

На правах рукописи

Морозов Александр Владимирович

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭВАКУАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЕННЫХ  
КОЛЕСНЫХ МАШИН НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Специальность: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

Горелов Василий Александрович  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Колесные машины» ФГБОУ ВПО МГТУ им.  
Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

Ягубов Вячеслав Фазилович  
доктор технических наук, доцент,  
ведущий эксперт АО «Рособоронэкспорт»

Лошаков Василий Иванович  
кандидат технических наук, начальник научно-технического отдела Центра оперативно-тактических исследований внутренних войск МВД России

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)

Защита состоится «27» июня 2016 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «  »    2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор

Е.Б. Сарач

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Непрерывное совершенствование боевых средств поражения противника влечет за собой необходимость обеспечения защищенности военных машин. На основе данных, представленных в открытых источниках, можно сделать вывод о существующей тенденции к увеличению числа боевых столкновений, происходящих в форме, так называемых, локальных конфликтов, в которых широкое применение получили военные колесные машины (ВКМ).

Опыт вооруженных конфликтов и антитеррористических операций последних лет показал, что ВКМ подвергаются воздействию стрелкового оружия, легкого артиллерийского вооружения и мин. Статистика современных вооруженных конфликтов свидетельствует о высоком проценте поражения техники посредством минного подрыва, потери личного состава от которого превышают 60% от общих.

Исходя из требований повышенной защищённости от воздействия мин, за рубежом был разработан и принят на вооружение новый тип ВКМ – объекты типа MRAP (Mine Resistant Ambush Protected – защищенные от подрыва и атак из засад). Широкое применение MRAP началось в Ираке в 2003 году и продолжается по сей день в зонах локальных конфликтов с участием США и стран, входящих в блок НАТО.

За последнее десятилетие в России также был проведен ряд ОКР, направленных на разработку подобного типа машин, по итогам которых созданы машины КамАЗ-63698 и Урал-63095 (Рис. 1) (проект «Тайфун»).



Рис 1. Урал-63095

Особенностью локальных конфликтов является ведение боевых действий с устройством засад и снайперским обстрелом. Со времен Второй мировой войны усиление эффекта зasadной тактики основывается на принципе обездвиживания первой и последней машин в колонне, и дальнейшем уничтожении техники.

Скорейшая эвакуация первой и последней машины позволила бы колонне, попавшей в засаду, вести бой в более выгодных условиях. Как правило, первой и последней идут самые защищённые, а, следовательно, и самые тяжелые машины. Если даже в колонне имеется однотипная машина, способная эвакуировать поврежденную тяжелую машину в обычных условиях, то это не является гарантом того, что в условиях засады под обстрелом противника такая задача будет выполнена.

Исходя из вышесказанного, было сделано предположение о важности реализации ВКМ возможности за кратчайшее время покинуть место подрыва, что позволило бы всей колонне вести бой в более выгодных условиях или оперативно покинуть зону воздействия засады противника.

Целью работы является улучшение приспособленности к эвакуации военных колесных машин за счет выбора рациональных конструктивных решений на стадии проектирования с помощью имитационного математического моделирования.

Изменения, направленные на улучшение приспособленности к эвакуации объекта, могут коснуться конструкции трансмиссии, рулевого управления, ходовой части и несущей системы, а также распределения нагрузок по осям и ряда других характеристик. Улучшение параметров, связанных с приспособленностью ВКМ к эвакуации, может вызвать кардинальные изменения показателей других свойств. Таким образом, внесение изменений в конструкцию ВКМ в целях улучшения приспособленности к эвакуации, может оказать негативное влияние на другие свойства. В связи с чем, при разработке конструкции машины, удовлетворяющей требованиям по приспособленности к эвакуации, необходимо проведение оценки влияния внесенных изменений на общую эффективность ВКМ.

