

**О. Н. РИКУНОВ, А. Ю. ТАНЧЕНКО, Н. А. ТКАЧУК, Я. Н. ЛИСОВОЛ, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
А. Ю. ВАСИЛЬЕВ, А. В. НАБОКОВ, А. Н. МАЛАКЕЙ, М. А. БОНДАРЕНКО, Е. А. ЛУНЕВ**

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ СТРЕЛЬБЫ ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЯ ВООРУЖЕНИЯ МОДЕРНИЗИРУЕМЫХ ЛЕГКИХ БРОНИРОВАННЫХ МАШИН

Работа посвящена исследованию динамических процессов при осуществлении стрельбы из малокалиберных автоматических пушек, которыми оснащаются боевые модули современных боевых легкобронированных машин. Разработаны математические и параметрические компьютерные модели изучаемых объектов с тестовыми параметрами. Проведены исследования влияния различных факторов на характеристики колебательных процессов. Установлены характерные особенности динамических процессов и их влияние на рассеяние снарядов при стрельбе. Созданные модели, методы и средства моделирования пригодны для обоснования проектных решений при проектировании и модернизации отечественных легкобронированных машин. Определены особенности изменения собственных частот и форм колебаний при варьировании жесткости бронекорпуса, подвески и боевого модуля. Выявлено, что для адекватного моделирования динамических процессов и оценки точности стрельбы необходимо исследовать полную модель, которая включает податливые деформируемые элементы: бронекорпус, подвеску и боевой модуль.

Ключевые слова: точность стрельбы, легкобронированная машина, собственная частота колебаний, бронекорпус, боевой модуль, малокалиберная автоматическая пушка

**О. М. РИКУНОВ, А. Ю. ТАНЧЕНКО, М. А. ТКАЧУК, Я. М. ЛИСОВОЛ, А. В. ГРАБОВСКИЙ,
А. Ю. ВАСИЛЬЕВ, А. В. НАБОКОВ, А. М. МАЛАКЕЙ, М. О. БОНДАРЕНКО, Є. О. ЛУНЬОВ**

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ СТРІЛЬБИ ШЛЯХОМ ОБГРУНТУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЯ ОЗБРОЄННЯ ЛЕГКИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН, ЩО МОДЕРНІЗУЮТЬСЯ

Робота присвячена дослідженням динамічних процесів при здійсненні стрільби із малокаліберних автоматичних гармат, якими оснащуються бойові модулі сучасних бойових легкоброньованих машин. Розроблені математичні та параметричні комп'ютерні моделі досліджуваних об'єктів із тестовими параметрами. Проведені дослідження впливу різноманітних чинників на характеристики коливальних процесів. Установлені характерні особливості динамічних процесів та їх вплив на розсіювання снарядів при стрільбі. Створені моделі, методи та засоби моделювання придатні для обґрунтування проектних рішень при проектуванні та модернізації вітчизняних легкоброньованих машин. Визначені особливості зміни власних частот і форм коливальних при варіюванні жорсткості бронекорпусу, підвіски і бойового модуля. Виявлено, що для адекватного моделювання динамічних процесів і оцінки точності стрільби необхідно досліджувати повну модель, яка включає податливі елементи, що деформуються: бронекорпус, підвіску і бойовий модуль.

Ключові слова: точність стрільби, легкоброньована машина, власна частота коливальних, бронекорпус, бойовий модуль, малокаліберна автоматична гармата

**O. RIKUNOV, A. TANCHENKO, M. TKACHUK, Y. LISOVOL, A. GRABOVSKIY, A. VASILIEV,
A. NABOKOV, A. MALAKEI, M. BONDARENKO, E. LUNYOV**

ENSURING OF SHOOTING ACCURACY BY JUSTIFICATION OF ARMAMENT MODULE'S CHARACTERISTICS FOR MODERNIZED LIGHTLY ARMORED VEHICLES

The work is devoted to studying of dynamic processes during firing from small-caliber automatic guns. These guns are equipped by the combat units of modern lightly armored vehicles. Parametric mathematical and computer models of objects under study with test parameters were developed. Influence of various factors on characteristics of oscillatory processes was investigated. Characteristics of dynamic processes and their effect on the scattering of shells during firing are defined. Models, methods and simulation tools suitable for justification of design solutions during design and modernization of domestic light-armored vehicles were created. Specific features of change in natural frequencies and vibration modes are determined with varying rigidity of armored hull, suspension and combat module. It is revealed that for adequate modeling of dynamic processes and estimation of shooting accuracy it is necessary to investigate a complete model that includes pliable deformable elements: armored hull, suspension and combat module.

Keywords: shooting accuracy, light armored vehicles, natural frequency, hull, military unit, automatic small-caliber gun

Введение. Артиллерийское вооружение нашло применение при установке на объекты бронетехники легкой категории еще в 50-60 годы прошлого столетия. Однако вопросам совершенствования комплекса вооружения боевой машины пехоты и башенно-пулеметной установки бронетранспортера особого внимания не уделялось до 90-х годов XX века. Начиная с 90-х годов существенно изменились взгляды на формы и способы ведения боевых действий. При этом повысилась роль боевых колесных машин легкой категории (миротворческие операции на Балканах, антитеррористическая компания в Чеченской республике, боевые действия в восточных областях Украины). Это вызвало всплеск разработок по установке малокалиберной автоматической пушки (МАП) 23–30 мм на объекты гусеничной и колесной бронетехники в середине 90-х годов, который и продолжается до настоящего време-

ни.

Современные формы ведения боевых действий поставили перед разработчиками бронетехники задачи по внедрению новых решений как при разработке новых, так и при модернизации существующих образцов бронетехники легкой категории. Таковыми являются мероприятия, направленные на повышение защищенности, подвижности и, особенно, огневой мощи. Так, в связи с возросшим уровнем защищенности колесной бронетехники, на БТР стали устанавливаться МАП в составе модуля вооружения, позволяющие на дальностях до 1500 м успешно вести борьбу со всеми типами легкобронированных целей, поражая их приборы прицеливания, наблюдения, датчики, вооружение, находящиеся снаружи.

© О. Н. Рикунев, А. Ю. Танченко, Н. А. Ткачук, Я. Н. Лисовол, А. В. Грабовский, А. Ю. Васильев, А. В. Набоков, А. Н. Малакей, М. А. Бондаренко, Е. А. Лунев, 2018

При этом такое оружие также позволяет вести борьбу с низколетящими воздушными целями и живой силой противника. С установкой МАП повышаются требования к точности стрельбы бронейным снарядом по цели типа танк, БМП, БТР, поскольку точность является одной из главных характеристик МАП.

Следует отметить тот факт, что при стрельбе МАП возникают колебания, обусловленные силой отдачи пушки, которые ухудшают условия стрельбы при стрельбе с места и в движении, что приводит к снижению точности стрельбы. Для нивелирования возмущений, возникающих при стрельбе, в модуле вооружения устанавливается стабилизатор вооружения. При его отсутствии значительно ухудшаются условия стрельбы. При таких условиях стрельбы, если наводчик смог произвести наведение на цель, то за счет вибраций пушка сместится с линии прицеливания и снаряд отклонится от цели, что обусловлено сложением скорости полета снаряда и движения пушки в сторону от линии прицеливания в момент выстрела. В этих условиях чем меньше угловая скорость и амплитуда колебаний, тем лучше, с точки зрения обеспечения точности стрельбы. Установка стабилизатора вооружения значительно упростила наведение и многократно повысила точность стрельбы как с места, так и с ходу. Однако исполнительные механизмы стабилизаторов вооружения обладают инерционностью и при высоких частотах колебаний не могут достаточно удерживать пушку в заданном положении, причем увеличению амплитуды колебаний ствола способствует раскачивание бронекорпуса на подвеске машины, как при стрельбе с места, так и в движении. При этом устройствами, защищающими боевую машину от раскачивания при стрельбе, являются амортизаторы и торсионы. Однако в работе в общем рассматривается влияние характеристик боевого модуля в составе единой динамической системы в соединении с бронекорпусом и подвеской.

При этом определить величину амплитуды колебаний ствола пушки при стрельбе, условия резонанса, фазочастотные характеристики достаточно сложно известными математическими методами. Это объясняется возникновением вынужденных негармонических колебаний системы "боевой модуль – корпус – подвеска". Таким образом, возникает противоречие между потребностями практики и возможностями МАП. В связи с этим необходимо разработать метод, позволяющий на основе результатов стрельбы определить амплитуды колебаний системы в целом, условия резонанса, а также отклонения оси канала ствола от номинального направления при стрельбе как одиночными выстрелами, так и очередью.

В силу перечисленных обстоятельств разработка данного метода представляется актуальной научной задачей, что и определило направления исследований.

Цель и задачи исследования. *Целью работы* является обеспечение точности стрельбы бронейным снарядом малокалиберной автоматической пушки в составе модуля вооружения колесной бронетехники на

основе решения задачи уменьшения отклонения оси канала ствола от номинального положения ее стабилизации при стрельбе.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи исследований:

1) провести анализ методов обеспечения точности стрельбы из боевых модулей с МАП и определить пути решения задач исследований;

2) провести экспериментальные исследования характеристик точности стрельбы на опытном образце бронетранспортера БТР-3Е;

3) усовершенствовать динамическую модель механической системы "боевой модуль – бронекорпус – подвеска", получаемой в результате установки на БТР модуля вооружения с МАП, а также провести многовариантные исследования поведения динамической системы при варьировании ее параметров;

4) разработать метод определения значений параметров колебаний системы "боевой модуль – бронекорпус – подвеска", вызванных возмущениями системы при стрельбе с места, и разработать рекомендации по обеспечению точности стрельбы.

Обзор и анализ работ по исследованию точности стрельбы из ствольных систем бронетехники легкой категории. *Малокалиберные автоматические пушки в составе модуля вооружения бронетехники легкой категории.* Диапазон типовых целей современных скорострельных пушек практически не изменился. Развитие бронетехники привело к появлению БМП с усиленным бронированием, где малокалиберная автоматическая пушка является основным оружием. Вместе с тем, решение задачи поражения существующих и перспективных объектов бронетехники связано с необходимостью улучшения тактико-технических характеристик (ТТХ) комплекса вооружения, установленного на бронетехнике. Достижение этого возможно увеличением калибра основного оружия, и, соответственно, обеспечением необходимой точности стрельбы. С момента появления первой малокалиберной пушки наблюдается непрерывный рост уровня защищенности всех типов целей, отражением чего является тенденция повышения калибра основного вооружения и создания бронейно-подкалиберных снарядов для МАП [1–3].

Эволюция средств вооруженной борьбы и тактики ведения боя постоянно вносит свои коррективы в требования, предъявляемые к современной бронетехнике. В настоящее время одним из направлений достижения современных требований ТТХ боевых машин является модернизация [4–8]. Процесс модернизации представляет собой систему конструкторских, технологических, инженерных и научно-исследовательских проработок, объединенных целью повышения тактико-технических характеристик бронетанковой техники (БТТ). Модернизацией занимаются не только страны, не производящие бронетехнику, но и государства, являющиеся основными производителями.

Во многих странах разработаны и осуществляются программы модернизации легких колесных и гусеничных

боевых бронированных машин (ЛКиГ БМ), предусматривающие повышение как отдельных свойств машин (огневой мощи, защищенности, подвижности), так и всего комплекса ТТХ [9]. Анализ работ [6–8] свидетельствует о существенном увеличении количества производимых и модернизируемых объектов БТР и изменении структуры бронетанкового вооружения в связи с увеличением доли бронированных машин легкой категории.

Интерес к модернизации БТР, касающийся повышения показателей ТТХ, связан с тем, что именно БТР-80 в локальных конфликтах 1980–2010-х гг. зарекомендовал себя как надежное транспортное средство, отличающееся от зарубежных аналогов высокими показателями ТТХ. Увеличение огневой мощи боевых колесных машин является одним из главных технических приоритетов, поскольку концептуально любой образец бронетехники должен иметь возможность ведения борьбы с аналогичной бронированной целью в условиях постоянно увеличивающегося уровня защищенности бронетехники легкой категории. В результате этого на объекты легкой бронетехники стали устанавливать модули вооружения с малокалиберными автоматическими пушками, что существенно расширило спектр поражаемых целей, особенно бронированных машин легкой категории.

