

*А. В. НАБОКОВ, Н. А. ТКАЧУК, А. Н. МАЛАКЕЙ, А. В. ГРАБОВСКИЙ, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ,
С. В. КУЦЕНКО, А. Ю. ТАНЧЕНКО, Е. С. АНАНЬИН*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КОРПУСЕ ЛЕГКОБРОНИРОВАННОЙ МАШИНЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В работе описаны вопросы моделирования динамических процессов в легкобронированных машинах. С помощью метода параметрического моделирования исследуемый объект описан множеством варьируемых параметров, которые полностью идентифицируют динамическую систему "боевой модуль–бронекорпус–подвеска". Для определения рациональных параметров предложено проводить численное моделирование на основе интегрирования уравнений движения с помощью метода конечных элементов. На основе анализа результатов исследований определяются параметры, которые удовлетворяют соответствующим критериям и ограничениям. В частности, выявляются опасные резонансные режимы и формулируются критерии отстройки от этих режимов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, динамический процесс, темп стрельбы, боевой модуль, прочность, бронекорпус, тактико-техническая характеристика, метод конечных элементов, синтез, ударный резонанс

*А. В. НАБОКОВ, М. А. ТКАЧУК, А. М. МАЛАКЕЙ, А. В. ГРАБОВСКИЙ, А. Ю. ВАСИЛЬЕВ,
С. В. КУЦЕНКО, А. Ю. ТАНЧЕНКО, Е. С. АНАНЬИН*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КОРПУСІ ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ МАШИНИ ПРИ ІМПУЛЬСНІЙ ДІЇ

У роботі описані питання моделювання динамічних процесів у легкоброньованих машинах. За допомогою методу параметричного моделювання досліджуваній об'єкт описаний множиною варіюваних параметрів, які повністю ідентифікують досліджувану динамічну систему "бойовий модуль – бронекорпус – підвіска". Для визначення раціональних параметрів запропоновано проводити чисельне моделювання на основі інтегрування рівнянь руху за допомогою методу скінченних елементів. На основі аналізу результатів досліджень визначаються параметри, які задовольняють відповідним критеріям та обмеженням. Зокрема, виявляються небезпечні резонансні режими та формулюються критерії відлаштування від цих режимів.

Ключові слова: напружено-деформований стан, динамічний процес, темп стрільби, бойовий модуль, міцність, бронекорпус, тактико-технічна характеристика, метод скінченних елементів, синтез, ударний резонанс

*A. NABOKOV, M. TKACHUK, A. MALAKEY, A. GRABOVSKIY, A. VASILIEV,
S. KUTSENKO, A. TANCHENKO, E. ANAN'IN*

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN THE HULL OF LIGHTLY ARMORED VEHICLE UNDER IMPULSIVE ACTION

The paper describes the questions of modeling of dynamic processes in lightly armored vehicles. The studied object is associated with a parameter set that adequately describes battle module, armored hull and suspension as a dynamic system. The obtained set of variables completely identifies this dynamic system. It is proposed to carry out numerical modeling based on the integration of motion equations by the finite element method in order to determine the rational parameters. On the basis of analysis of researches results, parameters are determined that satisfy the relevant criteria and constraints. In particular, dangerous resonance modes are detected and the criteria for disabling from these regimes are formulated.

Keywords: stress-strain state, dynamic process, firing rate, battle module, strength, armored hull, tactical and technical characteristic, finite element method, synthesis, shock resonance

Введение. Среди основных тенденций мирового и отечественного бронетанкостроения выделяются стремления к повышению тактико-технических характеристик (ТТХ) объектов бронетанковой техники (ОБТ). В связи с широким применением легкобронированных машин (ЛБМ) в вооруженных силах стран всего мира чрезвычайную актуальность и важность приобретает задача рационального проектирования новых и комплексной модернизации существующих ЛБМ. При этом производится их оснащение новыми силовыми агрегатами, системами вооружений, системами обитаемости. В свою очередь, это приводит к необходимости определения конструктивных схем и параметров, обеспечивающих прочность и жесткость корпуса модернизированной машины как основного интегрирующего силового элемента конструкции. В связи с этим возникает важная и масштабная задача разработки математических моделей, численных методов и систем автоматизированного проектирования для научно обоснованного выбора вариантов усиления корпусов при

проектировании и модернизации на отечественных предприятиях бронетанкостроения.

Корпус боевой машины оказывается под непосредственным действием силовой нагрузки, возникающей при установке нового боевого модуля, а также при производстве выстрелов из скорострельных автоматических пушек, минометов, гранатометов, ракетных установок. Тактико-технические характеристики боевых модулей (масса, тип и калибр вооружения, геометрические размеры), а также режимы боевого применения оружия (углы стрельбы, темп производства выстрелов, усилия отдачи) варьируются в достаточно широких пределах. Например, темп стрельбы может меняться от единиц до тысяч выстрелов в минуту, масса боевого модуля – от нескольких сотен килограмм до нескольких тонн, калибр пушки – от 23 до 80 мм и выше, усилия отдачи – от сотен Н до десятков кН. Соответственно и варианты

© А. В. Набоков, Н. А. Ткачук, А. Н. Малакей,
А. В. Грабовский, А. Ю. Васильев, С. В. Куценко,
А. Ю. Танченко, Е. С. Ананьин, 2018

модернизации самого корпуса могут быть самыми различными. В научной литературе в настоящее время в завершеном виде отсутствуют методики многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусов боевых машин в автоматизированном режиме и синтеза рациональных конструктивных схем и проектных параметров по критериям заданных тактико-технических характеристик боевых машин и обеспечения прочности и жесткости корпусов во время стрельбы. Комплекс заданных факторов формирует актуальную и важную научно-техническую задачу разработки математической модели, численных методов и параметрических моделей, а также специализированных систем автоматизированного проектирования для научно обоснованного выбора рациональных вариантов корпусов с целью обеспечения прочности, жесткости и заданных тактико-технических характеристик при оснащении новыми боевыми модулями.