Методы, позволяющие оценить влияние одних показателей на другие, носят название «Комплексных методов сравнения». Основой методов комплексного сравнения является номенклатура критериев сравнения, позволяющих всесторонне оценить сравниваемые машины. Проведенные исследования существующих номенклатур показали, что для сравнения ВКМ типа MRAP необходима разработка новой номенклатуры. Проведенный анализ также показал, что свойство «Приспособленность к эвакуации» учтено только в одной номенклатуре из известных ранее.

Вместе с этим следует отметить, что свойство «Приспособленность к эвакуации» ещё не заняло своего места в основных группах свойств ВКМ, таких как «Живучесть», «Подвижность» и др. В связи с чем, актуальными являются задачи по определению принадлежности данного свойства к одной из вышеупомянутых групп и по оценке его значимости по отношению к другим свойствам, входящим в номенклатуру.

Для определения влияния внесенных в конструкцию изменений с целью повышения приспособленности к эвакуации необходимо получить и оценить показатели свойств ВКМ как в стандартных эксплуатационных условиях, так и в условиях движения после осуществления подрыва. Показатели ВКМ на этапе проектирования могут быть спрогнозированы с помощью имитационного математического моделирования. Для моделирования движения ВКМ необходимо разработать математическую модель, позволяющую прогнозировать показатели свойств при различных вариантах конструкции.

Анализ известных математических моделей динамики транспортных средств позволил сделать вывод об их низкой пригодности для решения задач, связанных с оценкой динамических свойств ВКМ после имитации воздействия средств поражения, и соответственно, о необходимости либо их доработки, либо создания новых моделей, позволяющих решать такие задачи.

Исходя из вышесказанного, в работе для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработана номенклатура свойств, предназначенная для определения значимости показателей и предпочтительности возможных конструктивных решений ВКМ;
- обоснована принадлежность свойства «Приспособленность к эвакуации» к конкретной группе свойств, входящих в номенклатуру. Определена значимость свойства «Приспособленность к эвакуации» по отношению к другим свойствам, входящим в номенклатуру;
- разработаны оригинальные математические модели, пригодные для исследования движения ВКМ типа MRAP с отдельными неисправными узлами и системами (трансмиссия, тормозная система, рулевое управление, движитель) как при движении одиночной ВКМ, в случае самоэвакуации, так и при движении машин в сцепке, в случае эвакуации ВКМ сторонними средствами;
- выполнено сравнение результатов имитационного моделирования и натурных экспериментов с целью оценки адекватности и точности разработанной математической модели;
- проведен комплекс теоретических исследований ВКМ с колесной формулой 6×6 при различных вариантах конструкции трансмиссии, рулевого управления, компоновки колесного движителя как при движении одиночной машины, так и при движении машин в сцепке, а также при имитации повреждений ходовой части с целью оценки возможностей самостоятельной эвакуации после воздействия средств поражения;
- разработана методика повышения эвакуационных свойств ВКМ на этапе проектирования. Проведена сравнительная оценка ВКМ при различных конструктивных исполнениях.

Научная новизна заключается:

- в разработанной номенклатуре свойств ВКМ типа MRAP, отличающейся от существующих номенклатур учетом свойства «Приспособленность к эвакуации»;
- во введении в разработанную номенклатуру нового критерия оценки свойства «Приспособленность к эвакуации» - «Эвакуация «своим ходом»», что позволяет более точно проводить оценку эвакуационных свойств;
- в методике обеспечения эвакуационных свойств ВКМ, основой которой являются разработанные программный комплекс, позволяющий проводить сравнения методом анализа иерархий, и математические модели

движения ВКМ с имитацией воздействия средств поражения в виде неисправностей работы отдельных узлов, агрегатов и систем;

- в результатах теоретических исследований динамики ВКМ типа MRAP с различными типами трансмиссии, компоновкой движителя и схемой рулевого управления, а также при имитации неисправностей тормозной системы и повреждения ходовой части в случае самоэвакуации после воздействия средств поражения.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработанном программном комплексе, позволяющем проводить сравнения методом анализа иерархий, в том числе и методом индивидуального анкетирования;
- в комплексе программ для ЭВМ, позволяющем имитировать динамику ВКМ с колесной формулой 6×6 при различных вариантах конструкции трансмиссии, рулевого управления, а также при имитации неисправностей тормозной системы и повреждения ходовой части, позволяющем проводить оценку возможностей по эвакуации сторонними средствами и самостоятельной эвакуации после воздействия средств поражения противника.