Как видно из анализа состояния вопроса, калибр основного вооружения колесной бронетехники составляет 30 мм, таковым является калибр большинства МАП. Непрерывное повышение требований к бронетехнике увеличивает уровень ее сложности, приводит к возникновению новых свойств. Так, высокий темп стрельбы (до нескольких тыс. выстрелов/мин.), необходимый для попадания по воздушной цели противника, нецелесообразен при стрельбе по наземным целям, поскольку наземная бронетехника имеет малую скорость и относительно большую площадь силуэта во всех ракурсах. Поэтому были созданы одноствольные автоматические пушки, которые могут вести огонь как по наземным, так и по воздушным целям. В дальнейшем МАП нашли свое применение при установке на объекты колесной бронетехники легкой категории (по массе). Ввиду эволюции средств противотанковой защиты необходимость установки 30–45 мм автоматической пушки на БТР обусловлена возросшим уровнем защищенности машин второй линии. Также одним из современных требований, предъявляемым к малокалиберной автоматической пушке в составе модуля вооружения колесной бронетехники, является увеличение дистанции открытия огня (более 1500 метров). При решении огневых задач используются осколочно-фугасный, зажигательный и осколочно-трассирующий снаряды для поражения живой силы и небронированной техники, бронебойно-трассирующий снаряд для борьбы с легкобронированной техникой. Прицельная дальность стрельбы бронебойно-трассирующим снарядом – до 2000 м, эффективная дальность – до 1500 м. На этой дальности снаряд пробивает 18-мм броню под углом 60°, а подкалиберный бронебойный снаряд "Трезубка" – 25-мм броню. Это позволяет вести борьбу с легкобронированными целями типа БТР, БМП.

Малокалиберным автоматическим пушкам присущи такие качества: универсальность (обусловленная разнообразием типов используемых боеприпасов и возможностью изменения режима стрельбы); сравнительно небольшая масса и габариты в сравнении с артиллерией; простота технического обслуживания и невысокая стоимость. К МАП как к технической системе при стрельбе предъявляются следующие требования: обеспечение заданной точности стрельбы; повышенное действие снаряда по цели (бронепробиваемость). Следует отметить тот факт, что малокалиберные автоматические пушки относятся к ствольным системам умеренной баллистики.

Автоматические пушки занимают промежуточное положение между артиллерией и стрелковым оружием по применяемым боеприпасам и темпу стрельбы. Начальные скорости снаряда МАП больше, чем у стрелкового оружия, но меньше, чем у артиллерийских снарядов. Малокалиберные пушки калибром 30 мм нашли применение при разработке модулей вооружения в России, Беларуси, Украине, Германии, Франции. При этом основные показатели технических характеристик модулей вооружения практически одинаковы.

Некоторые модули вооружения устанавливаются на объекты бронетехники легкой категории как при создании новых, так и при модернизации существующих ЛКиГ БМ [10]. В свою очередь, к малокалиберным автоматическим пушкам, установленным в модуле вооружения колесной бронетехники, предъявляется требование по обеспечению высокой точности стрельбы. Это связано с увеличением дистанции открытия огня (более 1500 метров) МАП в составе модуля вооружения колесной бронетехники [11].

При этом существенным недостатком при установке МАП на объекты бронетехники легкой категории является низкая точность стрельбы бронебойным снарядом по цели типа танк, БТР, БМП.

Это обусловлено тем, что в первую очередь платформа, на которую установлена МАП, не предназначена для основного оружия такого калибра, в результате чего при откате возникают колебания как пушки, так и корпуса в целом. Также при установке модуля вооружения центр масс МАП не совпадает с осью канала ствола и осью цапф, и при стрельбе происходит увод ствола пушки при стрельбе [11, 12].

Основные факторы, которые влияют на точность стрельбы малокалиберной пушки. Автоматическая пушка, как и любое автоматическое оружие, обладает рядом свойств, определяющих ее боевое применение. К основным боевым свойствам малокалиберной автоматической пушки относятся точность стрельбы, мощность снаряда, дальнобойность, скорострельность, огневая маневренность, надежность в эксплуатации, простота и удобство обслуживания. Точность стрельбы включает меткость и кучность стрельбы. Кучность стрельбы обуславливается рассеиванием точек падения снарядов относительно некоторой средней точки их падения, центра группирования. Меткость характеризуется отклонением средней точки попадания от контрольной точки. Это отклонение, в основном, вызывается погрешностями средств обеспечения стрельбы (ошибками подготовки исходных данных стрельбы).

Меткость и кучность стрельбы, характеризующие точность, зависят от многих факторов. К факторам, влияющим на точность стрельбы МАП, относятся: процесс стабилизации пушки при стрельбе в режиме "автомат"; колебания ствола пушки, обусловленные наличием зазоров в узлах сопрягаемых деталей; неравномерное нагревание стенок ствола при стрельбе очередью; неэластичные и остаточные деформации корпуса боевой машины после выстрела.

Система стабилизации вооружения широко используется как на танках, так и на бронетехнике легкой категории, с целью обеспечения ведения прицельного огня с места и в движении. Соответственно, установка стабилизаторов повышает точность стрельбы основного оружия, установленного на бронетехнике, поскольку основным требованием к системе стабилизации пушки, которая находится под влиянием внешних возмущений, является обеспечение постоянного положения оси канала ствола относительно направления на цель. Направления совершенствования стабилизации основного танкового вооружения проанализированы в работах [13, 14]. В работе [14] рассмотрена возможность применения микрогироскопов для измерения угловых скоростей в системах стабилизации вооружения легкой бронетехники вместо гироскопов.

Решению задачи влияния теплового состояния ствола и колебаний корпуса машины при стрельбе на точность также посвящен ряд работ.

В работах [15, 16] рассмотрено решение задачи по расчету статической и динамической реакции корпуса МТ-ЛБ при одиночном выстреле из 30-мм пушки при различных направлениях стрельбы относительно корпуса.

Таким образом, решению задачи повышения точности стрельбы одиночными выстрелами уделяется значительное внимание, а решение задачи повышения точности стрельбы очередью из автоматической пушки калибра 23–30 мм раскрыто в научных изданиях частично.

При стрельбе по цели приходится сталкиваться с системой ошибок, одни из которых повторяются (ошибки подготовки исходных данных стрельбы), другие не повторяются. Таким образом, точность стрельбы непосредственно связана с отклонением точек попадания от центра цели, т.е. ошибками стрельбы.

Точность стрельбы из артиллерийских систем, в том числе МАП, зависит от нескольких групп ошибок: ошибки технической подготовки исходных установок выстрела; техническое рассеивание снаряда; вибрационное рассеивание при стрельбе с ходу; ошибки наведения пушки в момент выстрела.

При однообразных условиях стрельбы точки падения снарядов не совпадают вследствие естественного рассеивания. Обусловлено это рядом причин и, прежде всего, разной величиной начальной скорости снаряда и угла метания. Меняется начальная скорость и из-за разной массы снарядов. По существующим заводским допускам вес снарядов может отличаться от номинального на $\pm 3\%$. К изменению начальных скоростей ведет и износ канала ствола – выкрашивание нарезов, трещины и прочие дефекты.

Если разнообразие начальных скоростей влечет за собой рассеивание снарядов по дальности, то произвольное изменение величины угла бросания и направления стрельбы (в момент выстрела) приводит к рассеиванию и по дальности, и по направлению.

Причинами, вызывающими отклонение начальных скоростей, являются: отклонение в весе пороховых зарядов и пуль, в форме и размерах пуль и гильз, в качестве пороха, в плотности заряжания, как результат неточностей (допусков) при их изготовлении; различная температура зарядов, зависящая от температуры воздуха и неодинакового времени нахождения патрона в нагретом при стрельбе стволе; разнообразие в степени нагрева стенок ствола и в его качественном состоянии.

Таким образом, причины рассеивания разделяются на три группы, см. рис. 1 [17, 18].



Рис. 1 – Причины рассеивания

Эти причины ведут к изменению в начальных скоростях, а, следовательно, и в дальностях полета пуль, т.е. приводят к рассеиванию пуль по дальности (высоте) и зависят в основном от боеприпасов и оружия.

Причинами, вызывающими отклонение углов бросания и направления стрельбы, являются: разнообразие в горизонтальной и вертикальной наводке пушки; разнообразие углов вылета снарядов, получаемое в результате неустойчивого и неоднородного удержания пушки, особенно во время стрельбы очередью; угловые колебания ствола при стрельбе автоматическим огнем, возникающие вследствие движения и ударов подвижных частей и отката пушки.

Причинами, вызывающими разнообразие условий полета снаряда, являются: разнообразие в атмосферных условиях; разнообразие в весе, форме и размерах снарядов, приводящее к изменению величины силы сопротивления воздуха.

Все это приводит к увеличению рассеивания по боковому направлению и по дальности (высоте) и, в основном, зависит от внешних условий стрельбы и от боеприпасов. При каждом выстреле в разном сочетании действуют все три группы причин. Это приводит к тому, что полет каждого снаряда происходит по траектории, отличной от траектории других снарядов.

Проанализировав три группы рассеивания, можно сказать, что причины первой и третьей групп являются относительно постоянными. А вот причины второй группы требуют более детального изучения, поскольку угол бросания зависит от многих факторов, в том числе и от величины амплитуды колебаний ствола пушки и корпуса БТР при стрельбе, что приводит к снижению точности

стрельбы.

Решением задачи повышения точности стрельбы малокалиберных ствольных систем в своих работах занимались такие ученые как В. Грязев, А. Шипунов, Э. Давыдов, В. Аксентьев, С.М. Березин.

В работе [18] рассматривается повышение точности стрельбы зенитными артиллерийскими комплексами путем искусственного рассеивания снарядов. Однако предложенный метод не может быть применим для модулей вооружения ЛКиГ ББМ с установленными МАП, поскольку для достижения необходимой вероятности поражения требуется значительный запас возимого боекомплекта. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению полезного забронированного пространства.

С проблемой точности стрельбы столкнулись конструкторы при установке 30-мм одноствольной пушки на вертолет. Перед конструкторами встала задача: разместить пушку на вертолете так, чтобы сохранить ее достоинство – высокую точность стрельбы – и компенсировать ее недостаток по массе, которая значительно больше массы аналогичных авиационных пушек. Расчеты показали: в случае размещения пушки в носовой турели отдача при стрельбе будет оказывать существенное воздействие на вертолет. Это потребует серьезного усиления конструкции фюзеляжа и снизит точность стрельбы. Решено было поставить ее в районе центра масс со стороны правого борта между подредукторными шпангоутами – в самом прочном и жестком месте фюзеляжа. Такая компоновка уменьшала влияние сил отдачи на вертолет и обеспечивала максимально высокую точность стрельбы [19].

Как показывает модернизация МТ-ЛБ, модуль вооружения с МАП размещен сзади, чтобы компенсировать недостаток точности стрельбы, обусловленный смещением центра масс [15].

Также, при установке автоматической пушки 2А72 на БМП-3 (модуль вооружения "Бахча"), чтобы устранить основной недостаток – малую по сравнению с пушками с неподвижными стволами точностью стрельбы – тульские конструкторы КБП (г. Тула, Россия) нашли оригинальное решение, прикрепив с помощью подвижной муфты ее дульную часть к 100-мм орудию. К сожалению, такое решение неприменимо к модернизируемым комплексам вооружения колесной бронетехники, поскольку МАП является основным вооружением, и компенсировать недостаток точности стрельбы возможно путем разработки требований к условиям установки и удержания пушки для обеспечения заданной точности стрельбы.

Таким образом, при установке МАП в системе "боевой модуль – корпус – подвеска" происходят процессы, влияющие на точность стрельбы: колебания корпуса БТР, обусловленные недостаточной жесткостью подвески машины и бронекорпуса; колебания ствола, обусловленные наличием зазоров в узлах сопрягаемых деталей пушки и модуля вооружения; совокупное колебание системы "боевой модуль – корпус – подвеска" при стрельбе; неравномерное нагревание стенок ствола пушки при стрельбе; возникающие неэластичные и остаточные деформации корпуса боевой маши-

ны после выстрела; погрешность выработки исходных данных для стрельбы; вибрация ствола.

Из всей совокупности перечисленных факторов достаточно весомо влияние колебаний, возникающих при стрельбе, и методов их устранения.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что определение амплитуды колебаний пушки и корпуса машины, а также в целом характеристик динамической системы при стрельбе представляется актуальной научной задачей.

Экспериментальное исследование точности стрельбы 30-мм пушки, установленной на БТР-3Е.

Методика проведения эксперимента. В процессе разработки практических рекомендаций по повышению точности стрельбы МАП в составе модуля вооружения возникает необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований точности стрельбы. Необходимость учета при этом большого числа факторов, влияющих на параметры процессов, происходящих при стрельбе, делает практически невозможным их теоретическое исследование без привлечения данных экспериментальных исследований для верификации отдельных параметров расчетных моделей исследуемой динамической модели. Поэтому при разработке рекомендаций основную роль играют экспериментальное исследование точности стрельбы МАП в составе модуля вооружения колесной бронетехники.

Учет факторов, влияющих на точность стрельбы, может быть проведен в результате обработки большого числа экспериментальных данных. Поэтому чтобы сократить количество необходимых опытов, необходимо проведение планирования эксперимента [20].

Большой практический и теоретический интерес представляет определение точности стрельбы и отклонения пушки и корпуса в зазорах сопрягаемых деталей при установке и креплении пушки в модуле, модуля в корпусе при стрельбе, а также для определения других параметров динамической системы "боевой модуль – корпус – подвеска".

В соответствии с изложенным, в данной работе приведены результаты экспериментальных исследований изделия БТР-3Е. Результаты обработки экспериментов представлены в форме таблиц и графиков.

