

УДК 623.4.01 : 939.3

*Рикунов О.Н., Набоков А.В., Мазур И.В., Белов Н.Л., канд. техн. наук;  
Шейко А.И., Ткачук Н.А., д-р техн. наук*

## **СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ПРОГРАММНО-МОДЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Введение.** Существующие проектируемые современные легкобронированные машины вооружаются боевыми модулями, оснащенными скорострельными малокалиберными артиллерийскими системами. Они характеризуются высоким темпом стрельбы и значительным уровнем реактивных усилий отдачи. Вследствие этого упругие элементы корпуса, подвески и колес деформируются, что вносит возмущение в номинальное направление оси канала ствола пушки на цель, а также влияет на прочность этих элементов. В связи с этим в ряде работ [1-4] были предложены подходы к построению математических моделей для исследования возникающих динамических процессов. Вместе с тем в этих работах не учитываются все значимые факторы, оказывающие влияние на моделируемый процесс. В частности, отдельно рассматриваются инерционно-жесткостные свойства бронекорпуса, подвески и шины. В то же время требования адекватности, точности и достоверности требуют применения более подробной детализации создаваемых моделей.

**Целью работы** является разработка подходов к созданию комплексных математических и численных моделей динамических процессов для исследования реакции легкобронированной машины на действие серии импульсных усилий при осуществлении выстрелов из боевых модулей, оснащенных скорострельными артиллерийскими системами. Данный подход является развитием и обобщением работ [5-7], однако в более общей постановке.

**Метод решения задачи.** При создании математических моделей динамических процессов в легкобронированных машинах следует учитывать, что они могут быть представлены в виде совокупности двух компонент: континуальной и дискретной. Первая из них может быть использована для моделирования бронекорпуса. Вторая, с определенной степенью допущений, – подвески и колес.

Предлагается для получаемой дискретно-континуальной системы использовать единый подход, заключающийся в дискретизации континуальной части и представлении ее в виде системы с конечным числом свободы, а также в последующем подсоединении к ней дискретной части. Образованная таким образом дискретная система может быть описана, например, с использованием дифференциальных уравнений Лагранжа II рода.

В таком случае разрешающая система уравнений принимает вид [8]:

$$M\ddot{x} + K\dot{x} + Cx = F(t), \quad (1)$$

где  $M, K, C$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости;

$x$  – объединенный массив степеней свободы, с одной стороны, дискретизированной континуальной, а с другой, – дискретной части исследуемой системы;

$F$  – массив обобщенных нагрузок, соответствующих компонентам массива  $x$ .

Такой подход достаточно продуктивен, так как позволяет естественным образом "наращивать" конечно-элементные модели континуальной части системы, для

© О.Н. Рикунов, 2014

построения которых целесообразно применять инструментарий современных мощных САЕ систем. Таким образом, можно менять местами этапы составления разрешающих уравнений и их дискретизации, сначала начиная с процедуры дискретизации, а затем – генерируя разрешающую систему уравнений.

**Компьютерные модели.** Современные системы типа ADAMS, Nastran, ANSYS предоставляют широкие возможности для создания моделей твердотельных и деформируемых тел. В связи с этим для реализации предложенного подхода разрабатываются специализированные программно-модельные комплексы, сочетающие, с одной стороны, указанные универсальные программные средства, а с другой, – специализированные модули, которые поставляют исходные данные и управляющие команды для построения дискретизированных моделей исследуемых объектов. При этом основным результатом работы являются параметризованные численные модели, для которых входными варьируемыми параметрами являются конструктивные параметры, свойства материалов, величины и временные распределения нагрузок.

Имея в распоряжении такие модели, можно организовывать многовариантные исследования динамических процессов с целью обоснования параметров, которые обеспечивают жесткость и прочность элементов легкобронированных машин, а, соответственно, точность стрельбы, защищенность и другие компоненты их тактико-технических характеристик.

**Примеры моделей.** На рис. 1 – 5 представлены иллюстрации к созданию динамических моделей для исследования влияния реактивных усилий отдачи на процессы в системе "остов – подвеска – шины" легкобронированной машины, а также результаты решения некоторых тестовых задач о преодолении неровностей местности.

