вычислительным ресурсам: задачи анализа и синтеза разнесены с использованием в качестве промежуточного параметра массива толщин бронепанелей.

Учитывая значительную актуальность задачи обоснования рациональных проектно-технологических параметров, обеспечивающих заданные ТТХ перспективных ТССН, данный подход в дальнейшем обладает широкими возможностями при решении различных задач на этапах проектирования, исследования и ТПП этих машин, причем он распространяется на весь комплекс проектно-технологически-производственных параметров, а не только на толщины бронепанелей.

Литература: 1. Литвиненко А.В. Применение специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных механических конструкций: определение напряженно-деформированного состояния и обоснование параметров / Г.Д. Гриценко, А.В. Ткачук, Н.А. Ткачук [и др.] // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – №14. – С. 17-25. 2. Литвиненко О.В. Комплексне дослідження міцності та жорсткості корпусів транспортних засобів спеціального призначення / Є.В. Пелешко, М.А. Ткачук, С.Т. Бруль [и др.] // Вісник НТУ

"ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – № 39. – С. 116-131. 3. Литвиненко А.В. Совершенствование математических и численных моделей напряженно-деформированного состояния элементов бронекорпусов при действии ударной волны / А.В. Литвиненко, Н.А. Ткачук, А.Ю. Васильев [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – № 1. – С. 155-161. 4. 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. 5. Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / Н.А. Ткачук, А.Ю. Танченко, А.Н. Ткачук, [и др.] // *Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип.: Машинознавство та САПР*. – 2012. – №22. – С. 147-169. 6. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems / Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Mc Graw-Hill, London, 1989. – 725 p. 7. 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. 8. Танченко А.Ю. Связанная задача о напряженно-деформированном состоянии и коррозионном утонении тонкостенных элементов конструкций / А.Ю. Танченко // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010 – №1. – С. 55-60. 9. Танченко А.Ю. Напряженно-деформированное состояние пространственных тонкостенных конструкций с учетом утонения стенок несущих элементов / А.Ю. Танченко, Н.А. Ткачук, Ю.Б. Гусев // *Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія*. – Севастополь, 2011. – Вип. 120. – С. 35-40. 10. Хлань А.В. Проектно-технологически-производственное обеспечение тактико-технических характеристик боевых бронированных машин: подходы, модели и методы / А. В. Хлань, А. Н. Малакей; Н. А. Ткачук [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ "ХПІ", 2017 – №1.

Bibliography (transliterated): 1. Litvinenko A.V. Primenenie spetsializirovannyih sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza slozhnyih mehanicheskikh konstruktсий: opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i obosnovanie parametrov / G.D. Gritsenko, A.V. Tkachuk, N.A. Tkachuk [i dr.] // *Visnyk NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2008. – #14. – S. 17-25. 2. Lytvynenko O.V. Kompleksne doslidzhennya mitsnosti ta zhorstkosti korpusiv transportnykh zasobiv spetsial'noho przyznachennya / Ye.V. Peleshko, M.A. Tkachuk, S.T. Brul' [y dr.] // *Visnyk NTU "KhPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2010. – # 39. – S. 116-131. 3. Litvinenko A.V. Sovershenstvovanie matematicheskikh i chislennyih modeley napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov bronekorpusov pri deystvii udarnoy volny / A.V. Litvinenko, N.A. Tkachuk, A.Yu. Vasilev [i dr.] // *Mekhanika ta mashynobuduvannya*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. – # 1. – S. 155-161. 4. Litvinenko A.V. Obschiy podhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniyu zaschischennosti bronekorpusov transportnykh sredstv spetsial'nogo naznacheniya / A.V. Litvinenko, N.A. Tkachuk, B.Ya. Litvin [i dr.] // *Mekhanika ta mashynobuduvannya*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. – # 2. – S. 221-229. 5. Analiz chuvstvitel'nosti prochnostnykh i dinamicheskikh harakteristik mashinostroitel'nykh konstruktсий na osnove pryamogo vozmuscheniya konechno-elementnykh modeley / N.A. Tkachuk, A.Yu. Tanchenko, A.N. Tkachuk, [i dr.] // *Visnyk NTU "KhPI". Tem.vyp.: Mashynoznavstvo ta SAPR*. – 2012. – #22. – S. 147-169. 6. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method. Vol. 1: Basic Formulation and Linear Problems / Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Mc Graw-Hill, London, 1989. – 725 p. 7. Konechno-elementnyie modeli elementov slozhnykh mehanicheskikh sistem: tehnologiya avtomatizirovannoy generatsii i parametrizovannogo opisaniya / N.A. Tkachuk, G.D. Gritsenko, A.D. Chepurnoy [i dr.] // *Mekhanika ta mashynobuduvannya*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2006. – # 1. – S. 57-79. 8. Tanchenko A.Yu. Svyazannaya zadacha o napryazhenno-