Постановка задач исследований. Целью работы является обеспечение заданных тактико-технических характеристик легкобронированных машин путем разработки комплексных математических моделей анализа и синтеза, реализованных в виде специализированных интегрированных систем автоматизированного проектирования корпусных элементов машин по критериям прочности и жесткости при действии импульсных нагрузок в процессе производства выстрелов.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Анализ состояния вопроса.
2. Разработка комплексной математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин при действии системы импульсных нагрузок.
3. Разработка специализированной интегрированной системы анализа и синтеза вариантов модернизации корпусов боевых машин.
4. Разработка параметрических, геометрических и конечно-элементных моделей корпусов легкобронированных машин и проведение с использованием данных модулей комплексного анализа влияния различных факторов на прочность и жесткость корпуса, а также рекомендаций по выбору его основных параметров.

Часть поставленных задач описана в работе ниже.

Анализ основных тенденций развития боевых модулей и методов исследования прочности и жесткости корпусов легкобронированных машин. Современные вооруженные силы все в большей мере оснащаются легкобронированными машинами, степень эффективности которых при выполнении боевых задач зачастую превосходит аналогичные показатели для других видов бронетехники [1–15]. Стремление сочетать при проектировании и модерни-

зации ЛБМ сохранение подвижности, плавучести и усиление вооружений приводит к противоречию между прочностными и жесткостными характеристиками корпуса и тактико-техническими характеристиками систем и агрегатов, которые планируется на них разместить. В частности, существует тенденция глубокой модернизации боевых модулей ЛБМ, оказывающих значительное силовое воздействие на корпус боевой машины [1–15]. Для прогнозирования влияния этой тенденции на компоновочные решения при проектировании и модернизации корпусов боевых машин необходимо рассмотреть основные направления развития вооружений ЛБМ, а также методов исследования прочности их корпусов.

Боевые модули легкобронированных машин: вооружение, тактико-технические характеристики. Создание новых образцов бронетанковой техники, относящейся к классу легкой категории по массе, несет в себе ряд проблем, связанных с выбором вооружения, необходимого для решения широкого диапазона огневых задач.

Заманчиво уничтожать с помощью универсального комплекса как воздушные цели, так и наземные, не только живую силу противника, но и хорошо защищенные объекты. Постоянно повышающиеся требования к вооружению машин легкой категории по массе (ЛКМ) требуют модернизации образцов, принятых на вооружение ранее, с сохранением массогабаритных характеристик, позволяющих преодолевать водные преграды в плавание и перевозить эти машины транспортной авиацией.

Данный обзор направлен на оценку современного развития вооружения ЛКМ и направлений развития модульного вооружения. Используются материалы энциклопедий, обзорных публикаций и ресурсы Internet [<http://commi.narod.ru>, <http://voenavto.almanacwhf.ru>, <http://www.army-technology.com>, <http://armor.kiev.ua>, <http://i.pvo.guns.ru>, <http://www.soldiering.ru>, <http://www.shipunov.com>, <http://www.kurganmash.ru>, <http://www.rearms.ru>].

Модулем вооружения (МВ) считается установка, состоящая из средства поражения, систем обеспечения стрельбы и боекомплекта. МВ устанавливаются на передвижные объекты бронетанковой техники, военно-морского флота, военно-воздушных сил и другой специальной техники, а также на стационарных и на самоходных установках. Рассматриваются модули, устанавливаемые на бронетанковой технике, относящейся к классу машин легкой категории по массе. Существуют различные варианты классификации МВ. Например, можно рассмотреть классификацию модулей вооружения по огневому средству: пулеметные модули; пушечно-пулеметные; пушечные; ракетно-пушечные; ракетные; минометные; комбинированные многоцелевые.

Примерами выпускаемых МВ для оснащения ЛБМ могут быть украинские БАУ-23х2; универсальные БМ "Штурм", "Гром", "Парус", "Десна", "Тайфун", "Ингул", "Сармат", "Дуплет", "Вий", "Буг" [16, www.morozov.com.ua], предназначенные для оснащения новых и модернизируемых ЛБМ БТР-70, БТР-80, БТР-3Е, БТР-4. Как отмечается в ряде публикаций, в вооруженных силах ряда государств популярна линейка боевых модулей от норвежской компания Kongsberg Group. Почти 17000 дистанционно-управляемых боевых моду-

лей от Kongsberg Group поставлено в 17 стран. По такой же конструкционной логике создано большое количество современных боевых модулей и другими разработчиками – как для установки на легкие бронированные машины, так и на танки [17]. Также отмечается важный и показательный факт от компании Kongsberg. Он касается практики применения боевого модуля Protector, который разработан и производится в различных вариантах, став своего рода эталоном в мире боевых модулей. Protector в версии Crows II в 2007 г. выиграл контракт для армии США, за которым последовали еще несколько крупных заказов. По данным реальной эксплуатации, принятие модели Crows II позволило американцам уменьшить расход 12,7-мм патронов на 70% благодаря резкому повышению точности попадания с первого выстрела [17].

Разнообразными модулями вооружений оснащаются бронемшины AMV компании Patria, семейство ЛБМ Piranha компании MOWAG (в настоящее время General Dynamics Land Systems/GDLS); семейство ЛБМ M1126 Stryker 8x8; ЛБМ компании Renault Trucks Defence; немецкие бронированные машины Boxer 8x8 MRAV (Multi-Role Armoured Vehicle – многоцелевая бронированная машина) компании KMW; БМП-2, БМП-3, БТР-80А и другие машины.

Таким образом, основными тенденциями в развитии боевых модулей являются: универсализация; повышение калибра вооружения; комбинирование типов и калибра вооружения; расширение диапазона углов стрельбы; повышение суммарной мощности устанавливаемого вооружения; расширение диапазона темпа стрельбы; повышение точности наведения; возможность установки новых видов вооружения.

Комплекс вооружения перспективных ЛБМ вызывает многочисленные споры. Даже чисто боевая машина, не несущая транспортных функций, не может с одинаковым успехом вести борьбу с живой силой, танками и бронемашинами противника и воздушными целями. Кроме сложностей с размещением вооружения и боекомплекта, такое многообразие задач вносит серьезные трудности в работу командира и наводчика даже при наличии современных систем управления огнем (СУО). Поэтому состав боевых модулей изменяется в зависимости от предназначения машины, наиболее мощные системы вооружения устанавливаются на БМП.