Целью эксперимента является определение характеристик точности стрельбы МАП в составе модуля вооружения, а также исследование системы "пушка – модуль – корпус – подвеска" и получение зависимостей, связывающих влияние динамики этой системы и точность стрельбы. Испытания проводились на натурном объекте БТР-3Е с использованием материальной части и на полигоне ГП ХКБМ им. А.А. Морозова.

Определение центра масс и основных массогабаритных параметров машины, которая является сложным геометрическим телом с расположенными в нем экипажем, боекомплектом, ЗИП, топливом, существенно зависит от конструктивно-компоновочного решения по их размещению, в соответствии с нормативом.

Во время испытаний производились: определение массы, горизонтальной и вертикальной координаты центра масс (ц.м.) объекта; экспериментальное исследование

точности стрельбы МАП в составе боевого модуля.

Экспериментальное определение горизонтальной и вертикальной координаты центра масс изделия БТР-3Е производилось путем подвешивания БТР-3Е и измерения возникающей при этом реакции в подъемном устройстве (рис. 1, 2). Изделие полностью заправленное горюче-смазочными материалами, укомплектовывалось в соответствии с конструкторской документацией (КД). Недостающее снаряжение и вес недостающих членов экипажа и десанта имитировались балластными грузами, расположение которых не изменяло положение центра масс изделия.

Изделие поднималось на высоту 25..50 см с помощью крана и чалочного средства с динамометром за носовые и кормовые крюки. Фиксировались показания динамометра ДОР-50. Измерения проводились 3 раза. За результат измерений принималось среднее арифме-

тическое значение результатов 3-х измерений.

В связи с неполной комплектацией полная масса изделия определялась суммой фактической массы взвешенного изделия и массы отсутствующей при взвешивании комплектации по формуле:

$$G_m = m + G_0, \quad (1)$$

где G_m – масса полностью укомплектованной машины;

m – фактическая масса взвешенного изделия;

G_0 – масса отсутствующей комплектации.

Определение горизонтальной координаты центра масс. Измерялось положение БТР относительно горизонта с помощью квадранта КО-30М. Изделие поднималось за кормовые технологические крюки с помощью чалки с динамометром ДОР-50, при этом убиралась подставка из-под кормовой части изделия.

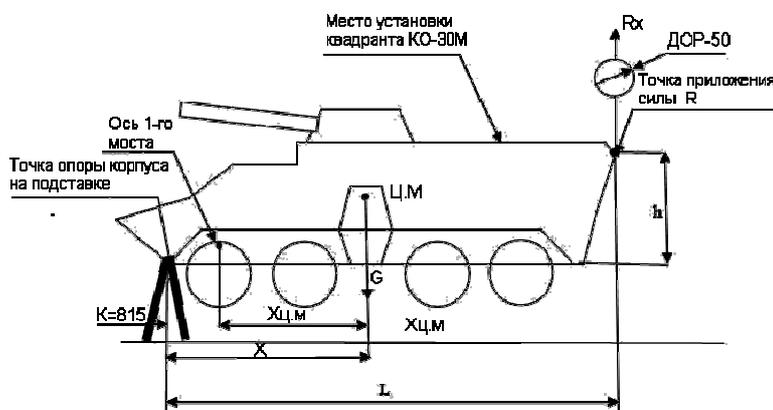


Рис. 2 – Схема установки изделия при измерении горизонтальной координаты центра масс

Поднимая и опуская корму изделия, обеспечивалось положение, идентичное его положению на горизонтальной площадке, контроль осуществлялся с помощью квадранта с отклонением $\pm 30'$ (см. рис. 2). Фиксировались показания динамометра.

Испытания проводились 3 раза. За результат измерений принимается среднее арифметическое значение результатов 3-х измерений.

Горизонтальная координата ц.м. определялась (см.

рис. 2): $x = \frac{R_x \cdot L}{G}$, $X_{ц.м} = x - k$, где R_x – среднее

арифметическое показание динамометра, кН; G – полная масса изделия, кН; L – расстояние от точки приложения силы до точки опоры носа изделия на подставку, замеренное рулеткой, мм; k – расстояние по продольной оси изделия от точки опоры носа изделия на подставку до оси первого моста, мм; x – расстояние от места установки корпуса на подставке до центра масс изделия, мм.

Определение вертикальной координаты центра масс БТР. Определение вертикальной координаты центра масс проводилось в следующей последовательности. С помощью крана и чалочного средства с динамометром ДОР-50 поднималась кормовая часть изделия за кормовые технологические крюки на угол

$\alpha = 10^\circ (\pm 1^\circ)$, контроль – по квадрату КО-30М (см. рис. 3). Фиксировались показания динамометра. Измерения проводились 2 раза. За результат измерений принималось среднее арифметическое значение 2-х измерений.

Вертикальная координата центра масс относительно точки опоры днища носа на подставку определялась по формулам:

$$Z = \frac{R_x}{G} h + \frac{x - \frac{R_x}{G} L}{\text{tg} \alpha}, \quad Z_{ц.м} = Z - M.$$

Здесь R_x – усилие, полученное по кривой нагрузки динамометра ДОР-50, кН; Z – расстояние по вертикали от центра масс до точки опоры днища; G – полная (боевая) масса изделия, кН; h – высота от точки приложения силы R_x до точки опоры днища на подставку, мм; α – среднее арифметическое значение угла, град; M – расстояние по вертикали между точкой опоры днища и осью переднего моста.

Определение характеристик точности стрельбы 30 мм автоматической пушки в составе модуля вооружения. Для получения надежной статистики стрельбы проводились с места по щиту

размером 2×2 м на дальности 100 м, и фиксировались все пробоины, попавшие в мишень, расположенную на щите. Прицеливание производилось по точке, расположенной в центре щита.

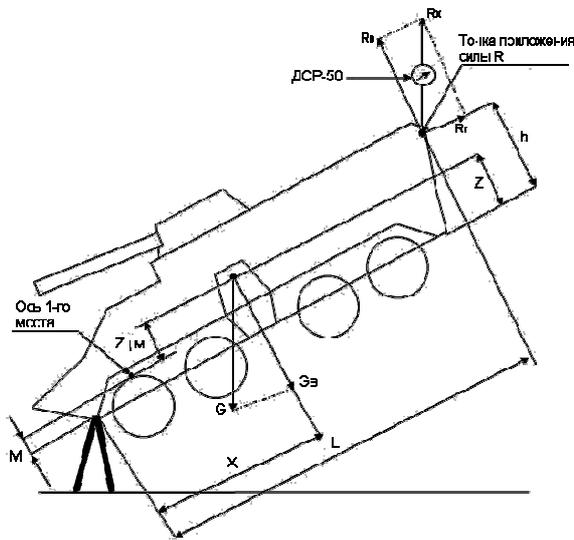


Рис. 3 – Схема установки изделия при измерении вертикальной координаты центра масс

Испытаниям подвергался модуль вооружения изделия БТР-3Е, оборудованный: автоматической пушкой 2А72; спаренным пулеметом АГС-17; стабилизатором вооружения СВУ-500; оптико-телевизионным прицелом и системой управления огнем; перископическим прицелом дневным ПЗУ-7М. Испытания проводились с целью проверки точности стрельбы 30 мм автоматической пушкой в составе башенного модуля изделия БТР-3Е. На рис. 4 приведен алгоритм проведения одной серии эксперимента.

Стрельбовые испытания включали: определение средней точки попадания (СТП) снарядов при стрельбе на дальность 100 м в разных режимах стрельбы; определение характеристик рассеивания снарядов; определение точности стрельбы при фронтальной и фланговой стрельбе; определения отклонений ствола пушки по углу вертикальной и горизонтальной наводки при стрельбе. Перед проведением стрельб проведена пристрелка автоматической пушки.

При выполнении программы стрельбовых испытаний была произведена стрельба с места по месту на дальность 100 м при следующих условиях: стрельба одиночным выстрелом; стрельба очередью в режиме "автомат"; стрельба очередью с ручных приводов; стрельба на борт.

Поскольку экспериментальные стрельбы проводились на дальности 100 м по мишени размером 2×2 (м), а стрельба МАП ведется по бронепелям на дальности 1000 – 1500 (м), то необходимо привести размеры мишени (согласно условиям реальных стрельб) на 100 м и оценить характеристики рассеивания снарядов для каждой серии эксперимента. Приведенные размеры цели равны 0,2×0,2 (м). Определение приведенных размеров цели – на рис. 5.

Значения требуемых параметров для обеспечения

заданной точности стрельбы:

$$W = 2Ltg \frac{\alpha}{2} \approx L\alpha. \quad (2)$$

Здесь W – размер цели, L – дальность до цели, а α – угловой размер цели.

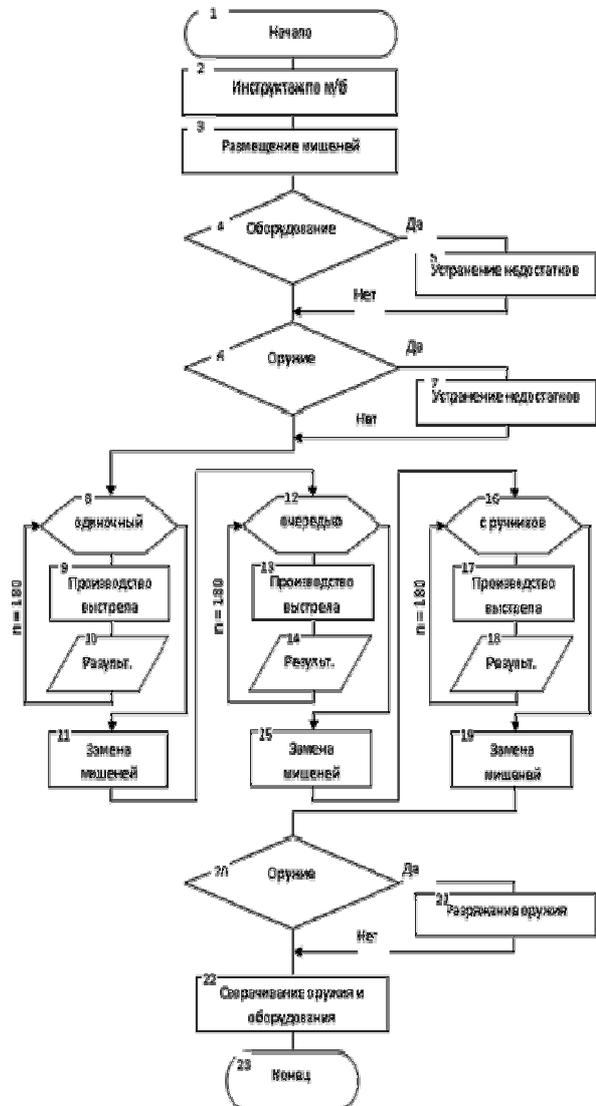


Рис. 4 – Алгоритм проведения эксперимента

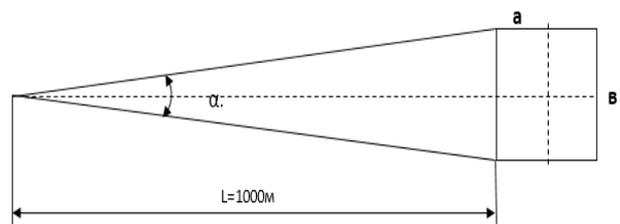


Рис. 5 – Схема определения приведенных размеров цели

Для реальных условий стрельбы (размер мишени приведен к дальности стрельбы 100 м), как при $\alpha_{стр} = 0^\circ$, так и $\alpha_{стр} = 90^\circ$, для обеспечения гарантированного попадания в цель при существующих характеристиках рассеивания размеры цели должны составлять 0,4×0,4 (м). Исходя из полученных ре-

зультатов эксперимента, отклонения средней точки попадания относительно точки прицеливания не должно превышать $\pm 0,1$ м при дальности 100 м, что гарантированно обеспечит попадание в цель.

При обработке результатов экспериментальных стрельб, как при фронтальной, так и при стрельбе на борт, кучность стрельбы практически не меняется. Это свидетельствует о том, что колебание подвески не оказывает существенного влияния на кучность стрельбы, либо влияет одинаково, т.е. отношение продольной жесткости к моменту инерции подвески соответствуют поперечным. Отсюда следует, что зазоры в узлах и упругая деформация сопрягаемых деталей привода наведения пушки, креплении пушки в люльке, креплении боевого модуля в бронекорпусе являются основными генераторами отклонений ствола пушки при стрельбе, поскольку при воздействии силы отдачи перемещаются к своим крайним положениям. Это и приводит к неконтролируемым перемещениям системы "пушка – модуль – корпус", если не удерживать систему в застопоренном положении с допуском, не превышающим суммарно его величину, определенную из условий попадания в типовую цель.