#### Личный вклад

Все представляемые к защите данные и результаты являются оригинальными и, кроме исключительных специально оговоренных случаев, получены соискателем лично.

#### Реализация результатов работы.

Результаты исследований, основанные на разработанном программном комплексе, позволяющем проводить сравнения методом анализа иерархий, вошли в научно-технические отчеты, выполненные в ОАО «НИИ стали», ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» и НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты работы также используются в учебном процессе при подготовке специалистов на кафедре «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения и результаты докторской работы заслушивались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2011-2015;
- на научном семинаре кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2015;
- на научно-техническом семинаре кафедры «Тягачи и амфибийные машины» ГТУ МАДИ. М., 2011;
- на международной молодежной конференции «Энергоэффективный автомобильный транспорт будущего» «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)». М., 2012.

Публикации. По материалам докторской работы опубликовано 7 научных работ, из них по перечню, рекомендованному ВАК РФ – 2.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Работа изложена на 185 листах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 20 таблиц. Библиография работы содержит 94 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, заключающейся в обеспечении свойства «Приспособленность к эвакуации» ВКМ типа MRAP за счет выбора рациональных параметров конструкции на этапе проектирования, приведено краткое содержание выполненных исследований по главам, сформулирована цель работы и отражены основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе диссертации приведен обзор средств поражений ВКМ и статистика их применения. Представлены предпосылки появления нового типа ВКМ – MRAP, этапы их развития, а также основные конструктивные особенности.

Рассмотрены методы комплексного сравнения, применимые для ВКМ, базирующиеся на трудах академии БТВ. Проведённый анализ показал, что существующие методы не позволяют корректно провести сравнение различных модификаций ВКМ на стадии проектирования. Вместе с этим, анализ позволил сформулировать перечень критериев, которым должен удовлетворять искомый метод сравнения. Сформированному перечню критериев удовлетворяет метод анализа иерархий (МАИ), пригодность к решению задач сравнения ВКМ которого была доказана рядом работ. В этой части исследования особенно отмечены работы Плиева И.А., Рождественского Ю.Л., Постникова М.В., научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП «НАМИ» и 21 НИИ МО РФ.

Неотъемлемой частью сравнения является номенклатура критериев. В первой главе приведено также описание существующих номенклатур, отмечены положительные и отрицательные стороны каждой номенклатуры, составлен перечень требований к формируемой номенклатуре.

В главе также обоснована необходимость учёта свойства «Приспособленность к эвакуации» в общей номенклатуре. В данной части отмечены работы Соболева Е.Г. и научных школ Академии БТВ и 38 НИИ МО РФ.

На сегодняшний день в качестве критериев оценки свойства «Приспособленность к эвакуации» выступают «Эвакопригодность» и «Эвакоспособность». Эвакопригодность – это свойство, характеризующее приспособленность машины к перемещению с использованием штатных средств машины и подвижных средств эвакуации в заданных условиях эксплуатации. «Эвакоспособность» – свойство, характеризующее технические возможности машины по перемещению эвакуируемых объектов в заданных

условиях. В главе обосновывается необходимость использования в качестве дополнительного критерия свойства «Приспособленность к самоэвакуации» с места подрыва или поломки. Ввиду того, что свойство «Приспособленность к эвакуации» пока не заняло своего места в ряду общепринятых свойств, таких как быстроходность, защищённость, ремонтопригодность и др. в главе ставится вопрос о принадлежности данного свойства к одной из групп свойств.

Для проектирования ВКМ с учетом приспособленности к эвакуации предлагается разработать методику, которая должна опираться с одной стороны на значимость свойств ВКМ, с другой – на значения показателей этих свойств. Для прогнозирования показателей ВКМ на сегодняшний день наиболее широко используется математическое моделирование. В работе рассмотрены существующие типы математических моделей для прогнозирования показателей движения ВКМ.