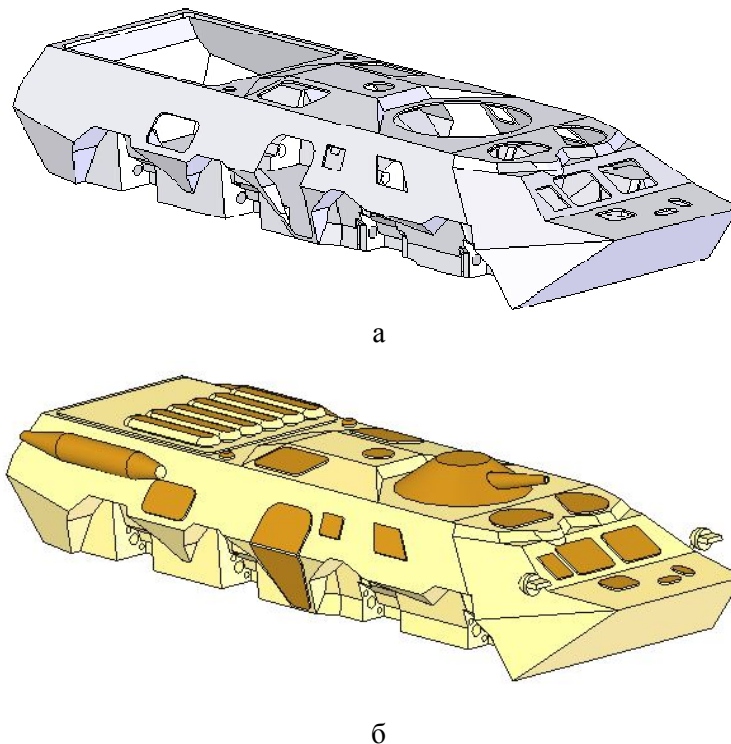


Рис. 1. Модели корпуса БТР: а – поверхностная, б – твердотельная

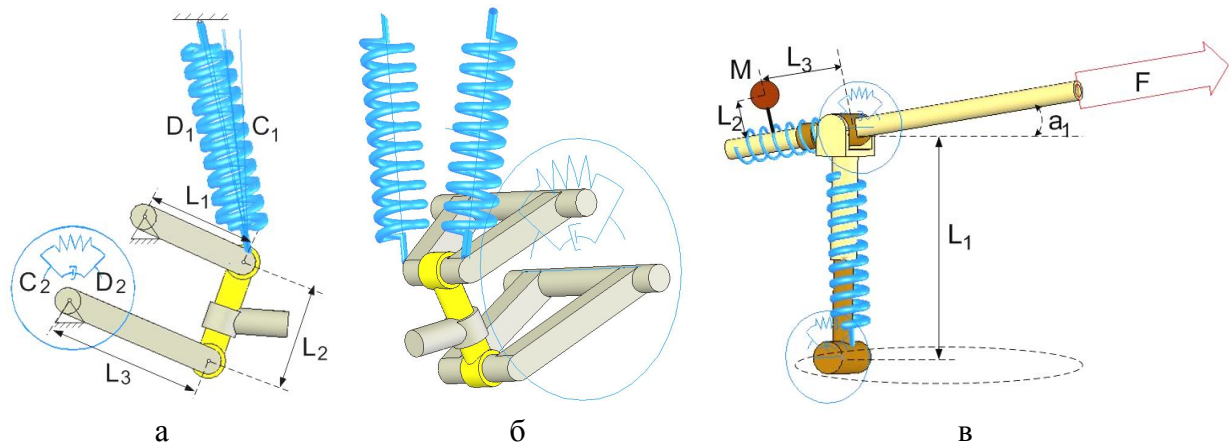


Рис. 2. Модели узлов подвески (а,б) и боевого модуля (в) с заданными основными массо-инерционными и жесткостно-демпфирующими характеристиками