Таким образом, основным условием для определения величины суммарного допуска при установке сопрягаемых деталей, обеспечивающего гарантированное попадание по бронецелям броневой снарядом, является:

$$\sum (\Delta\alpha)_{\text{ствол}} \leq \left(\frac{\alpha}{2}\right)_{\text{цели}}, \quad (3)$$

где $\sum (\Delta\alpha)_{\text{ствол}}$ – суммарный зазор системы наведения и стабилизации пушки при установке МАП.

Результаты стрельбовых испытаний обработаны по методике [20]. По результатам экспериментальных стрельб построены графики точек попаданий и определены средние точки попадания.

Определение отклонения ствола пушки вдоль осей x и y в данный момент времени при стрельбе в разных режимах относительно точки прицеливания в центре мишени. При проведении экспериментальных стрельб с места установлено, что отклонение точек попадания снарядов от контрольной точки возникает в результате суммарного действия четырех групп ошибок выстрела: ошибки технической подготовки пушки; ошибки технической подготовки исходных установок выстрела; вибрационное рассеивание при стрельбе с ходу; ошибки наведения пушки в момент выстрела.

Однако следует отметить, что составляющей величиной отклонения точек попадания от контрольной точки является техническое рассеивание снаряда, причем данная баллистическая характеристика снаряда срабатывает только после того, как снаряд покидает канал ствола. Поэтому техническое рассеивание снаряда относится к отдельной группе ошибок, которая входит в суммарную ошибку выстрела, но не является составляющей ошибки выстрела системы. Отсюда запишем условие для решения баллистической задачи по определению суммарного отклонения системы

"пушка – модуль – корпус – подвеска" при стрельбе с места:

$$\Delta_{\Sigma \text{сист.}} = \sum_{i=1}^n \Delta_i - \Delta_{\text{б.н.}}, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{б.н.}}$ – собственное рассеивание боеприпаса, а Δ_i – значение i-ой ошибки выстрела.

При этом введем два допущения:

1) ствол пушки новый, ошибка технической подготовки пушки $\Delta_n = 0$;

2) ошибка наведения пушки в момент выстрела $\Delta_n = 0$.

Отсюда следует, что величина отклонения точек попадания характеризуется точностью технической подготовки исходных установок выстрела и погрешностью системы "пушка – модуль – корпус – подвеска" при выстреле.

Определение отклонений системы "боевой модуль – корпус – подвеска" при стрельбе 30 мм автоматической пушки в составе модуля вооружения. Как известно, зазоры в сопряжениях деталей пушки оказывают влияние как на единичные показатели системы "снаряд пушка", так и на ошибки стрельбы [6]. Первоначальный анализ результатов позволяет предположить важную роль величины деформаций и зазоров в узлах сопрягаемых деталей системы "пушка – модуль – корпус – подвеска" при стрельбе очередью. Для более детальных выводов и разработки рекомендаций для обеспечения точности стрельбы необходимо провести исследование величины отклонений ствола пушки и корпуса машины при стрельбе в разных режимах. Таким образом, одной из задач экспериментальных исследований является определение отклонений корпуса и ствола пушки по углу вертикальной и горизонтальной наводки при стрельбе.

В результате проведенных исследований были получены графики угловых отклонений корпуса и ствола пушки от исходного положения при стрельбе.

Проведенные исследования дают основания для таких выводов.

1. В результате экспериментальных исследований были определены вертикальная и горизонтальная координаты центра масс изделия БТР-3Е. Определены характеристики точности стрельбы.

2. В результате проведенных исследований были получены графики угловых отклонений корпуса и ствола пушки от исходного положения при стрельбе в разных режимах.

3. Во время стрельбовых испытаний была проведена работа приводов ручного наведения модуля вооружения по горизонту и пушки по вертикали.

4. Получена зависимость, позволяющая определить величину суммарного допуска при установке сопрягаемых деталей модуля вооружения, обеспечивающего гарантированное попадание по бронецелям броневой снарядом.

Математическое и численное моделирование отклонения оси канала ствола артиллерийской системы при производстве выстрелов. На основе анализа экспериментальных исследований создана база для верификации более сложной, однако более адекватной и точной математической и численной модели системы "боевой модуль–бронекорпус–подвеска" легкобронированной боевой машины типа БТР-3Е.

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 [21–24] были предложены подходы к построению математических моделей для исследования возникающих динамических процессов. Вместе с тем в этих работах не учитывается ряд значимых факторов, оказывающих влияние на моделируемый процесс. В частности, отдельно рассматриваются инерционно-жесткостные свойства бронекорпуса, подвески и шин. В то же время требования адекватности, точности и достоверности требуют применения более подробной детализации создаваемых моделей.

Целью исследований, описанных ниже, 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 [21, 25], однако в более общей постановке.

Для реализации этих возможностей в работе представлены новый подход к построению моделей, сами аналитические модели, их численная реализация в виде программно-модельного комплекса, а также результаты компьютерного моделирования протекающих динамических процессов в динамической системе "боевой модуль–бронекорпус–подвеска" на примере бронетранспортера БТР-3Е с некоторыми модельными характеристиками.

Математическая модель динамических процессов в системе "боевой модуль – корпус – подвеска". Согласно предложенному в работах [26, 27] подходу, боевой модуль и корпус ранее рассматривались как набор жестких тел, соединенных упругими связями. Таким образом, жесткостные и инерционные свойства системы разделяются: инерционные привязываются к центрам масс элементов, а жесткостные характеристики связывают эти массы. В то же время реальные машиностроительные конструкции являются системами с распределенными инерционно-жесткостными характеристиками. Это же относится, например, и к бронекорпусам. Естественно, что при этом описание динамических процессов в общем виде сводится к дифференциальным уравнениям в частных производных [25, 28]. В

то же время это связано с лавинообразным возрастанием требуемых вычислительных ресурсов. В связи с этим требуется создание менее громоздких моделей. При этом, естественно, может происходить уменьшение степени адекватности этой модели, а значит, и возрастание несоответствия получаемых результатов реальным динамическим процессам. Таким образом, на крайних полюсах шкалы "адекватность – громоздкость" располагаются либо адекватные, но неприемлемо громоздкие модели, либо простые, но недопустимо искаженные. Сбалансированные модели находятся в средней части указанного диапазона. Проблема состоит в двух аспектах:

1) способе построения математической модели исследуемого процесса;

2) обосновании требуемого уровня детализации.

Далее описан новый подход к решению этих задач.

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 степеней свободы, а также в последующем подсоединении к ней дискретной части. Образуемая таким образом дискретная система с N степенями свободы может быть описана, например, с использованием дифференциальных уравнений Лагранжа II рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{X}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial X_i} = Q_i, \quad (5)$$

где X_i – обобщенные координаты с числом степеней свободы $i = 1 \div N$, а Q_i – соответствующие обобщенные силы $i = 1 \div N$.

Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений описывает возмущенное ее движение. При этом важно заметить, что поскольку исследуемый объект характеризуется некоторым набором проектных, технологических параметров и режимов боевого применения, которые в общем случае являются варьируемыми, то их совокупность можно описать некоторым множеством обобщенных параметров $p = \{p_s, (s = 1 \div N)\}$.

Тогда исходное уравнение примет вид:

$$M(p)\ddot{X} + K(p)\dot{X} + C(p)X = F(p, t), \quad (6)$$

где M, K, C – матрицы масс, демпфирования и жесткости, а $F(p, t)$ – массив внешних нагрузок.

Таким образом, интегрирование этих уравнений дает параметрическое семейство решений:

$$X = X(p, t). \quad (7)$$

В этих соотношениях присутствует (в общем случае неявная) связь решения X с параметрами p . При этом из анализа временного распределения $X(p)$ можно сформировать ту или иную компоненту ТТХ. В данном случае речь идет об отклонении снаряда на экране (мишени) от номинального положения O (рис. 6). На конечное смещение точки попадания снаряда оказывают влияние трансляционная (U) и ротационная (φ) компоненты (рис. 6), L – расстояние до цели (в данном случае до экрана-мишени),

$$\mathbf{h} = \{h_x, h_y\}^T. \tag{8}$$

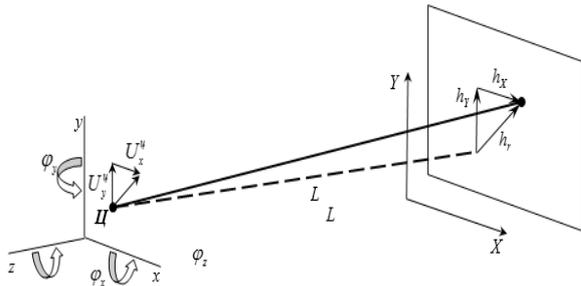


Рис. 6 – К вопросу об отклонении снаряда от номинального направления на цель

Здесь (см. рис. 6):

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_2, \quad h = \sqrt{h_x^2 + h_y^2}; \tag{9}$$

$$h_x = U_x^u + \varphi_y \cdot L, \quad h_y = U_y^u + \varphi_x \cdot L. \tag{10}$$

Таким образом, соотношения (5)–(10) задают параметрические зависимости отклонений h, h_x, h_y от обобщенных параметров p .

Важно подчеркнуть, что получаемые параметрические зависимости получаются как результат анализа временных распределений $X(p)$. При этом характеристики этих временных зависимостей достаточно сильно зависят от собственных частот колебаний (СЧК) $\omega_k, k = 1..n$, и частот возмущений ω_i^* . В связи с этим требуется определить эти собственные частоты. При малом вязком трении собственные колебания

$$\hat{X}_i = \lambda_i \sin \omega_i t, \tag{11}$$

удовлетворяют с высокой степенью точности (с точки зрения соответствия частотных характеристик) уравнениям свободных колебаний

$$M(p)\ddot{X} + C(p)X = 0. \tag{12}$$

Отсюда для определения собственных форм колебаний (СФК) $\lambda = \{\lambda_i\}^T$ справедливы уравнения:

$$(C(p) - \omega^2 M(p))\lambda = 0; \tag{13}$$

$$\text{Det}(C(p) - \omega^2 M(p)) = 0. \tag{14}$$

Из соотношений (13), (14) следуют параметрические зависимости собственных форм и собственных частот от параметров p :

$$\lambda_i = \lambda_i(p), \quad \omega_i = \omega_i(p). \tag{15}$$

Из анализа собственных форм и собственных частот в сопоставлении с вектором нагрузок F и спектром частот его компонент ω_e^* можно делать выводы о близости к резонансным режимам и о возбудимости тех или иных собственных форм колебаний.

При этом нужно подчеркнуть, что исследуемая динамическая система состоит из структурных подсистем: бронекорпус, боевой модуль и подвеска, каждая из которых вносит определенный вклад в формирование спектра собственных частот и соответствующих собственных форм. Последовательным ужесточением тех или иных компонент этот вклад можно проявить, не забывая, что эти "парциальные" свойства не складываются механически, а взаимовлияют друг на друга по сложным соотношениям (13), (14).

Кроме задач анализа динамических процессов, представляют интерес еще две задачи:

- 1) расчетно-экспериментальная идентификация параметров численных моделей данных процессов;
- 2) оптимизация параметров динамической системы.

Что касается первой задачи, то следует отметить, что реальная динамическая система при численном моделировании описывается параметрами p_N (является как бы "проекциями" параметров p на численную модель, формируя своеобразную "интерференционную" картину). В свою очередь, экспериментальная модель описывается параметрами p_E . Предполагается следующий критерий верификации:

$$p_N^* : I(h_N - h_E) \rightarrow \min, \tag{16}$$

где h_N, h_E – численно и экспериментально определенные значения отклонения h (см. рис. 6).

Здесь функционал I может, например, принимать вид (для некоторого количества точек попадания N_b):

$$I_1 = \sum_{q=1}^{N_b} (h_N^{(q)} - h_E^{(q)})^2 / a \cdot b \cdot N_b; \tag{17}$$

$$I_2 = \sum_{q=1}^{N_b} (h_{NX}^{(q)} - h_{EX}^{(q)})^2 / a^2 \cdot N_b; \tag{18}$$

$$I_3 = \sum_{q=1}^{N_b} (h_{NY}^{(q)} - h_{EY}^{(q)})^2 / b^2 \cdot N_b. \tag{19}$$

Здесь a, b – заданные нормативно допустимые отклонения точек попадания снарядов для заданной дистанции (коридор разброса на экране-мишени) от точки прицеливания.

Минимизация (16) дает наиболее точное (с точки зрения критериев (17)–(19) или иных) приближение временных распределений обобщенных координат к действительным, наблюдаемым в реальном объекте.

Определенные на этом этапе параметры служат в качестве констант P_{const} при решении второй из упомянутых задач. Речь идет о минимизации некоторых характеристик (в нашем случае – h, h_x, h_y) при варьировании отдельных параметров (жесткости, вязкости, масс, толщин бронелистов и т.п.)

$$P_{var}^* : I = \sum_{q=1}^{N_B} h_{Ni}^2(P_{const}, P_{var}) / a \cdot b \cdot N_b \rightarrow \min. \quad (20)$$

Таким образом, решены следующие новые задачи:

- 1) разработан новый общий подход к исследованию влияния на точность стрельбы параметров исследуемой системы "корпус – боевой модуль – подвеска";
- 2) разработаны параметрические модели динамической системы, что дает возможность проводить исследование влияния отдельных параметров на компоненты ТТХ, в частности, на отклонение снарядов от номинального направления за счет деформирования и смещения бронекорпуса, боевого модуля и подвески;
- 3) разработан расчетно-экспериментальный метод верификации и частные критерии для его осуществления.