Учитывая задачи мотопехоты на БМП, основное вооружение должно обеспечивать: подавление пехоты противника, борьбу с равными себе бронемашинами и расчетами тяжелого вооружения, возможности самообороны от объектов типа "танк" и "вертолет"; живучесть, боеготовность вооружения, достаточный боекомплект без ущерба для вместимости обитаемого отделения и оперативной маневренности машины; возможность эффективного взаимодействия с другими средствами поражения сухопутных войск при ведении наступательных и оборонительных действий днем и ночью в любых погодных условиях.

На основе анализа ТТХ боевых модулей можно выделить следующие основные тенденции при проектировании и модернизации боевых модулей легкобро-

нированных машин:

1. Повышение калибров (от 7,62 мм до 100 и более мм) и боевой мощности вооружения, устанавливаемого в МВ, и, соответственно, усилий отдачи.

2. Универсализация комплектов вооружений и комбинирование их типов.

3. Использование модульных принципов компоновки легкобронированных машин: на базе одного шасси могут устанавливаться различные боевые модули.

4. Изменяемые в широких диапазонах режимы боевого применения современного вооружения: темп стрельбы (от 1-2 до 1200-1500 выстрелов в минуту), тип снаряда, углы стрельбы, возможность одновременного использования нескольких типов вооружений в ходе боя.

Таким образом, современные боевые модули являются источником импульсного воздействия высокой интенсивности, с широким частотным диапазоном импульсов, с изменяющимся в широких пределах направлением усилий. Это приводит к необходимости обеспечения соответствующих прочностных и жесткостных характеристик корпуса, воспринимающего эти воздействия. А это, в свою очередь, требует привлечения методов определения динамического НДС корпусов ЛБМ при действии динамических и импульсных усилий.

Обоснование направлений задач исследования

Анализ мировых и отечественных тенденций проектирования боевых модулей легких по массе бронированных машин и методов исследования напряженно-деформированного состояния их корпусов позволяет сделать следующие выводы:

1. Модули вооружения имеют тенденцию к росту общей массы, калибра вооружений, темпа и углов стрельбы, что приводит к необходимости анализа напряженно-деформированного состояния корпусов при различных вариантах нагружения с целью рационального выбора конструктивных схем и параметров при их проектировании.

2. В настоящее время для отечественного бронетанкостроения актуальным направлением является развитие проектирования и модернизации боевых бронированных машин с установкой современных модулей вооружения.

3. Практически отсутствуют в научной литературе методики исследования влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние корпусов легкобронированных машин, а также синтеза корпусов по критериям прочности и жесткости для обеспечения ТТХ за счет рационального выбора параметров проектируемых корпусов.

4. Для проектируемых, особенно модернизируемых конструкций корпусов боевых бронированных машин характерны растущая напряженность конструктивных элементов, а также самые неблагоприятные сочетания режимов боевого применения.

5. В настоящее время метод конечных элементов получил огромное развитие, в том числе реализацию в виде самых мощных CAE-систем, взаимодействующих с CAD-системами (Pro/ENGINEER (Creo), SolidWorks, CATIA). В то же время отсутствуют специализированные интегрированные системы автоматизированного

анализа и синтеза элементов корпусов боевых бронированных машин по критериям прочности и жесткости, что сдерживает решение этих задач параллельно и взаимосвязано с процессами их проектирования.

Для решения поставленной задачи анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза элементов корпусов легкобронированных боевых машин по критериям прочности необходимо развивать следующие направления исследований:

1. Разработка комплексной математической модели напряженно-деформированного состояния и динамических процессов в корпусе боевой машины при действии системы импульсов от усилия отдачи при производстве выстрелов.

2. Разработка специализированной интегрированной системы анализа и синтеза элементов корпусов боевых машин по критериям прочности, жесткости, обеспечения заданных тактико-технических характеристик.

3. Разработка множества параметрических моделей элементов корпусов боевых бронированных машин для вариативного анализа прочности и жесткости элементов конструкций.

4. Обеспечение тактико-технических характеристик проектируемых корпусов легкобронированных машин путем рационального выбора конструктивных схем и параметров на основе многовариантных исследований напряженно-деформированного состояния при варьировании конструктивных схем, конструктивных параметров ТТХ боевых модулей, а также режимов боевого применения.

Математические модели динамического напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин. Для решения задач параметрического анализа и синтеза корпусов легкобронированных машин, подвергающихся действию импульсных нагрузок при производстве выстрелов из пушечных боевых модулей, по критериям прочности и жесткости необходимо разработать комплексную математическую модель объекта. При этом учитывается:

- сложность геометрической формы корпуса;
- сложный характер приложения нагрузки в пространстве и времени;
- наличие большого количества критериев и ограничений на варьируемые параметры.

В связи с этим предложено на основе проведенного и описанного выше исследования использовать для моделирования напряженно-деформированного состояния корпусов метод конечных элементов, дополненный модулями параметрического анализа для качественного анализа реакции упругой системы на импульсное воздействие.

Определение характера реакции динамической системы на импульсное воздействие методом конечных элементов. При моделировании напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ конструкция разбивается на части, геометрия

которых может быть легко математически описана. Например: прямые линии, треугольники, прямоугольники, пирамиды, призмы. Получаемые поддомены имеют малые конечные размеры и называются конечными элементами (КЭ). КЭ контактируют друг с другом в узлах, к которым приводят также граничные условия для тела, распределенные поверхностные и объемные силы и записываются условия равновесия. Внутри каждого элемента искомое решение аппроксимируется полиномами необходимой степени. Таким образом, напряженно-деформированное состояние элемента в случае действия статических усилий Φ однозначно определяется узловыми перемещениями:

$$Ku = Q. \quad (1)$$

При исследовании напряженно-деформированного состояния корпусов ЛБМ с применением метода конечных элементов приходится решать не только краевую задачу, приводимую к системе уравнений (1), но и начально-краевую задачу. В этом случае все искомые и заданные функции зависят не только от пространственных координат, но и от времени. В этом же случае решающая система уравнений приобретает вид:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = Q, \quad (2)$$

где, как и в (1), M – матрица масс;

C – матрица демпфирования;

K – матрица жесткости;

u – вектор узловых перемещений;

\dot{u} – вектор узловых скоростей;

\ddot{u} – вектор узловых ускорений;

Q – вектор узловых нагрузок.