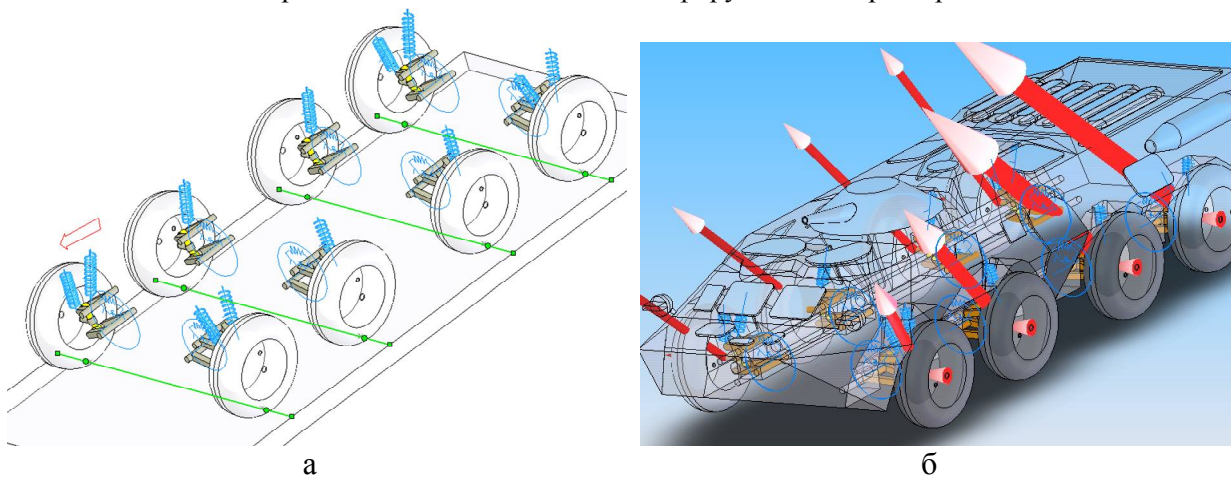


Рис. 3. Моделирование взаимодействия колес с основанием (а); визуализация реакций в элементах подвески (б)

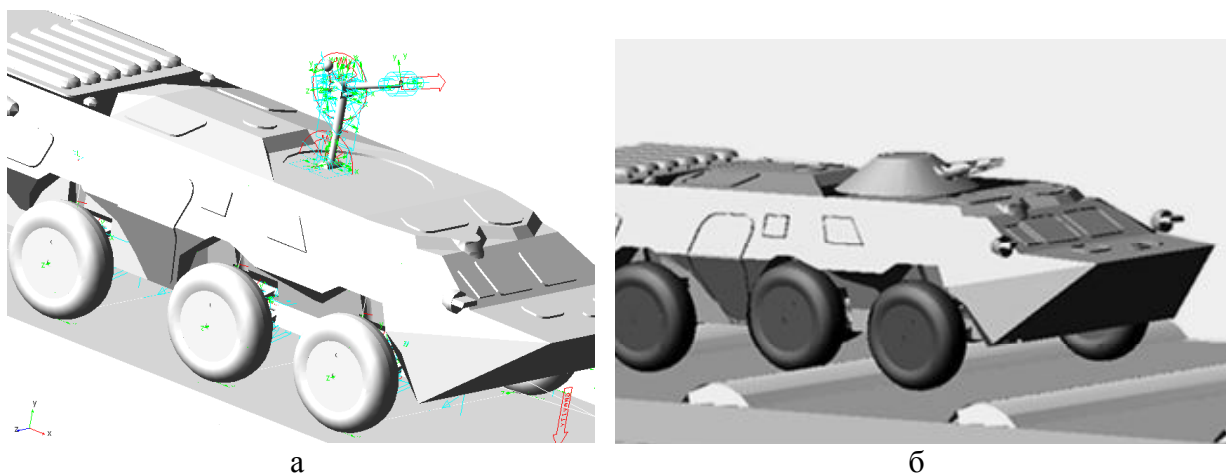


Рис. 4. Моделирование в пакете ADAMS:  
а – исследование процессов стрельбы, б – исследование прохождения полосы препятствий