Данный подход является методологической базой последующих исследований по улучшению точности стрельбы из перспективных ЛБМ.

Компьютерные модели исследуемой динамической 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 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.

На рис. 7–11 представлены иллюстрации к созданию динамических моделей для исследования влияния реактивных усилий отдачи на процессы в системе "боевой модуль – подвеска – бронекорпус" легкобронированной машины, а также результаты решения некоторых тестовых задач о реакции системы на воздействие динамических усилий. Таким образом, путем соеди-

нения предложенного подхода, реализации математической модели и привлечения профессиональных систем инженерного анализа удается оперативно провести анализ реакции системы на то или иное воздействие.

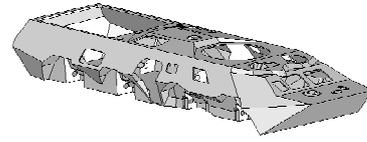


Рис. 7 – Поверхностная модель корпуса БТР

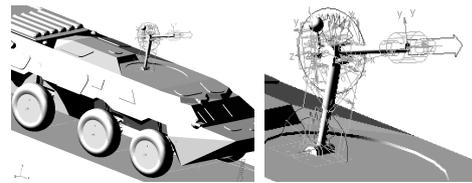


Рис. 8 – Моделирование в пакете ADAMS процессов при воздействии усилий стрельбы

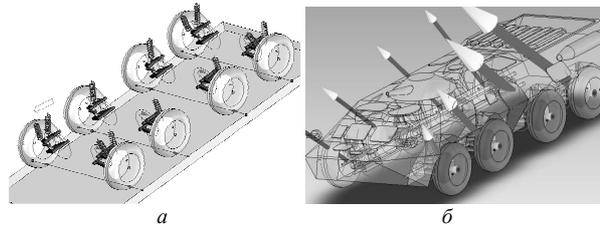


Рис. 9 – Моделирование взаимодействия: а – колес с основанием; б – визуализация реакций в элементах подвески

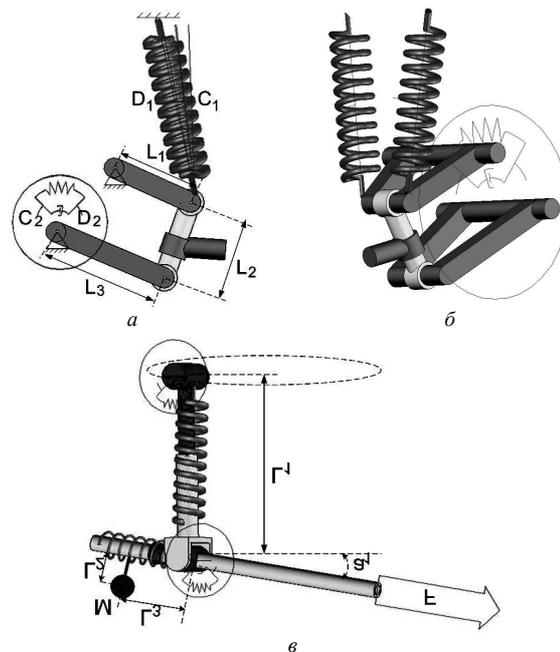


Рис. 10 – Модели узлов с заданными основными массо-инерционными и жесткостно-демпфирующими характеристиками: а, б – подвески, в – боевого модуля

Учитывая, что все основные элементы дина-

мической системы задаются в виде варьируемых параметров, то получаем возможность организовать систему многовариантных исследований. Это является ценным качеством разработанного подхода.

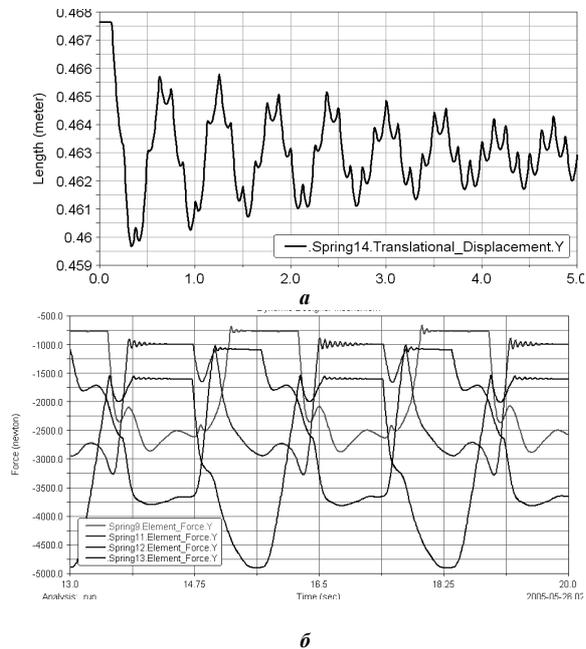


Рис. 11 – Результаты численного моделирования:
a – изменения длины амортизатора 4-й оси при стрельбе с темпом 360 выстр./мин.; *б* – реакции в элементах подвески

Численное моделирование процессов в динамической системе. В работе (см. выше) обоснована актуальность задачи об исследовании реакции системы "боевой модуль–корпус–подвеска" на воздействие реактивных усилий отдачи при стрельбе. Некоторые аспекты решаемой задачи частично отражены в работах [21, 25, 29, 30]. В то же время полного решения данная задача не получила. В связи с этим с использованием подходов, математических и численных моделей, изложенных выше, ставится цель получения качественных результатов численного моделирования на примере машины БТР-3Е.

В качестве объекта исследований был принят БТР-3Е конструкции ГП ХКБМ им. А.А. Морозова с заданием некоторых пробных характеристик элементов корпуса. Они не соответствуют реальным параметрам, однако дают возможность в целом оценивать особенности динамических процессов и тенденций их изменения для конструкций подобного типа.

Исходными данными для задания характеристик подвески созданной компьютерной модели служили результаты экспериментальных исследований определения центра масс (см. выше), а также сопутствовавших этому измерений. Ставится задача анализа реакции системы "боевой модуль–корпус–подвеска" на действие серии выстрелов.

Компьютерная модель корпуса с внутренней силовой структурой (рис. 12 *a, б*) исследуемого транспортного средства была доработана для обеспечения

массово-инерционных характеристик исходного изделия путем размещения масс, моделирующих элементы трансмиссии, двигательной установки, боевого модуля – рис. 12, *в*. На рис. 12, *г* представлена конечно-элементная модель (часть элементов скрыта).

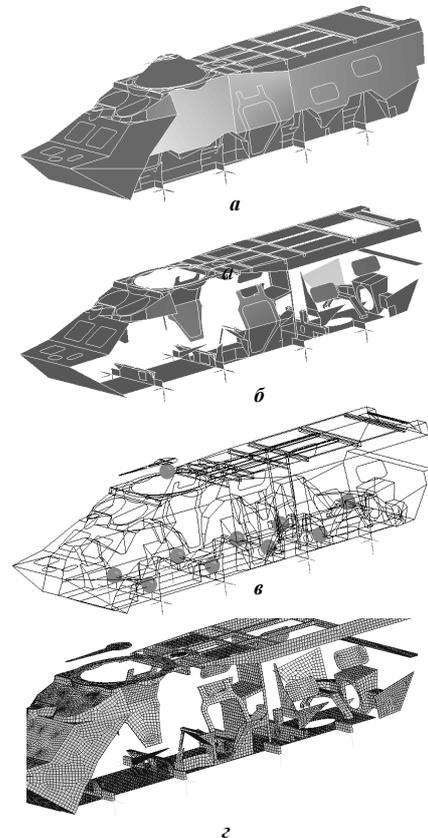


Рис. 12 – Модели исследований динамической системы "боевой модуль–корпус–подвеска" БТР-3Е:
a, б, в – геометрическая модель,
г – конечно-элементная модель

Элементы подвески моделировались специализированными конечными элементами (combin 14), описывающими упругие и демпфирующие их свойства. Расчетная модель не подразумевает моделирование неподдресоренных масс, и этот факт был учтен на этапе распределения добавочных масс (с сохранением неизменности центра масс), из которых были вычтены соответствующие неподдресоренные. После этого упругие свойства подбирались путем варьирования жесткостных свойств конечных элементов с целью удовлетворения значениям деформации подвески по экспериментальным данным.

Демпфирующие свойства оценивались путем исследования просадки корпуса исходя из дополнительного расчета, моделирующего колебания корпуса БТР-3Е во времени под действием гравитационных сил, при выведении его из положения равновесия (рис. 13 *a, б*).

Для определения продольной и поперечной составляющих жесткостных и демпфирующих свойств отсутствуют экспериментальные данные, поэтому они были назначены следующими: продольная и поперечная жесткость взята на один порядок меньше верти-

кальной, а коэффициент демпфирования – тоже на порядок меньше.

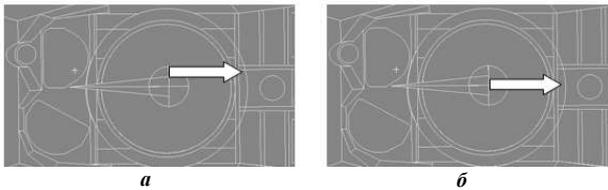


Рис. 13 – Приложение вектора силы вынуждающего воздействия относительно центра масс в направлении бортов:
а – со смещением, б – без смещения

В качестве вынуждающего воздействия выступает периодическое импульсное силовое воздействие, моделирующее серию выстрелов из пушки (с темпом стрельбы 300 выстр./мин) со следующими модельными характеристиками (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики вынуждающего воздействия

Наименование характеристики		Значение
Величина силового воздействия, Н		100 000
Длительность	импульсного силового воздействия, с	0,01
	нарастания силового воздействия, с	0,001
Период повторения, с		0,2
Количество повторений		5

Исследовалась возможная погрешность стрельбы от степени несоответствия центра масс боевого модуля его осевому положению (вследствие постепенной выработки боекомплекта, начального конструктивного несоответствия, погрешности изготовления и т.п.). Такое несоответствие центра масс боевого модуля изменяет точку приложения результирующей силы, возникающей в результате отдачи орудия, и создает дополнительный момент относительно центра масс. Это несоответствие можно смоделировать, непосредственно изменяя точку приложения силы, сместив ее на величину геометрического несоответствия. В связи с этим была построена упрощенная модель боевого модуля, позволяющая варьировать величину отклонения и новую точку приложения вынуждающего силового воздействия (рис. 13). Таким образом, сравнивались расчеты со смещением точки приложения силы – рис. 13, а, и без – рис. 13, б.

Исходя из принятых исходных данных, были получены следующие результаты численного эксперимента, представленные на рис. 14–15.

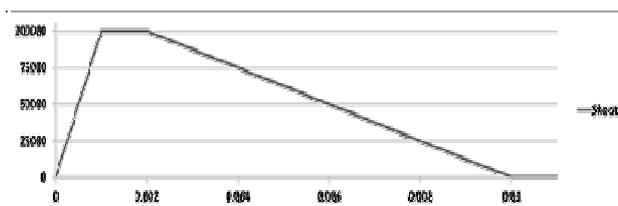


Рис. 14 – График вынуждающего силового воздействия

Поскольку элементы корпуса и внутреннего силового каркаса являются деформируемыми элементами,

то полученные графики являются следствием суперпозиции двух податливостей – податливости самого корпуса и элементов подвески.

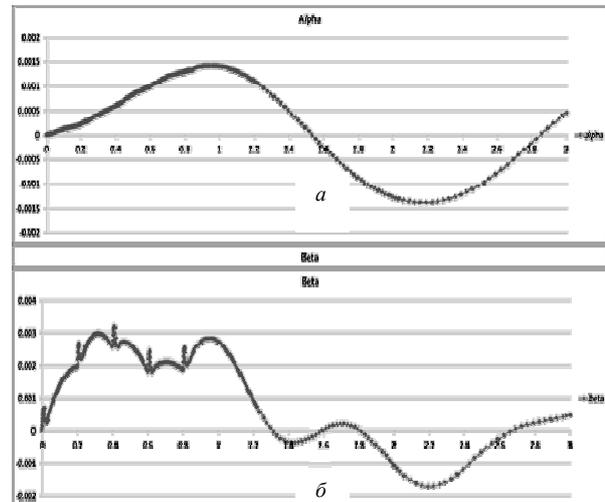
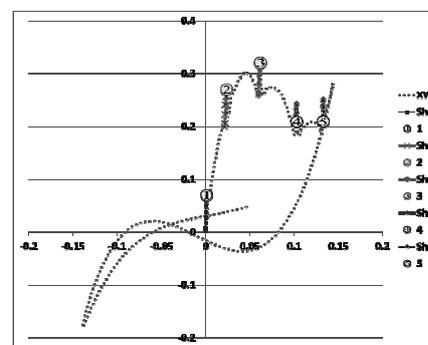
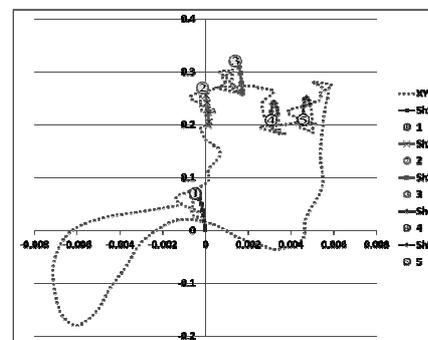


Рис. 15 – Углы отклонения канала ствола в плоскостях (положительным направлением принят поворот ствола вправо и вверх): а – горизонтальной, б – вертикальной

Для оценки вклада каждой из составляющих были проведены дополнительные расчеты – сначала с корпусом как абсолютно жестким телом на исследуемой податливой подвеске, а затем – с деформируемым корпусом с жестким закреплением в местах подсоединения элементов подвески. После этого были получены данные, представленные на рис. 16–19.