Для решения данной системы предполагается использовать метод Ньюмарка [18]:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + [(1 - \delta)\ddot{u}_n + \delta\ddot{u}_{n+1}] \Delta t, \quad (3)$$

$$u_{n+1} = u_n + \dot{u}_n \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{u}_n + \alpha \ddot{u}_{n+1} \right] \Delta t^2, \quad (4)$$

где α, δ – параметры интегрирования метода Ньюмарка;

u_n, u_{n+1} – вектор узловых перемещений в момент времени n и $n+1$ соответственно;

\dot{u}_n, \dot{u}_{n+1} – вектор узловых скоростей в момент времени n и $n+1$ соответственно;

$\ddot{u}_n, \ddot{u}_{n+1}$ – вектор узловых ускорений в момент времени n и $n+1$ соответственно;

Δt – шаг интегрирования по времени метода Ньюмарка.

Использование пошагового представления решения по времени с применением формул (3), (4) дает возможность сформировать систему уравнений для определения искомых узловых параметров в последующий момент времени через их значения в предыдущий момент:

$$\xi_0 M + \xi_1 C + K \mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{Q} +$$

$$+ M(\xi_0 \mathbf{u}_n + \xi_2 \dot{\mathbf{u}}_n + \xi_3 \ddot{\mathbf{u}}_n) + C(\xi_1 \mathbf{u}_n + \xi_4 \dot{\mathbf{u}}_n + \xi_5 \ddot{\mathbf{u}}_n), \quad (5)$$

где $\xi_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2}$; $\xi_1 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t}$; $\xi_2 = \frac{1}{\alpha \Delta t}$; $\xi_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$;

$$\xi_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1; \xi_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right).$$

Здесь параметры ξ_i представляют собой коэффициенты в выражениях узловых скоростей и ускорений в момент времени t_{n+1} через узловые значения параметров в момент времени t_n :

$$\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} = \xi_0 (\mathbf{u}_{n+1} - \mathbf{u}_n) - \xi_2 \dot{\mathbf{u}}_n + \xi_3 \ddot{\mathbf{u}}_n, \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n - \xi_6 \ddot{\mathbf{u}}_n + \xi_7 \ddot{\mathbf{u}}_{n+1}, \quad (7)$$

где $\xi_6 = \Delta t(1 - \delta)$; $\xi_7 = \delta \Delta t$.

Таким образом, совокупность решений последовательности систем уравнений (5) с учетом (6), (7) представляет собой общее решение начально-краевой задачи. Вся система соотношений (1)–(7) формирует математическую модель для анализа напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин при статическом и динамическом воздействии реактивных сил при производстве выстрелов.

Уравнение (2) является достаточно универсальным с точки зрения охвата всего множества динамических процессов в бронекорпусах легкобронированных машин.

Естественно, что решение системы уравнений (2) при числе конечных элементов, исчисляемом десятками и сотнями тысяч, и количестве шагов по времени, исчисляемом сотнями и тысячами, представляет собой довольно громоздкую задачу. В то же время качественными особенностями исследуемого процесса можно предварительно исследовать на примере одномассовой динамической системы, подвергающейся действию системы периодических импульсов.

Рассмотрим подход, описанный в [19] для динамической системы с одной степенью свободы под действием набора импульсных нагрузок, следующих периодически, поведение которой описывается уравнением

$$m\ddot{v} + cv = 0, \quad (8)$$

где m, c, v – масса, жесткость и обобщенная координата, описывающие поведение системы.

Его решение

$$v = \frac{S}{m p} \sin pt, \quad (t > 0), \quad (9)$$

($p = \sqrt{c/m}$) – частота свободных колебаний), которое удовлетворяет как уравнению (8), так и начальным условиям (т.е. условиям возникновения движения непосредственно после исчезновения начального импульса):

$$v = 0, \quad \dot{v} = S/m. \quad (10)$$

Движение, вызываемое только следующим первым импульсом, можно получить из того же выражения (9) в виде

$$v = \frac{S}{m p} \sin p(t - T), \quad (t > T). \quad (11)$$

Аналогично можно найти результат действия следующих импульсов. Чтобы получить общее движение, нужно сложить эти "парциальные" движения. Для одного типичного интервала времени $[nT, (n+1)T]$, т.е. между моментами приложения n -го и $(n+1)$ -го импульсов, имеем

$$v = \frac{S}{m p} \sin pt + \sin p(t - T) + \sin p(t - 2T) + \dots$$

$$+ \sin p(t - nT) = \frac{S}{m p} \sum_{k=1}^{k=n} \sin p(t - kT). \quad (12)$$

Для начала этого интервала времени, т.е. при $t = nT$, по выражению (12) находим

$$v = \frac{S}{m p} \sum_{k=0}^{k=n-1} \sin(n - k)pT. \quad (13)$$

Один из эффективных способов исследования качественных особенностей поведения данной системы описан в [19]. Рассмотрим один из периодов T , приняв за начало отсчета времени момент исчезновения последнего импульса. В течение рассматриваемого периода колебания являются свободными и описываются решением

$$v = A \cos pt + B \sin pt. \quad (14)$$

Если v_0 – начальное смещение и \dot{v}_0 – начальная скорость, то постоянные A и B равны

$$A = v_0, \quad B = \frac{\dot{v}_0}{m}, \quad (15)$$

и решение (14) можно записать в виде

$$v = v_0 \cos pt + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pt. \quad (16)$$

Дифференцируя по времени t , находим скорость

$$\dot{v} = -v_0 p \sin pt + \dot{v}_0 \cos pt. \quad (17)$$

В конце этого периода, непосредственно перед приложением очередного импульса (т.е. $t = T$), имеем

$$v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pT, \quad (18)$$

$$\dot{v}_1 = -v_0 p \sin pT + \dot{v}_0 \cos pT. \quad (19)$$

Сразу после приложения очередного импульса смещение v сохранит свое значение (18):

$$v_2 = v_1 = v_0 \cos pT + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pT, \quad (20)$$