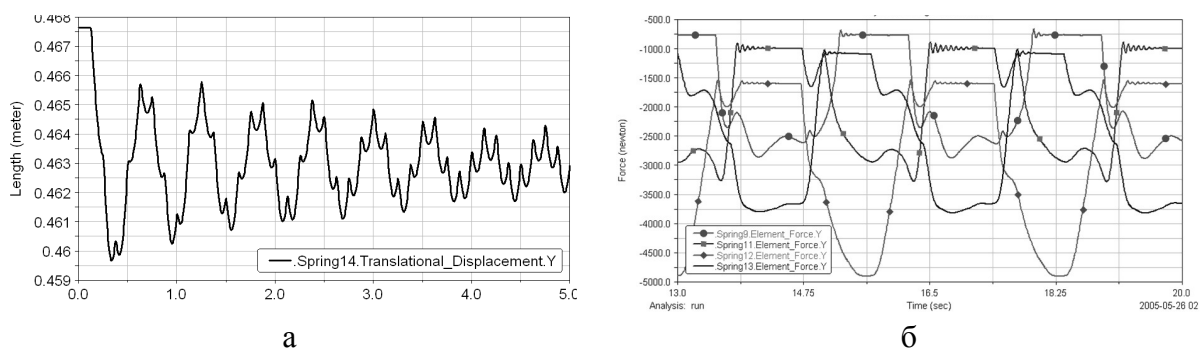


Рис. 5. Результаты численного моделирования:

- а – изменение длины амортизатора 4-й оси при стрельбе с темпом 360 выстр./мин.;  
 б – реакции в элементах подвески при прохождении полосы препятствий

**Вывод.** Из анализа представленных результатов можно заключить, что традиционному представленный подход имеет целый ряд преимуществ. Так, традиционный подход [1-4] предполагает проведение предварительного этапа составления моделей согласно подходу, например, путем составления дифференциальных уравнений Лагранжа 2-го рода. При этом с достаточной степенью точности не учитываются инерционно-жесткостные свойства бронекорпуса. Кроме того, сам процесс создания таких моделей очень громоздок.

В противовес этому предложенный подход достаточно оперативно позволяет генерировать и модели, и разрешающие уравнения. В то же время его основная часть действует по принципу "черного ящика": на входе – исходные данные, на выходе – конечно-элементные модели. При этом для вмешательства в процесс моделирования остается ограниченный инструментарий. Это – потенциальный недостаток данного подхода.

В то же время решение ряда тестовых задач продемонстрировало работоспособность предложенной технологии. В будущем планируется распространить ее на решение серии задач с целью обоснования проектных параметров проектируемых легкобронированных машин, причем с учетом различных физико-механических процессов и состояний в элементах этих машин при действии разнообразных возмущений.

**Литература:** 1. Толстоуцкий В.А. Математическое моделирование и анализ процессов в шасси колесных и гусеничных машин / В.А. Толстоуцкий; под ред. Д.О. Волонцевича. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – 171 с. 2. Математическое моделирование процессов возмущенного движения агрегатов и систем бронетанковой техники: Учеб. пособие в 2-х т. – Т.1. / Е.Е. Александров, Д.О. Волонцевич, В.В. Дущенко, В.В. Епифанов, Н.В. Кохановский. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – 356 с. 3. Мельник Б.А., Малакей А.Н., Танченко А.Ю., Кохановская О.В. Математическое и численное моделирование динамических процессов в элементах легкобронированных боевых машин // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Машиноведение и САПР. – Харьков: НТУ «ХПИ». –2013. – № 1(975) – С. 93-117. 4. Мельник Б.А. К вопросу о влиянии поперечно-угловых колебаний корпуса легкобронированных колесных машин на точность стрельбы // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Механика и машиностроение. – Харьков: НТУ «ХПИ». –2012. – № 2 – С. 118-121. 5. Гриценко Г. Д., Малакей А.М., Миргородский Ю. Я., Ткачук Н.А., Ткачук А.В. Интегрированные методы исследования прочностных, жесткостных и динамических характеристик элементов сложных механических систем // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Механика и машиностроение. – Харьков: НТУ «ХПИ» – 2002.– № 1. – С.6-13. 6. Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Малакей А.Н., Гриценко Г.Д., Орлов Е.А. Структура специализированных интегрированных систем автоматизированного анализа и синтеза