а



б

Рис. 16 – Проекция отклонения точки пересечения линии канала ствола с экраном-мишенью, расположенном на расстоянии 100м: а – со смещением ц.м, б – без смещения ц.м.

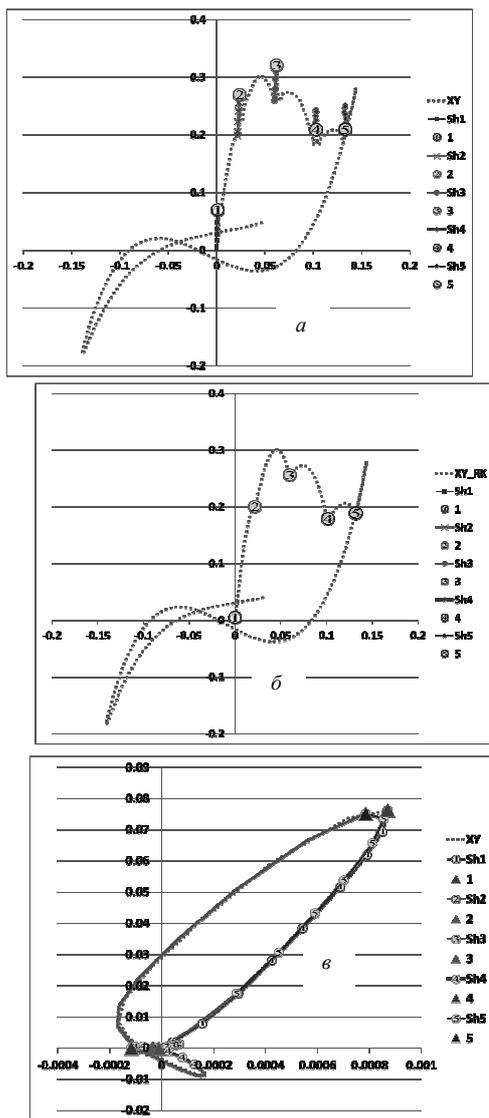


Рис. 17 – Проекция отклонения точки пересечения линии канала ствола с экраном-мишенью, расположенном на расстоянии 100м: а – полная модель, б – жесткий корпус, в – жесткая подвеска

Далее представлены результаты, аналогичные вышеописанным, но без принудительного смещения центра масс боевого модуля – рис. 20. Как видно из графиков, исследуемые эффекты являются качественно неизменными. В отклонениях все так же присутствует горизонтальное смещение для каждого последующего выстрела (хотя и довольно небольшое). Это обусловлено малым отклонением центра масс общей модели от вертикальной плоскости симметрии, которое возникло как в результате погрешностей при геометрическом моделировании, так и из-за отсутствия полной симметрии модели (как, впрочем, и в реальной конструкции).

Так, в первом варианте (var1) была увеличена жесткость корпуса, во втором варианте (var2) была ужесточена подвеска, а в третьем (var3) – компоненты, отвечающие за жесткость боевого модуля. Результаты представлены в табл. 2. Столбец (var0) характеризует

исходную модель. Для каждого варианта были получены первые 20 собственных частот (и соответствующих им форм). Табл. 2 структурирована таким образом, чтобы иметь возможность произвести сравнение соответствующих одним и тем же формам частот.

Таблица 2 – Собственные частоты при изменении жесткостных свойств каждого из компонентов системы "корпус – подвеска – боевой модуль", Гц

№ с.ч.	Var 0	Var 1	Var 2	Var 3
1	0,40275	0,40278		0,40275
2	0,42908	0,4291		0,42908
3	0,44181	0,44185		0,44181
4	1,3162	1,3175		1,3162
5	1,4208	1,4229		1,4208
6	1,5462	1,5476		1,5462
7	3,2404	3,2406	3,2366	
8	19,016		17,806	19,016
9	19,786		19,215	19,786
10	20,16		19,482	20,16
11	22,389		20,396	22,388
12	22,781		21,911	22,781
13	23,406		23,067	23,406
14	24,338		23,393	24,325
15	24,216		24,259	24,216
16	26,821		26,806	26,821
17	28,164		27,938	28,164
18	29,393		29,396	29,393
19	29,451		29,448	29,451
20	29,73		29,857	29,724
21		60,125	32,053	30,527
22		62,539		
23		63,737		
24		70,701		
25		72,039		
26		74,015		
27		76,946		
28		79,74		
29		84,816		
30		89,041		

В табл. 3 представлены формы колебаний исходной модели (var0). Из рисунка видно, что первые шесть форм собственных колебаний характеризуют подвеску, поскольку являются трансляционными относительно корпуса и его внутренних элементов. Седьмая форма характеризует крутильную жесткость узла сочленения боевого модуля с корпусом. Далее следуют частоты, характеризующие жесткостные свойства бронекорпуса и его внутренних элементов; наблюдаются как локальные, так и глобальные формы колебаний. Также отметим густоту спектра.

Анализ динамических свойств системы "боевой модуль – корпус – подвеска" ЛБМ. Для выяснения источников различных составляющих колебательных процессов потребовалось исследование спектра собственных частот и форм колебаний исследуемой динамической системы. С этой целью в ходе проведения численного исследования системы "боевой модуль – корпус – подвеска" были определены собственные час-

тоты и формы колебаний (для рабочей исследуемой модели с определенными упрощениями и допущениями). Кроме непосредственного определения самих значений частот и форм, была дополнительно исследована

возможность изменения собственных значений в результате взаимовлияния характеристик каждой из компонент системы – корпуса, подвески, боевого модуля.

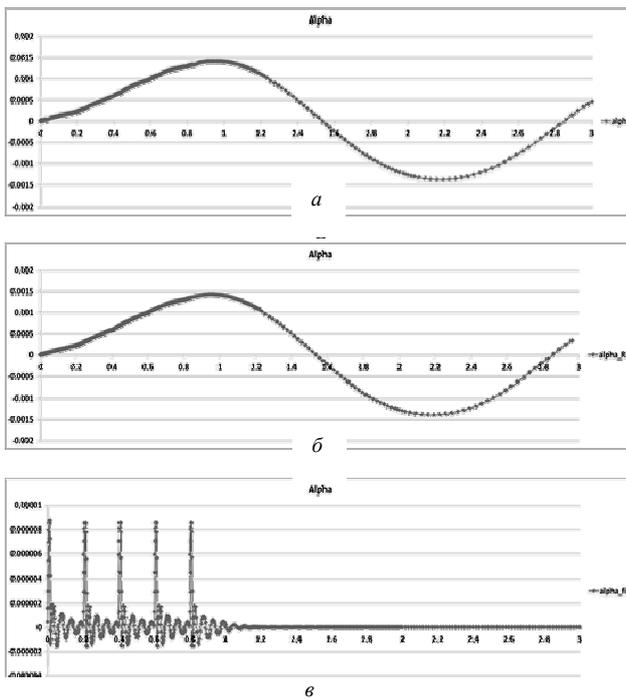


Рис. 17 – Угол отклонения канала ствола в горизонтальной плоскости:

a – полная модель, b – жесткий корпус, c – жесткая подвеска

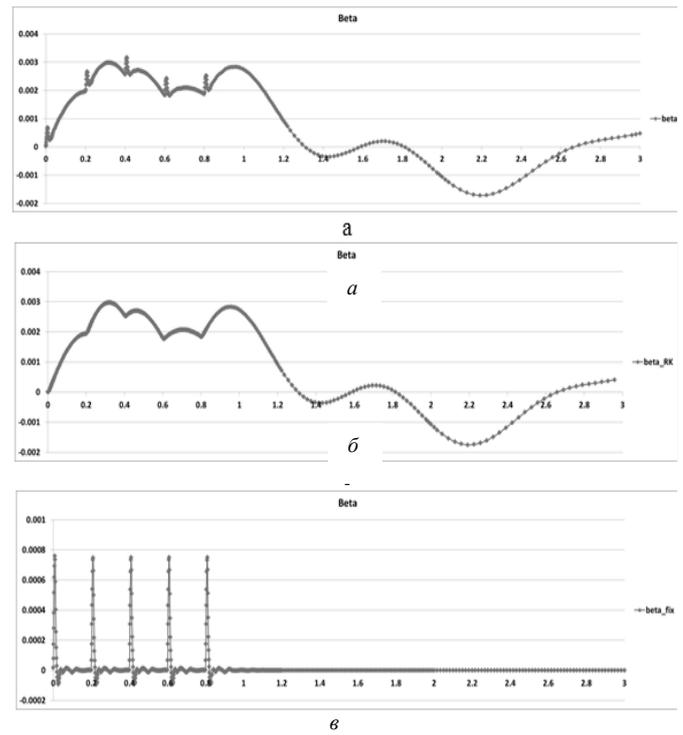


Рис. 19 – Угол отклонения канала ствола в вертикальной плоскости:

a – полная модель, b – жесткий корпус, c – жесткая подвеска

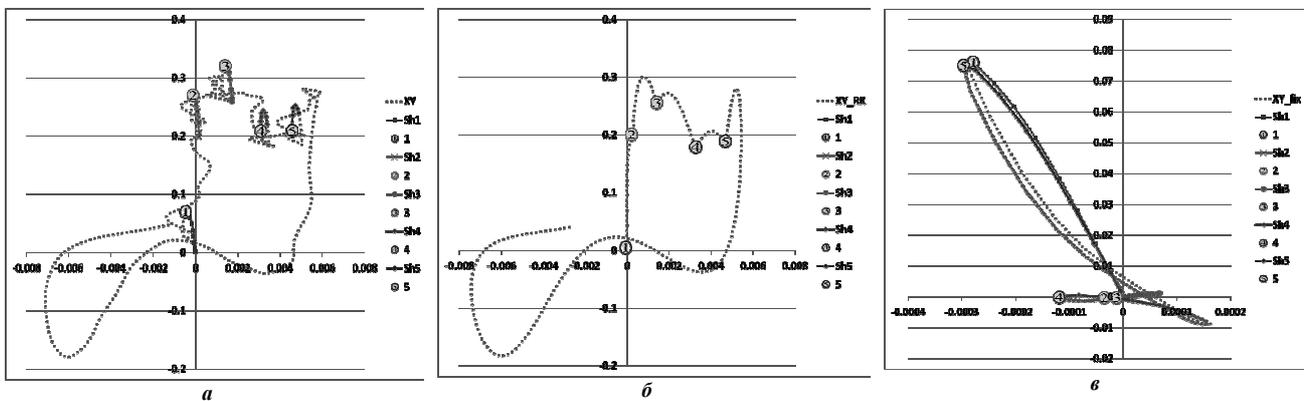


Рис. 20 – Проекция отклонения точки пересечения линии канала ствола с экраном-мишенью, расположенном на расстоянии 100 м: a – полная модель, b – жесткий корпус, c – жесткая подвеска (без смещения центра масс боевого модуля)

Далее исследовано поведение и возможность "миграции" собственных частот и форм колебаний. С этой целью проварьировано изменение жесткостных характеристик компонент системы "корпус – подвеска – боевой модуль" по отдельности. Так, в результате ужесточения корпуса, частоты, связанные с деформацией самого корпуса, выросли приблизительно втрое; при ужесточении подвески – "пропали" первые 6 трансляционных частот из исходного списка; при добавлении жесткости боевому модулю также "выпала" одна из исходного набора собственных частот.

Таким образом, из анализа табл. 2 можно выде-

лить частоты, присущие тому или иному компоненту, причем если подвеска характеризуется "единицами" герц, а корпус – "десятками" герц, то собственные частоты боевого модуля оказываются тесно переплетены как с частотами подвески, так и корпуса. В данном случае крутильная жесткость близка к значениям частот подвески – что непосредственно указывает на необходимость учета характеристик подвески при всестороннем исследовании точности стрельбы, особенно стрельбы очередью.