но скорость мгновенно изменится на величину S/m и при учете выражения (19) составит

$$\dot{v}_2 = -v_0 p \sin pT + \dot{v}_0 \cos pT + \frac{S}{m}. \quad (21)$$

Вследствие предполагаемой *периодичности* процесса величины v_2 и \dot{v}_2 должны быть равны величинам v_0 и \dot{v}_0 , т. е.

$$v_0 = v_0 \cos pT + \frac{\dot{v}_0}{m} \sin pT, \quad (22)$$

$$v_0 = -v_0 p \sin pT + \dot{v}_0 \cos pT + \frac{S}{m}. \quad (23)$$

Таким образом, получена система двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными v_0 и \dot{v}_0 ; ее решение равно:

$$v_0 = \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2}, \quad \dot{v}_0 = \frac{S}{2m}, \quad (24)$$

и закон движения (14) принимает вид ($0 < t < T$)

$$v = \frac{S}{2mp} \left(\sin pt + \cos pt \cdot \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right). \quad (25)$$

Периодичность достигнута вследствие игнорирования заданных начальных условий (т. е. условий, относящихся к начальному моменту, непосредственно перед приложением первого импульса); в реальных системах благодаря демпфированию (которое не было учтено) в конце концов осуществляется именно такое периодическое движение. Впрочем, при желании можно отразить в решении и действительно заданные начальные условия. Пусть в начальный момент времени заданные смещение и скорость соответственно составляют v_0^* и \dot{v}_0^* . Конечно, они отличаются от величин v_0 и \dot{v}_0 , которые относятся к чисто периодическому процессу и даны выражениями (25). Запишем тождества:

$$\begin{cases} v_0^* = v_0 + \left(v_0^* - \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right), \\ \dot{v}_0^* = \dot{v}_0 + \left(\dot{v}_0^* - \frac{S}{2m} \right). \end{cases} \quad (26)$$

Первые слагаемые правых частей отвечают периодическому (с периодом T) движению (25), а вторые слагаемые послужат причиной свободных колебаний (с периодом $2\pi/p$)

$$v^* = v_0 + \left(v_0^* - \frac{S}{2mp} \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right) \cos pt + \left(\frac{\dot{v}_0^*}{p} - \frac{S}{2mp} \right) \sin pt. \quad (27)$$

Здесь время t отсчитывается от начала процесса.

Таким образом, движение будет описываться суммой решений (25) и (27). Вторая часть имеет практическое значение в течение небольшого промежутка времени вблизи начала процесса. Полезно проанализировать результат, содержащийся в выражении (25). Прежде всего заметим, что если $\frac{pT}{2} = n\pi$ (где n - целое), то $\left| \operatorname{ctg} \frac{pT}{2} \right| \rightarrow \infty$ и амплитуды перемещений стремятся к бесконечности, т. е. наступает *ударный резонанс*. Если $\omega = 2\pi/T$ - угловая частота приложения импульсов, то условие ударного резонанса приобретает вид

$$\omega = \frac{p}{n}. \quad (28)$$

При всех иных соотношениях частот отклонения оказываются конечными. Наибольшее отклонение системы согласно (25) равно

$$v_{\max} = \frac{S}{mp} \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \frac{pT}{2}} = \frac{S}{2mp \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|}. \quad (29)$$

Так как дробь $\frac{S}{2mp}$ является максимальным отклонением, вызываемым одним мгновенным импульсом S , то выражение

$$\beta = \frac{1}{2 \left| \sin \frac{\pi p}{\omega} \right|} \quad (30)$$

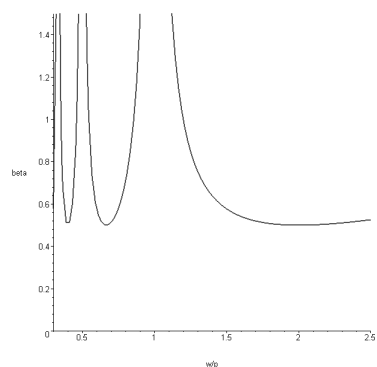
можно назвать *коэффициентом влияния повторности*. На рис. 1 изображена зависимость β от отношения частот ω/p . Как видно, здесь возможно неограниченно большое число ударных резонансов (в соответствии с формулой (28)). Наименьшее возможное значение β равно $1/2$.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента чувствительности к действию системы импульсов от обратной относительной частоты возбуждения p/ω . Видно, что рост амплитуды установившихся колебаний происходит как с уменьшением периода действия импульсов, так и при его росте (при условии $p \approx \omega \cdot n$, где $n = 1, 2, 3, \dots$).

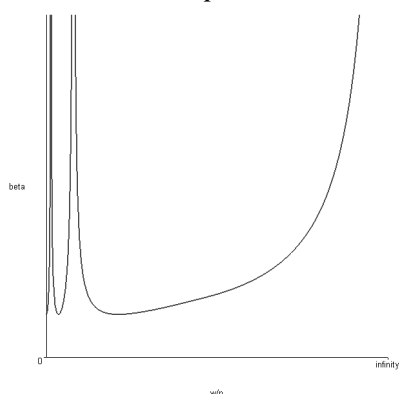
На рис. 3 приведен характерный динамический процесс вблизи резонанса.