deformirovannom sostoyanii i korrozionnom utonenii tonkostennyih elementov konstruktsiy / A.Yu. Tanchenko // Mekhanika ta mashynobuduvannya. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2010 – #1. – S. 55-60.
9. Tanchenko A.Yu. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie prostranstvennyih tonkostennyih konstruktsiy s uchetom utoneniya stenok nesuschih elementov / A.Yu. Tanchenko, N.A. Tkachuk, Yu.B. Gusev // Visnyk SevNTU. Seriya: Mekhanika, enerhetyka, ekolohiya. – Sevastopol', 2011. – Vyp. 120. – S. 35-40. **10.** Hlan A.V. Proektno-tehnologicheskii-proizvodstvennoe obespechenie taktiko-tehnicheskikh harakteristik boevyih bronirovannyih mashin: podhody, modeli i metody / A. V. Hlan, A. N. Malakey; N. A. Tkachuk [i dr.] // Mekhanika ta mashynobuduvannya. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017 – #1.

Ткачук М. А., Заворотний А. В., Грабовський А. В., Литвиненко О. В., Клімов В. Ф.,
Богач А. С., Храмцова І. Я., Пархонюк І. П.

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ВІБРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БРОНЕКОРПУСІВ ДО ЗМІНИ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

В роботі запропонована загальна структура, а також варіанти реалізації спеціалізованого програмно-модельного комплексу для оцінки та забезпечення захищеності, міцності, жорсткості, віброзбудливості бронекорпусів легкоброньованих машин. При цьому реалізований новий підхід до розв'язання задач синтезу проектно-технологічних рішень і параметрів бронекорпусів легкоброньованих машин і дослідження фізико-механічних процесів і станів при їх бойовому використанні на основі результатів комп'ютерного моделювання.

Ткачук Н. А., Заворотный А. В., Грабовский А. В., Литвиненко А. В., Климов В. Ф.,
Богач А. С., Храмцова И. Я., Пархонюк И. П.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БРОНЕКОРПУСОВ К ИЗМЕНЕНИЮ ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В работе предложена общая структура, а также варианты реализации специализированного программно-модельного комплекса для оценки и обеспечения защищенности, прочности, жесткости, вибровозбудимости бронекорпусов ЛБМ. При этом реализован новый подход к решению задач синтеза проектно-технологических решений и параметров бронекорпусов легкобронированных машин и исследования физико-механических процессов и состояний при их боевом использовании на основе результатов компьютерного моделирования.

M. Tkachuk, A. Zavorotnyi, A. Grabovskiy, A. Lytvynenko, V. Klimov, A. Bogach,
I. Khramtsova, I. Parkhoniuk

SENSITIVITY ANALYSIS OF ARMORED HULLS VIBRATION CHARACTERISTICS ON CHANGE OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS

The general structure and implementing options for specialized software and model complex are proposed. This complex is developed for evaluating and ensuring the security, strength, rigidity, vibration excitability of lightly armored vehicles hulls. At the same time, a new approach to the solution of synthesis problems of design and technological solutions and parameters of lightly armored vehicles hulls. This approach is based on computer modeling results of physical and mechanical processes and states during combat use of these vehicles.