элементов транспортных средств специального назначения // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Механика и машиностроение. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – №1. – С. 184-194. 7. Бруль С.Т., Ткачук Н.А., Васильев А.Ю., Карапейчик И.Н. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Механика и машиностроение. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – №1. – С. 66–73. 8. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.:Наука. 1968. – 560 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Tolstolutskiy V.A. Matematicheskoe modelirovanie i analiz protsessov v shassi kolesnyih i gusenichnyih mashin / V.A. Tolstolutskiy; pod red. D.O. Volontsevicha. – Kharkov: NTU «KhPI». – 2013. – 171 s. 2. Matematicheskoe modelirovanie protsessov vozmuschennogo dvizheniya agregatov i sistem bronetankovoy tehniki: Ucheb. posobie v 2-h t. – T.1. / E.E. Aleksandrov, D.O. Volontsevich, V.V. Duschenko, V.V. Epifanov, N.V. Kohanovskiy. – Kharkov: NTU «KhPI», 2012. – 356 s. 3. Melnik B.A., Malakey A.N., Tanchenko A.Y., Kohanovskaya O.V. Matematicheskoe i chislennoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elementah legkobronirovannyih boevyih mashin // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Mashinovedene i SAPR. – Kharkov: NTU «KhPI». –2013. – # 1(975) – S. 93-117. 4. Melnik B.A. K voprosu o vliyaniy poperechno-uglovyih kolebaniy korpusa legkobronirovannyih kolesnyih mashin na tochnost strelby // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Mehanika i mashinostroenie. – Kharkov: NTU «KhPI». –2012. – # 2 – S. 118-121. 5. Gritsenko G. D., Malakey A.M., Mirgorodskiy Y. Y., Tkachuk N.A., Tkachuk A.V. Integrirovannyye metody issledovaniya prochnostnyih, zhestkostnyih i dinamicheskikh harakteristik elementov slozhnyih mehanicheskikh sistem // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Mehanika i mashinostroenie. – Kharkov: NTU «KhPI» – 2002.– # 1. – S.6-13. 6. Tkachuk N.A., Brul S.T., Malakey A.N., Gritsenko G.D., Orlov E.A. Struktura spetsializirovannyih integrirovannyih sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza elementov transportnyih sredstv spetsialnogo naznacheniya // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Mehanika i mashinostroenie. – Kharkov: NTU «KhPI». – 2005. –#1. – S. 184-194. 7. Brul S.T., Tkachuk N.A., Vasilev A.Yu., Karapeychik I.N. Modelirovanie fiziko-mechanicheskikh protsessov v korpusah legkobronirovannyih mashin: podhodyi, modeli, efekty // Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Mehanika i mashinostroenie. – Kharkov: NTU «KhPI». – 2011. – #1. – S. 66–73. 8. Babakov I.M. Teoriya kolebaniy. – М.:Наука. – 1968. – 560 s.

*Рикунов О.Н., Набоков А.В., Мазур И.В., Белов Н.Л., Шейко А.И., Ткачук Н.А.*

#### СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРОГРАМНО-МОДЕЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ АНАЛІЗА ДИНАМІЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В статье описаны подходы к разработке математических моделей динамических процессов при воздействии на колесные легкобронированные машины серии импульсных и динамических усилий. Для анализа процессов созданы численные модели в среде CAE- систем.

*Рикунов О.М., Набоков О.В., Мазур І.В., Белов М.Л., Шейко О.І., Ткачук М.А.*

#### СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРОГРАМНО-МОДЕЛЬНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті описані підходи до розробки математичних моделей динамічних процесів при дії на колісні легкоброньовані машини серії імпульсних та динамічних зусиль. Для аналізу процесів створено числові моделі у середовищі CAE-систем.

*Rikunov O.N., Nabokov A.V., Mazur I.V., Belov N.L., Sheiko A.I., Tkachuk N.A.*

#### SPECIALIZED COMPLEX SOFTWARE FOR THE DYNAMIC PROCESSES ANALYSIS

This article describes the approaches to the development of mathematical models of dynamic processes when exposed to wheeled light armored vehicles series of pulse efforts. Numerical models were created for analyzing the processes established among in CAE-systems.