Качественный анализ приведенных картин показывает, что и характер переходного процесса, и его длительность, и характер установившегося движения очень сильно зависят от соотношения p/ω . Поскольку реальная динамическая система (исследуемый корпус бронетранспортера) обладает густым спектром собственных частот, причем этот спектр изменяется при внесении изменений в конструкцию, то полученные характеристики не могут быть приме-

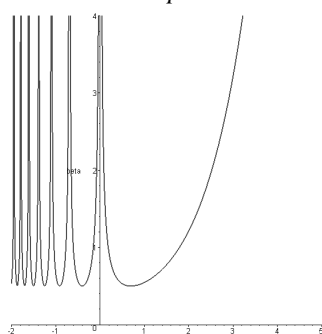
нены для количественного, а только для качественного анализа.



$$0 < \omega / p < 2,5$$



$$0 < \omega / p < \infty$$



$$\omega / p, e^{-2} < \omega / p < e^5,$$

масштаб полудугарифмический

Рис. 1 – Коэффициент влияния повторности импульсов $\beta \equiv \text{beta}$ как функция относительной частоты действия импульсов

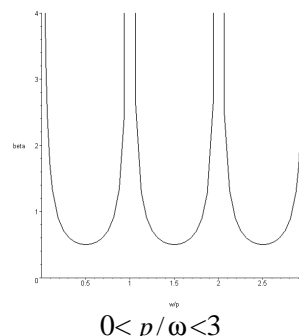
В то же время уже заранее можно предсказать характерные особенности динамических процессов в корпусе ЛБМ при действии импульсов сил:

1) после относительно короткого переходного процесса при несовпадении ω с $p_i \cdot n$, где i – номера частот (от 1 до N_r), n – натуральное число, при $\omega_n \ll \omega \ll \omega_n$ (здесь

$$\omega_n = \max_{i,n} \{p_i \cdot n : p_i \cdot n < \omega\};$$

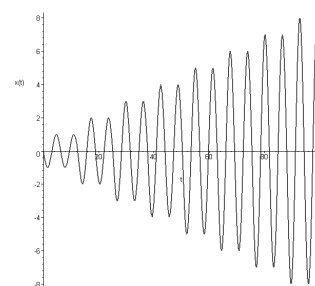
$$\omega_n = \max_{i,n} \{p_i \cdot n : p_i \cdot n > \omega\}.$$

наступает практически установившийся режим движения с преобладанием процесса с собственной частотой, ближайшей к частоте вынуждения;



$$0 < p / \omega < 3$$

Рис. 2 – Коэффициент влияния повторности импульсов $\beta \equiv \text{beta}$ как функция относительного периода действия импульсов p / ω



$$p / \omega = 2$$

Рис. 3 – Характерное временное распределение перемещения v при ударном резонансе

2) при близости или совпадении ω с $p_i \cdot n$, переходной процесс растягивается, а установившийся представляет собой или биение, или почти периодический процесс с большой амплитудой;

3) при $\omega \gg p_{N_r} \cdot n$ амплитуда установившихся колебаний растет практически пропорционально частоте вынуждающих импульсов.

Качественно колебательные процессы в бронекорпусах легкобронированных машин соответствуют колебаниям в одномассовой системе (см. выше). Однако сам процесс носит более сложный характер, т. к. необходимо учитывать влияние не одной, а целого спектра возбуждаемых гармоник.

С учетом отмеченных выше особенностей задача анализа динамического НДС бронекорпусов ЛБМ распадается на 2 подзадачи:

1) анализ спектра собственных частот колебаний и выявление опасных режимов обычных и ударных резонансов; на основе данных исследований – разработка рекомендаций по отстройке от этих режимов за счет варьирования некоторых проектных параметров;

2) анализ динамических переходных процессов в бронекорпусе с рекомендованными параметрами для выявления проблемных зон и варьирования некоторых проектных параметров.

Частичная реализация предложенных подходов описана в работах [20-24].

Выводы. В работе предложена математическая модель для исследования напряженно-деформированного состояния синтеза корпусов легкобронированных машин, подвергающихся действию усилий стрельбы. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель отличается от использованных ранее для исследования напряженно-деформированного состояния корпусов легкобронированных машин строгой математической формулировкой задачи анализа прочностных и жесткостных характеристик при периодических импульсных воздействиях.

2. Разработанная математическая модель отличается тем, что содержит элементы качественного анализа реакции системы на импульсные воздействия.

3. Проведенный предварительный анализ позволяет выделить три типа поведения исследуемой динамической системы при длительном импульсном воздействии и малом вязком трении: ударный резонанс; околорезонансный режим; нерезонансный режим; сверхвысокочастотное импульсное воздействие.

4. В отличие от ранее предложенных математических моделей разработанная в работе модель содержит строгую постановку задачи обоснования проектных решений на основе анализа результатов моделирования напряженно-деформированного состояния корпуса легкобронированной машины в процессе стрельбы и целенаправленного варьирования некоторого множества проектных параметров.

5. Для полного решения задачи многовариантного анализа и синтеза предложенная математическая модель нуждается в развитии:

- необходим инструмент автоматизированного генерирования численных моделей (включая геометрическую информацию, тактико-технические характеристики боевых модулей, ТТХ модернизируемых ЛБМ) по ограниченному набору основных параметров;

- требуется создание средств анализа прочностных и жесткостных параметров по результатам расчета динамических процессов.

Таким образом, сформулирована в строгой математической постановке задача синтеза корпусов модернизируемых легкобронированных машин под действием усилий стрельбы с учетом напряженно-деформированного состояния.

Разработанная математическая модель содержит описание всех аспектов исследуемых динамических процессов, всех качественных и количественных особенностей самой исследуемой динамической системы, а также методы ее рационального проектирования. Это составляет направления дальнейших исследований применительно к конкретным боевым машинам.