Особенно отмечены работы Забавникова Н.А., Дмитриева А.А., Савочкина В.А., Котиева Г.О., Наказного О.А., Сарача Е.Б. Марохина С.М. научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Академии БТВ, 21 НИИ МО РФ.

В итоги главы были вынесены основные задачи, решение которых необходимо для достижения цели работы, чему и посвящены остальные главы диссертации.

Во второй главе описывается подход к разработке номенклатуры свойств. Обосновывается структура иерархии. Приводятся понятия, которые вкладываются в каждое свойство (термин), входящее в номенклатуру (Рис. 2).

Номенклатура составлена с учётом следующих особенностей. Все свойства разделены на две основных группы – «Эксплуатационно-экономические свойства» и «Боевые свойства». Разработанная номенклатура содержит в себе необходимое число свойств, способных характеризовать ВКМ на этапе проектирования. При составлении номенклатуры была учтена психологическая способность человека запоминать не более пяти односложных слов. Для обеспечения данного требования группы не должны содержать в себе более пяти критериев.

В разделе, посвящённом формированию группы боевых свойств, решается задача об определении места свойства «Приспособленность к эвакуации». Рассматривается возможность его принадлежности к таким группам свойств как «Подвижность», «Живучесть» и «Ремонтопригодность».

На основании проведённого анализа сделан вывод о принадлежности свойства «Приспособленность к эвакуации» группе свойств – «Живучесть».