Далее был проанализирован количественный и качественный эффект от подобного изменения локаль-

них жесткостей. Так, табл. 4 демонстрирует отношение значений собственных частот каждого из вариантов к исходному. Видно, что при локальном ужесточении

корпуса частоты подвески (с 1-й по 6-ю) и боевого модуля (7-я) немного выросли по сравнению с исходным вариантом.

Таблица 3 – Частоты и соответствующие им формы колебаний исходной динамической системы "корпус–подвеска–боевой модуль"

№ частоты	Значение СЧК, Гц	Собственная форма колебаний	№ частоты	Значение СЧК, Гц	Собственная форма колебаний
1	0,40275		2	0,42908	
3	0,44181		4	1,3162	
5	1,4208		6	1,5462	
7	3,2404		8	19,016	
9	19,786		10	20,16	
11	22,389		12	22,781	
13	23,406		14	24,338	
15	24,216		16	26,821	
17	28,164		18	29,393	

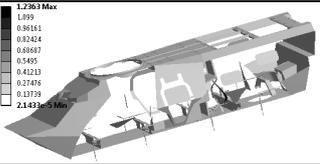
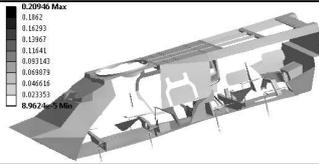
№ частоты	Значение СЧК, Гц	Собственная форма колебаний	№ частоты	Значение СЧК, Гц	Собственная форма колебаний
19	29,451		20	29,73	

Таблица 4 – Собственные частоты при изменения жесткостных свойств каждого из компонентов системы "корпус – подвеска – боевой модуль", отнесенные к исходному варианту

N с.ч.	Var 1	Var 2	Var 3
1	1,000074		1
2	1,000047		1
3	1,000091		1
4	1,000988		1
5	1,001478		1
6	1,000905		1
7	1,000062	0,998827	
8		0,936369	1
9		0,971141	1
10		0,966369	1
11		0,910983	0,999955
12		0,96181	1
13		0,985517	1
14		0,961254	0,999466
15		1,001705	1
16		0,999441	1
17		0,991976	1
18		1,000102	1
19		0,999898	1
20		1,004272	0,999798

В случае ужесточения подвески наблюдаем картину в основном небольшого снижения значений собственных частот, однако имеются и несколько, значения которых увеличились (номера 15, 18, 20). В третьем случае (ужесточение компонент боевого модуля) наблюдаем картину локальных изменений некоторых собственных значений – своеобразных всплесков (номера 11, 14, 20).

Очевидно, что изменение "локальных" компонент системы "боевой модуль – корпус – подвеска" приводит не только к перераспределению спектра собственных значений (резкому изменению), но и слабому изменению стабильных "устойчивых" частот. В процентном выражении результаты представлены в табл. 5. Из таблицы видно, что наибольшее изменение (искажение) собственного значения наблюдается для случая ужесточения подвески (частота № 11) и составляет 9% в сторону уменьшения. Довольно существенны и изменения других частот 8, 9, 10, 12, 14 – 6%, 2%, 3%, 4% и 4% соответственно (соответствующие им формы приведены выше – см. табл. 3).

Не менее интересен (несмотря на сравнительно небольшие численные значения) случай изменения (искажения), возникающего в результате усиления только лишь крутильной жесткости боевого модуля – наблюдаются локальные всплески-искажения на фоне

ряда абсолютно неизменных собственных значений из исходного набора. В данном случае демонстрируется проблема взаимосвязанности и взаимовлияния отдельных локальных компонент жесткости на общую картину поведения динамической системы в целом, что подчеркивает необходимость исследования исходной модели транспортного средства специального назначения именно как совокупной системы "корпус – подвеска – боевой модуль".

Таблица 5 – Собственные частоты при изменения жесткостных свойств каждого из компонентов системы "корпус – подвеска – боевой модуль", отнесенные к исходному варианту (в процентном выражении)

N с.ч.	Var 1	Var 2	Var 3
1	0,007449		0
2	0,004661		0
3	0,009054		0
4	0,098769		0
5	0,0147804		0
6	0,090545		0
7	0,006172	-0,11727	
8		-6,36306	0
9		-2,88588	0
10		-3,3631	0
11		-8,90169	-0,00447
12		-3,81897	0
13		-1,44835	0
14		-3,8746	-0,05341
15		0,170527	0
16		-0,05593	0
17		-0,80244	0
18		0,010207	0
19		-0,01019	0
20		0,427178	-0,02018

Таким образом, решен ряд новых задач и получены следующие новые научно-практические результаты.

1. Из анализа представленных результатов можно заключить, что по отношению к традиционным представленный подход имеет целый ряд преимуществ. Так, традиционный подход предполагает проведение предварительного этапа составления моделей согласно тому или иному известному 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 тому предложенный подход достаточно оперативно позволяет генерировать и модели, и разрешающие уравнения. В то же время его основная часть действует по принципу "черного ящи-

ка": на входе – исходные данные, на выходе – конечно-элементные модели. При этом для вмешательства в процесс моделирования остается ограниченный инструментарий. Это – потенциальный недостаток данного подхода.

2. Решение ряда тестовых задач продемонстрировало работоспособность предложенной технологии.

3. Разработанный подход распространен 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.

4. Решение поставленной модельной задачи подтвердило работоспособность созданного специализированного программно-модельного комплекса. Он предоставляет возможность оценивать влияние упругих деформаций элементов транспортных средств специального назначения на возмущения направления оси канала ствола пушки в процессе осуществления выстрелов. Т.о., создан "виртуальный" стенд для параметрического анализа и синтеза проектных решений элементов боевых машин по критерию минимизации воз-

мущений, возникающих вследствие отклонения стрельбы от номинального за счет упругого деформирования системы "боевой модуль – корпус – подвеска". Далее созданные модели были применены к исследованиям процессов в реальном бронетранспортере БТР-3Е с целью разработки рекомендаций по улучшению точности стрельбы из боевого модуля.

5. Установлены характерные особенности динамических процессов, возникающих в системе "боевой модуль – корпус – подвеска", а также свойства спектра собственных частот и форм колебаний. Основным выводом из установленных закономерностей является необходимость исследования динамических процессов на полной и связанной модели исследуемой системы, а не на частных и изолированных подсистемах.

6. На основе проведенных численных исследований, согласованных с результатами экспериментальных исследований, разработаны рекомендации по повышению точности стрельбы из боевого модуля "Штурм" БТР-3Е (рис. 21).



Рис. 21 – Методика прогнозирования изменения точности стрельбы в зависимости от числа выстрелов в очереди

Заключение. В работе решена научная задача обеспечения точности стрельбы из МАП, которой вооружены боевые модули современных боевых бронированных колесных машин легкой категории по массе, путем разработки математических моделей реакции динамической

системы "боевой модуль – корпус – подвеска" на действие усилий отдачи при стрельбе и обоснования ее параметров по результатам численных и экспериментальных исследований.

Решены следующие задачи исследований:

1. Анализ существующих методов обеспечения точности стрельбы из МАП дал основание для выводов об их недостаточном развитии, что определило цель, задачи и направление исследований по совершенствованию применяемых моделей и методов.

2. Разработана методика определения и обеспечения выполнения исходных данных ведения стрельбы как с места, так и с ходу за счет уменьшения влияния суммарных ошибок на точность стрельбы.

3. Усовершенствована математическая модель динамической системы "боевой модуль – корпус – подвеска" как системы с расширенными параметрами и проведен комплекс численных исследований.

4. Разработаны рекомендации по увеличению точности стрельбы из МАП, которыми оснащаются колесная бронетехника легкой категории.

Получены следующие новые результаты:

1. Получила дальнейшее развитие динамическая модель механической системы "боевой модуль – корпус – подвеска" при стрельбе с места и в движении.

2. Разработана методология, проведены экспериментальные исследования и проведен анализ результатов по оценке точности стрельбы из малокалиберных пушек по мишени.

3. Усовершенствована математическая модель динамической модели "боевой модуль – корпус – подвеска", отличающаяся тем, что на единой методологической основе объединены такие компоненты как боевой модуль, упруго деформируемый бронекорпус и подвеска. С ее помощью установлено влияние параметров системы на точность стрельбы.

4. Разработаны рекомендации по обоснованию параметров динамической системы по критерию повышения точности стрельбы.

Разработанная динамическая модель механической системы "боевой модуль – корпус – подвеска" при стрельбе позволяет прогнозировать изменение характеристик точности стрельбы МАП, установленной в модуле вооружения модернизируемого БТР, в зависимости от величины колебаний ствола пушки, вызванных откатом выстрела и колебаниями корпуса машины.

Определено максимальное количество выстрелов в очереди, не допускающее возникновение резонанса по амплитуде колебаний и биений механической системы.

На основе проведенных исследований обосновано требование по величине максимального зазора и деформаций в узлах сопрягаемых деталей системы наведения и стабилизации МАП, установленной в модуле вооружения БТР, по обеспечению заданной точности стрельбы, с соответствующей коррекцией дальности стрельбы.

В целом, теоретические результаты и данные экспериментальных исследований, полученные в работе, могут быть положены в основу для перехода на исследование точности стрельбы различных колесных боевых машин легкой категории по массе с учетом их конструктивных особенностей.

Список литературы

1. Фендриков Н. М. *Методы расчета боевой эффективности вооружения*. М.: Воениздат, 1971. 224 с.
2. Суворов С. *МТ-ЛБ* Служба продолжается. *Техника и воору-*

3. *жение*. 2005. №5. С. 21–24.
4. Федосеев С. Л. *Боевые машины пехоты: Иллюстрированный справочник*. М.: ООО Издательство Астрель, 2001. 352 с.
5. Пастернак Б. БМП: о путях развития и совершенствования. *Техника и вооружение*. 2004. №4. С. 11–15.
6. Федосеев С. Приверженность к легкому классу. *Техника и вооружение*. 2004. №4. С. 41–44.
7. Скурский С. П., Скурский П. П. Перспективные программы по разработке боевых машин для армии США. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – Киев, НТЦ АСВ, 2001. №4. С. 64–69.
8. Комнацкий А. Л., Баранчук В. И., Гречко В. В. Модернизация боевой легкобронированной техники. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. – Киев, НТЦ АСВ, 2003. №7. С. 61–64.
9. Борисюк М. Д., Климов В. Ф., Анишко О. Б. и др. Модернизация и развитие легкобронированных машин с учетом критерия "стоимость–эффективность". *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2003. №2. С. 101–104.
10. Бусяк Ю. М., Ткачук Н. А., Васильев А. Ю. [и др.] Общие подходы к оценке и обеспечению защищенности бронекорпусов легких по массе машин. *Интеграція технологій та енергозбереження*. 2014. №3. С. 154–163.
11. Рикун О. Н. Требования к перспективным образцам бронетехники легкой категории. *Вісник міжнародного слов'янського університету*. 2008. №2. С. 28–31.
12. О'Мэлли Т. Д. *Современная артиллерия: орудия, РСЗО, минометы*. М.: Издательство ЭКСМО-Пресс, 2000. 162 с.
13. Чобиток В. Основы теории и история развития компоновки танка. *Техника и вооружение*. 2004. №4. С. 37–40.
14. Никитина Т. Б. Многокритериальный синтез системы наведения и стабилизации вооружения легкобронированной машины. *Вестник НТУ "ХПИ". Тем. вып.: Автоматика и приборостроение*. 2008. № 31. С. 128–138.
15. Олянич Б. О., Чайковский Р. И., Бондарук А. Б. Застосування мікроіроскопів у стабілізаторах основного озброєння легкоброньованої техніки. *Механіка та машинобудування*. 2007. №2. С. 87–92.
16. Пономарев Е. П., Васильев А. Ю. К вопросу о проведении многовариантного анализа напряженно-деформированного состояния корпуса МТ-ЛБ. *Механіка та машинобудування*. 2005. №1. С. 289–294.
17. Васильев А. Ю. К вопросу о деформировании корпусов транспортных средств при действии ударных нагрузок. *Вестник НТУ "ХПИ"*. 2005. № 47. С. 42–50.
18. Владыко В. С., Марюха В. В. *Основы оценки эффективности стрельбы из стрелкового оружия по наземным целям*. Хмельницкий: Изд-во АПВУ им. Б.Хмельницкого, 1997. 50 с.
19. Павленко А. В., Силаков И. А., Орло В. Н. Повышение эффективности стрельбы зенитных артиллерийских комплексов путем искусственного рассеивания снарядов. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. Киев, НТЦ АСВ, 1999. №11. С. 54–60.
20. Жуков В. Н. *Оружие авиации*. М.: Воениздат, 1959. 136 с.
21. Мальцев П. М., Емельянова Н. А. *Основы научных исследований*. Киев: Вища школа, 1982. – 190с.
22. Бруль С. Т., Ткачук Н. А., Васильев А. Ю. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты. *Механіка машинобудування*. 2011. №1. С. 66–73.
23. Ткачук Н. А., Гриценко Г. Д., Чепурной А. Д. [и др.] Конечнo-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ "ХПИ", 2006. Т. 1. С. 57–79.
24. Мельник Б. А. К вопросу о влиянии поперечно-угловых колебаний корпуса легкобронированных колесных машин на точность стрельбы. *Механіка та машинобудування*. 2012. № 2. С. 118–121.
25. Толстолуцкий В. А. *Математическое моделирование и анализ процессов в шасси колесных и гусеничных машин; под ред. Д. О. Волонцевича*. Харьков: НТУ "ХПИ", 2013. 171 с.
26. Мельник Б. А., Малакей А. Н., Танченко А. Ю., Кохановская О. В. Математическое и численное моделирование динамических процессов в элементах легкобронированных боевых ма-

- шин. *Вестник НТУ "ХПИ"*. 2013. № 1(975). С. 93–117.
26. Анипко О. Б., Рикунув О. М. Модель поражения цели с заданной вероятностью автоматической пушкой 2А42. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2007. № 2. С. 78–83.
 27. Анипко О. Б., Рикунув О. Н. Решение задачи определения параметров гармонических колебаний системы "ствол – корпус – подвеска" с помощью разложения в ряд Фурье. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2009. № 2. С. 30–37.
 28. Ткачук Н. А., Мартыненко А. В., Васильев А. Ю., Грабовский А. В. Анализ динамических процессов и напряженно-деформированного состояния артиллерийских стволов. *Вестник НТУ "ХПИ"*. 2013. № 1. С. 147–153.
 29. Ткачук Н. А. и др. Влияние массовоэнергетических характеристик боевого модуля, бронекорпуса и подвески на динамические процессы при осуществлении стрельбы. *Механіка та машинобудування*. 2014. №1. С. 83–92.
 30. Рикунув О. Н. и др. Специализированные программно-модельные комплексы для анализа динамических процессов. *Механіка та машинобудування*. Харків, 2014. №1. С. 123–128.