Список литературы

1. Чепков І. Б. Основні аспекти формування державної воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 22–23.
2. Довгополий А. С., Сотник В. В., Бура Е. Б. Критичні технології та оборонна безпека держави. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 24–26.
3. Шостак В. Г. Державне регулювання здійснення воєнно-технічної та оборонно-промислової політики. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Вид-во ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 26–33.
4. Шеремета І. Г. Роль військово-технічного співробітництва у здійсненні воєнно-технічної та оборонно-промислової політики. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 33–36.
5. Гульятєв А. А. Роль військово-технічного співробітництва в забезпеченні потреб Збройних сил України в озброєнні та військової техніці. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 37–39.
6. Бісик С. П., Чернозубенко О. В., Схабицький В. Р. Числове моделювання пробиття гомогенної перешкоди ударником з різною формою головної частини. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 105–106.
7. Бура О. І., Набережна О. О., Калініченко С. В., Томіна А.-М. В. Перспективи використання полімерних композитних матеріалів у техніці сухопутних військ. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 113–115.
8. Васильєв А. Ю., Шаталов О. Є., Дудар Є. Є. Комплексна математична модель побудови тривимірних тактичних діаграм. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 115–116.
9. Грабовський А. В., Васильєв А. Ю., Ткачук М. М., Танченко А. Ю., Мартиненко О. В., Мазур І. В. Математичне та комп'ютерне моделювання динаміки та напружено-деформованого стану елементів бронетанкової техніки. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 129–130.
10. Єфремова Г. І., Волонцевич Д. О. Підвищення рухливості легких гусеничних броньованих машин за рахунок встановлення електромеханічної трансмісії. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 140–141.
11. Подригало М. А., Кайдалов Р. О. Рациональна динамічна характеристика військової колісної техніки з комбінованим електромеханічним приводом ведучих коліс. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 року. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 179–180.
12. Ткачук М. М., Скріпченко Н. Б., Саверська М. С. [и др.] Аналіз контактної взаємодії складнопрофільних елементів конструкцій з кінематичноспряженими поверхнями. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ : ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 201.
13. Ткачук М. А., Брагіна Л. Л., Грабовський А. В. аналіз захисних вла-

- ствостей панелей спеціального призначення із тонкостісної сталі. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ: ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 202–210.
14. Ткачук М. А., Литвиненко О. В., Хлянь О. В. [и др.] Стратегічні питання наукового супроводу проектно-технологічно-виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ: ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 203–204.
 15. Черняк Р. С., Дунь С. В., Кайдалов Р. О. Погодження єдиних вимог до рівня балістичного захисту колісних броньованих машин. *Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки: V міжн. наук.-практ. конф. 11–12 жовтня 2017 р. Тези доп.* Київ: ДНУ УкрІНТЕІ, 2017. С. 209–210.
 16. Згурец С. Ахиллесова пята українських боевх модулєй. *Defence Express*. URL: <http://defence-ua.com/index.php/statti/1270-akhillesova-pyata-ukrainskikh-boevykh-modulej>. (дата обращения 15.01.2018).
 17. Легкие бронированные машины выходят на первый план. *Военное обозрение*. URL: <https://topwar.ru/90792-legkie-bronirovannyye-mashiny-vyhodyat-na-pervyy-plan.html>. (дата обращения 20.02.2018).
 18. Бате К., Вилсон Е. *Численные методы анализа и метод конечных элементов* / Перевод с англ. А. С. Алексеева и др. Москва: Стройиздат, 1982. 447 с. Перевод изд.: Numerical methods in finite element analysis / Klays-Jrgen Bathe, Egdward L. Wilson (Prentice-Hall).
 19. Пановко Я.Г., Губанова И.И. *Устойчивость и колебания упругих систем*. Москва: Наука, 1979. 384 с.
 20. Литвиненко А.В. Общій підход к проектно-технологическому обеспечению тактико-технических характеристик военных колесных и гусеничных машин путем обоснования параметров бронекорпусов по критериям прочности и защищенности. *Вісник НТУ "Харківський Політехнічний Інститут"*: Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків: НТУ "ХПІ", 2014. № 29 (1072). С. 68–77.
 21. Ткачук Н.А., Литвиненко А.В., Ткачук А.В. [и др.] Чувствительность прочностных и жесткостных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций к неравномерному изменению толщины. *Вісник СевНТУ*. Серія: *Механіка, енергетика, екологія*. Севастополь: Сев-НТУ, 2013, вип. 137. С.187–191.
 22. Литвиненко А.В. Специализированные системы для компьютерного проектирования, исследования и изготовления элементов транспортных средств специального назначения. *Вісник НТУ "Харківський Політехнічний Інститут"*: Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків: НТУ "ХПІ", 2013. № 23 (996). С. 111–121.
 23. Танченко А.Ю. Влияние толщины панелей на спектр собственных частот колебаний корпусов транспортных средств специального назначения. *Вісник НТУ "Харківський Політехнічний Інститут"*: Серія: *Машинознавство та САПР*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків: НТУ "ХПІ", 2013. №23 (996). С. 138–145.
 24. Танченко А.Ю., Литвиненко А.В., Чепурной А.Д. [и др.] Метод прямого конечного возмущения конечно-элементных моделей при численном исследовании динамических, жесткостных и прочностных характеристик тонкостенных элементов машин строительных конструкций. *Вестник Брянского государственного технического университета*. Брянск: БГТУ, 2014. № 4(44). С.114–124.
- References (transliterated)**
1. Chepkov I. B. Osnovni aspekty formuvannya derzhavnoyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017, pp. 22–23.
 2. Dovhopolyu A. S., Sotnyk V. V., Bura E. B. Krytychni tekhnolohiyi ta oboronna bezpeka derzhavy. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 24–26.
 3. Shostak V. H. Derzhavne rehulyuvannya zdiysnennya voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 26–33.
 4. Sheremeta I. H. Rol' viys'kovo-tekhnichnoho spivrobitnytstva u zdiysnenni voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 33–36.
 5. Hul'tyayev A. A. Rol' viys'kovo-tekhnichnoho spivrobitnytstva v zabezpechnni potreb Zbroynykh syl Ukrainy v ozbroyneni ta viys'koviyi tekhnitsi. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 37–39.
 6. Bisyk S. P., Chernozubenko O. V., Skhabyts'kyy V. R. Chyslove modelyuvannya probyttya homohennoyi pereshkody udarnykom z riznoyu formoyu holovnoyi chastyny. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 105–106.
 7. Burya O. I., Naberezhna O. O., Kalinichenko S. V., Tomina A.-M. V.Perspektyvy vykorystannya polimernykh kompozytnykh materialiv u tekhnitsi sukhopotnykh viys'k. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 113–115.
 8. Vasylyev A. Yu., Shatalov O. Ye., Dudar Ye. Ye. Kompleksna matematychna model' pobudovy tryvymirnykh taktychnykh diahram. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 115–116.
 9. Hrabovskyy A. V., Vasylyev A. Yu., Tkachuk M. M., Tanchenko A. Yu., Martynenko O. V., Mazur I. V. Matematychna ta komp'yuterna modelyuvannya dynamiky ta napruzhenno-deformovanoho stanu elementiv bronetankovoyi tekhniki. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 129–130.
 10. Yefremova H. I., Volontsevych D. O. Pidvysychennya rukhlyvosti lehkyykh husenychnykh bron'ovanykh mashyn za rakhunok vstanovlennya elektromekhanichnoyi transmisiyi. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 140–141.
 11. Podryhalo M. A., Kaydalov R. O. Ratsional'na dynamichna kharakterystyka viys'kovoyi kolisnoyi tekhniki z kombinovanykh elektromekhanichnym pryvodom veduchykh kolis. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 roku. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 179–180.
 12. Tkachuk M. M., Skripchenko N. B., Savers'ka M. S. [y dr.] Analiz kontaktnoyi vzayemodiyi skladnoprofil'nykh elementiv konstruksiy z kinematychnospryazheny my poverkhnnyamy. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 201.
 13. Tkachuk M. A., Brahina L. L., Hrabovskyy A. V. analiz zakhysnykh vlastyvostey paneley spetsial'noho pryznachennya iz tonkolostovoyi stali. *Problemy koordynatsiyi voyenno-tekhnichnoyi ta oboronno-promyslovoyi polityky v Ukraini. Perspektyvy rozvytku ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki: V Mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017, pp. 202–203.
 14. Tkachuk M. A., Lytvynenko O. V., Khlan' O. V. [y dr.] Stratehichni pytannya naukovooho suprovodu proektno-tekhnolohichno-

- виробничого забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин. *Проблеми координативної воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та вищихової техніки: V mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 203–204.
15. Chernyak R. Ye., Dun' S. V., Kaydalov R. O. Pohodzhennya yedynykh vymoh do rivnya balistichnoho zakhystu kolisnykh bron'ovanykh mashyn. *Проблеми координативної воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та вищихової техніки: V mizhn. nauk.-prakt. konf. 11–12 zhovtnya 2017 r. Tezy dop.* K. : DNU UkrINTEI, 2017. P. 209–210.
 16. Z-hurets S. *Akhyllesova pyata ukrainykykh boevykh moduley. Defense Express.* URL: <http://defence-ua.com/index.php/statti/1270-akhyllesova-pyata-ukrainskikh-boevykh-modulej>. (data obrashchenyua 15.01.2018).
 17. Lehkye bronyrovannye mashyny vikhodyat na pervyy plan. Voennoe obozrenye. URL: <https://topwar.ru/90792-legkie-bronirovannye-mashiny-vyhodyat-na-pervyy-plan.html>. (data obrashchenyua 20.02.2018).
 18. Bate K., Wilson E. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh jelementov / Perevod s angl. A. S. Alekseeva i dr.* Moskva : Strojizdat, 1982.
 19. Panovko Ja.G., Gubanova I.I. *Ustojchivost' i kolebanija uprugih sistem.* Moskva : Nauka, 1979. 384 s.
 20. Litvinenko A.V. Obshhij podhod k proektno-tehnologicheskomu obespecheniju taktiko-tehnicheskikh karakteristik voennykh kolesnykh i gusenichnykh mashin putem obosnovanija parametrov bronekorpusov po kriterijam prochnosti i zashhishhennosti.. *Visnik NTU "KhPI". Serija: Mashinoznavstvo ta SAPR.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2014, no. 29 (1072), pp. 68–77.
 21. Tkachuk N.A., Litvinenko A.V., Tkachuk A.V. [i dr.] Chuvstvitel'nost' prochnostnykh i zhestkostnykh karakteristik tonkostennykh jelementov mashinostroitel'nykh konstrukcij k neravnomernomu izmeneniju tolshhiny. *Visnik SevNTU. Serija: Mehanika, energetika, ekologija.* Sevastopol': Sev-NTU, 2013, vol. 137, pp.187–191.
 22. Litvinenko A.V. Specializirovannye sistemy dlja komp'juternogo proektirovanija, issledovanija i izgotovlenija jelementov transportnykh sredstv special'nogo naznachenija. *Visnik NTU "KhPI". Serija: Mashinoznavstvo ta SAPR.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2013, no. 23 (996), pp. 111–121.
 23. Tanchenko A.Ju. Vlijanie tolshhiny panelej na spektr sobstvennykh chastot kolebanij korpusov transportnykh sredstv special'nogo naznachenija. *Visnik NTU "KhPI". Serija: Mashinoznavstvo ta SAPR.* Kharkiv : NTU "KhPI", 2013, no. 23 (996), pp. 138–145.
 24. Tanchenko A.Ju., Litvinenko A.V., Chepurnoj A.D. [i dr.] Metod prjamogo konechnogo vozmushhenija konechno-jelementnykh modelej pri chislennom issledovanii dinamicheskikh, zhestkostnykh i prochnostnykh karakteristik tonkostennykh jelementov mashin stroitel'nykh konstrukcij. *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta.* Brjansk: BGTU, 2014, no. 4(44), pp.114–124.

Поступила (received) 23.11.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Набоков Анатолій Володимирович (Набоков Анатолий Владимирович, Nabokov Anatoliy) – аспірант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", м. Харків, Україна, e-mail: avnnabokov@gmail.com.

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

Малакей Андрій Миколайович (Малакей Андрей Николаевич, Malakei Andrii) – державне підприємство "Завод імені В.О. Малишева", м. Харків; заступник генерального директора з якості, тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", м. Харків, Україна, <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55446933900>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>; e-mail: andrej8383@gmail.com.

Васильєв Антон Юрійович (Васильев Антон Юрьевич, Vasiliev Anton) – кандидат технічних наук, докторант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

Куценко Сергій Володимирович (Куценко Сергей Владимирович, Kutsenko Sergiy) – аспірант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", м. Харків, Україна, e-mail: s911@tmm-sapr.org.

Танченко Андрій Юрійович (Танченко Андрей Юрьевич, Tanchenko Andrii) – докторант, кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", м. Харків, Україна, e-mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

Ананьїн Євгеній Сергійович (Ананьин Евгений Сергеевич, Anan'in Evgeniy) – студент гр. ТМ-846, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"; м. Харків, Україна