References (transliterated)

1. Fendrikov N. M., Yakovlev V. I. *Metody rascheta boevoy ehffektivnosti vooruzheniya* [Methods of calculating the combat effectiveness of weapons]. Moscow, Voenizdat, 1971. 224 p.
2. Suvorov S. MT-LB Sluzhba prodolzhaetsya [MT-LB. Service continues] *Tekhnika i vooruzhenie* [Arms and equipment]. 2005, no. 5, pp. 21–24.
3. Fedoseev S. L. *Boevye mashiny pekhoty: Illyustrirovannyi spravochnik* [Infantry fighting vehicles: Illustrated Guide]. Moscow, OOO Izdatel'stvo Astrel', 2001. 352 p.
4. Pasternak B. BMP: o putyah razvitiya i sovershenstvovaniya [BMP: about ways of development and improvement. *Tekhnika i vooruzhenie*. 2004, no. 4, pp. 11–15.
5. Fedoseev S. Priverzhennost' k legkomu klassu [Perspective program on the development of combat vehicles for the US Army] *Tekhnika i vooruzhenie*. 2004, no.4, pp. 41–44.
6. Skurskiy S. P., Skurskiy P. P. Perspektivnyye programmy po razrabotke boevykh mashin dlya armii SSHA [Perspective program on the development of combat vehicles for the US Army] *Artillerijskoe i strelkovoe vooruzhenie*. Kiev, NTC ASV, 2001, no. 4, pp. 64–69.
7. Komnackij A. L., Baranchuk V. I., Grechko V. V. Modernizatsiya boevoy legkobronirovannoy tekhniki [Modernization of fighting lightly armored vehicles] *Artillerijskoe i strelkovoe vooruzhenie*. Kiev, NTC ASV, 2003, no. 7. pp. 61–64.
8. Borisyuk M. D., Klimov V. F., Anipko, O. B i dr. Modernizatsiya i razvitie legkobronirovannykh mashin s uchetom kriteriya "stoinost'–ehffektivnost" [Modernization and development of light armored vehicles, taking into account the criterion of "cost-effectiveness] *Integrirovannye tekhnologii i ehnergoberezhenie*. Kharkov, NTU "KhPI", 2003, no. 2, pp. 101–104.
9. Busyak YU. M., Tkachuk N.A., Vasil'ev A.YU. [i dr.]. Obshchie podhody k ocenke i obespecheniyu zashchishchennosti bronekorpusov legkih po masse mashin [Common approaches to the assessment and ensure the integrity of light weight machine hulls] *Інтегровані технології та енергозбереження* Kharkov, NTU "KhPI", 2014, no.3, pp. 154–163.
10. Rikunov O. N. Trebovaniya k perspektivnym obrazcam bronetekhniki legkoj kategorii [Requirements for perspective models of armored vehicles the light category] *Visnik mizhnarodnogo slov'yans'kogo universitetu*. 2008, no. 2, pp. 28–31.
11. O'Mehlli T. D. *Sovremennaya artilleriya: orudiya, RSZO, minomety* [Modern artillery: guns, MLRS, mortars]. Moscow, Izdatel'stvo EHKSMO-Press, 2000, 162 p.
12. Chobitok V. Osnovy teorii i istoriya razvitiya komponovki tanka [Fundamentals of the theory and history of the tank layout] *Tekhnika i vooruzhenie*. 2004, no.4, pp.37–40.
13. Nikitina T. B. Mnogokriterial'nyj sintez sistemy navedeniya i stabilizatsii vooruzheniya legkobronirovannoy mashiny [Multicriteria synthesis of the guidance system and stabilizing of arms lightly armored car] *Vestnik NTU "KhPI". Tem. vyp.: Avtomatika i priborostroenie*. 2008, no. 31, pp. 128–138.
14. Oliyarnik B. O., Chaykovskiy R. I., Bondaruk A. B. Zastosuvannya mikrogiroskopiv u stabilizatorah osnovnogo ozbroennya legkobronovannoyi tehniki [The use of micro gyro stabilizers in lightly armored vehicles main armament] *Mehanika ta mashinobuduvannya..* 2007, no. 2, pp. 87–92.
15. Ponomarev E. P., Vasilev A. Yu. K voprosu o provedenii mnogovariantnogo analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korpusa MT-LBc [On the question of carrying out a multivariate analysis of stress-strain state of the MT-LB corps] *Mehanika ta mashinobuduvannya*. Kharkov, NTU "KhPI", 2005, no. 1, pp. 289–294.
16. Vasilev A. Yu. K voprosu o deformirovani korpusov transportnykh sredstv pri deystvii udarnykh nagruzok [On the question of deforming the vehicle body by the action of impact loads] *Vestnik NTU "KhPI"*. 2005, no. 47, pp. 42–50.
17. Vladyko V. S., Maryuha V. V. *Osnovni otsenki effektivnosti strelby iz strelkovogo oruzhiya po nazemnyim tselyam* [Basis of effectiveness measurement of fire from small arms on ground targets]. Hmel'nitskiy: Izdatelstvo APVU im. B.Hmel'nitskogo, 1997, 50 p.
18. Pavlenko A. V., Silakov I. A., Orlo V. N. Povyishenie effektivnosti strelby zenitnykh artillerijskikh kompleksov putem iskusstvennogo rasseivaniya snaryadov. *Artillerijskoe i strelkovoe vooruzhenie*. Kiev, NTTs ASV, 1999, no. 11, pp. 54–60.
19. Zhukov V. N. *Oruzhie aviatsii* [Aviation Weapons]. Moscow: Voenizdat, 1959. 136 p.
20. Maltsev P. M., Emelyanova N. A. *Osnovni nauchnykh issledovaniy*. Kiev.: Vischa shkola, 1982, 190 p.
21. Brul S. T., Tkachuk N. A., Vasilev A. Yu., Karapeychik I. N. Modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh protsessov v korpusah legkobronirovannykh mashin: podhody, modeli, efekty [Modelling of physical and mechanical processes in buildings light armored vehicles: approaches, models, effects]. *Mehanika i mashinostroenie*. Kharkov, NTU "KhPI", 2011, no. 1, pp. 66–73.
22. Tkachuk N. A., Gritsenko G. D., Chepurinov A. D. i dr. Konechno-elementnyye modeli elementov slozhnykh mekhanicheskikh sistem: tekhnologiya avtomatizirovannoy generatsii i parametrizovannogo opisaniya [Finite element models of complex mechanical systems elements: technology of automated generation and parameterized descriptions] *Mehanika ta mashinobuduvannya*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2006, vol. 1, pp. 57–79.
23. Melnik B. A. K voprosu o vliyani poperechno-uglovyykh kolebaniy korpusa legkobronirovannykh kolesnykh mashin na tochnost strelby [On the effect of the transverse angular oscillation body lightly armored wheeled vehicles on shooting accuracy] *Mehanika ta mashinobuduvannya*. 2012, no. 2, pp. 118–121.
24. Tolstolutskiy V. A., Volontsevich D. O. *Matematicheskoe modelirovanie i analiz protsessov v shassi kolesnykh i gusenichnykh mashin* [Mathematical modeling and analysis of processes in a chassis of wheeled and tracked vehicles]. Kharkov, NTU "KhPI", 2013. 171 p.
25. Melnik B. A., Malakey A. N., Tanchenko A. Yu., Kohanovskaya O. V. Matematicheskoe i chislennoe modelirovanie dinamicheskikh protsessov v elementah legkobronirovannykh boevykh mashin [Mathematical and numerical modeling of dynamic processes in the elements of light armored combat vehicles] *Vestnik NTU "KhPI"*. Kharkov, NTU "KhPI", 2013, no. 1(975) pp, 93–117.
26. Anipko O. B., Rikunov O. M. Model porazheniya tseli s zadannoy veroyatnostyu avtomaticheskoy pushkoy 2A42 [Model hit a target with a given probability automatic cannon 2A42]. *Integrirovannye tekhnologii i energoberezhenie*. Kharkov, NTU "KhPI". 2007, no. 2, pp. 78–83.
27. Anipko O. B., Rikunov O. N. Reshenie zadachi opredeleniya parametrov garmonicheskikh kolebaniy sistemiy "stvol – korpus – podveska" s pomoschyu razlozheniya v ryad Fure [Solution of the problem of determining the parameters of harmonic oscillations "trunk–body–suspension" system with the help of Fourier series] *Інтегровані технології та енергозбереження*. Kharkov, NTU "KhPI", 2009, no. 2, pp. 30–37.
28. Tkachuk N. A., Martynenko A. V., Vasilev A. Yu., Grabovskiy A.V. Analiz dinamicheskikh protsessov i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya artillerijskikh stvolov [Analysis of

- dynamic processes and the stress-strain state of artillery barrels] *Vestnik NTU "KhPI"*. 2013, no. 1, pp. 147–153.
29. Tkachuk N. A. et al. Vliyanie massovoenergeticheskikh harakteristik boevogo modulya, bronekorpusa i podveski na dinamicheskie protsessy pri osuschestvlenii strelby [Influence of mass and inertia characteristics of combat module, hulls and suspension on the dynamic processes in implementation of fire] *Mehanika ta mashinobuduvannya*. Kharkov, NTU "KhPI", 2014, no.1, pp. 83–92.
30. Rikunov O. N. et al. Spetsializirovannyye programmno-modelnyie kompleksy dlya analiza dinamicheskikh protsessov [Specialized software and modeling systems for analysis of dynamic processes] *Mehanika ta mashinobuduvannya*. Kharkov, NTU "KhPI". 2014, no. 1, pp. 123–128.

Поступила (received) 21.10.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рікунов Олег Миколайович (Рикунев Олег Николаевич, Rikunov Oleg) – Національна академія Національної гвардії України, викладач кафедри "Експлуатація та ремонт автомобілів та бойових машин"; м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902

Танченко Андрій Юрійович (Танченко Андрей Юрьевич, Tanchenko Andrii) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

Ткачук Микола Анатолійович (Ткачук Николай Анатольевич, Tkachuk Mykola) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>. тел.: (057)7076902; e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Лисовол Яна Миколаївна (Лисовол Яна Николаевна, Lisovol Yana) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: yana.lisovol@yandex.ru.

Грабовський Андрій Володимирович (Грабовский Андрей Владимирович, Grabovskiy Andrey) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри "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>. тел.: (057)7076166; e-mail: andrej8383@gmail.com

Васильєв Антон Юрійович (Васильев Антон Юрьевич, Vasiliev Anton) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950>. тел.: (057)7076166; e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org

Набоков Анатолій Володимирович (Набоков Анатолий Владимирович, Nabokov Anatoly) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902, e-mail: tma@tmm-sapr.org.

Малакей Андрій Миколайович (Малакей Андрей Николаевич, Malakei Andrii) – заступник генерального директора з якості ДП "Завод ім. Малишева", м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Бондаренко Марина Олександрівна (Бондаренко Марина Александровна, Bondarenko Maryna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", молодший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1856-3648>. тел.: (057)7076534; marina.bondarenko@tmm-sapr.org.

Луцьов Євген Олександрович (Луцев Евгений Александрович, Lutsyov Eugene) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", здобувач кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; м. Харків, Україна; тел. (057) 7076902, e-mail: tma@tmm-sapr.org.