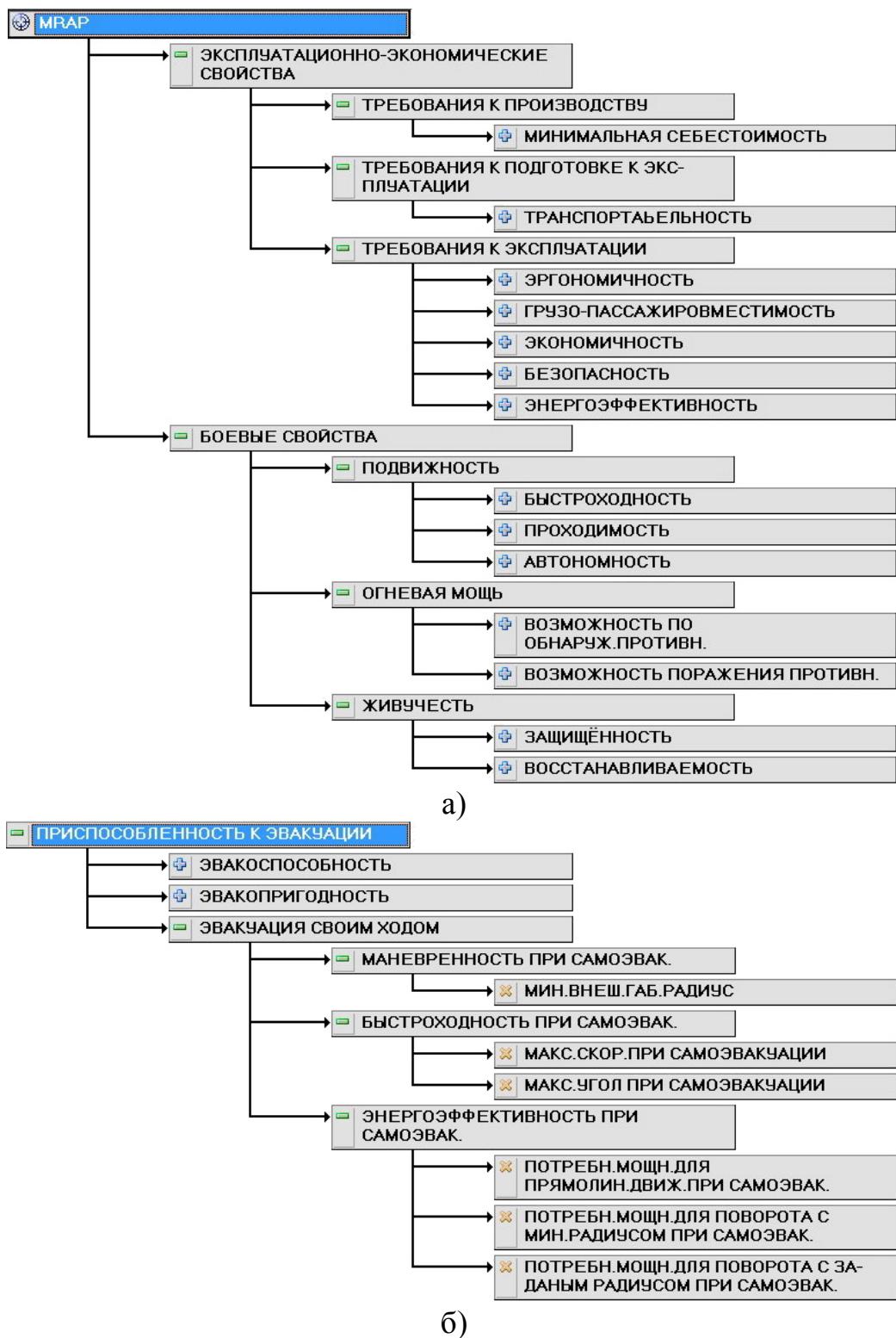


Рис. 2. Общий вид разработанной номенклатуры свойств (а) и номенклатура свойств, характеризующих приспособленность к эвакуации (б)

Также в главе 2 содержится описание способов обработки экспертных оценок, применяющиеся в работе. МАИ рассчитан на групповое принятие решения, при этом подразумевается, что все эксперты должны прийти к единому мнению при решении задачи сравнения. Более продуктивным и менее трудоёмким является метод индивидуального анкетирования. С целью обработки результатов индивидуальных экспертных оценок были использованы показатели степени согласованности: коэффициент вариации  $V_j$ , рассчитываемый по формуле:

$$V_j = \frac{\sigma_j}{M_j},$$

где  $\sigma_j$  – среднее квадратическое отклонение оценок, полученных  $j$ -ым сравниваемым объектом;  $M_j$  – среднее арифметическое величины оценки сравниваемого объекта.

и коэффициент конкордации  $W$ , рассчитываемый по формуле:

$$W = \frac{12}{m^2(n^3 - n) - m \sum_{i=1}^m T_i} \sum_{j=1}^n d_j^2,$$

где  $d_j$  – отклонения суммы рангов оценок, полученных  $j$ -ым сравниваемым объектом от среднего арифметического сумм рангов оценок, полученных всеми объектами;  $T_i$  – показатель связанных (равных) рангов оценок, назначенных  $i$ -м экспертом;  $m$  – число экспертов, принявших участие в оценке;  $n$  – число сравниваемых объектов (критериев или альтернатив).

В качестве показателя обобщённого мнения экспертов в работе используется геометрическое среднее значение.

Для обработки индивидуальных экспертных оценок с целью дальнейшего их использования в МАИ был создан программный комплекс «Анализ иерархий», который позволяет выстраивать иерархически зависимые номенклатуры свойств; формировать варианты альтернативных решений; проводить как групповую, так и индивидуальную экспертную оценку; рассчитывать коэффициенты вариации и конкордации, а также исключать из совокупности экспертов тех, чье мнение противоположно большинству; рассчитывать значимость свойств и приоритетность альтернатив; получать обобщённые оценки группы экспертов и формировать итоговый результат.

В заключительной части главы приводятся результаты сравнения значимости свойства «Приспособленность к эвакуации» (Рис. 3) на начальном этапе исследования, сформулирован вывод о высокой значимости данных свойств и высокой согласованности экспертов относительно их значимости, на основании чего можно констатировать целесообразность развития выбранного для исследований направления.

		Обобщ.оц.	Коэф.вар.
1	Защита кунга с десантом	0,1049886	0,0000000
2	Защита шасси с экипажем	0,1049886	0,0000000
3	Приспособленность к эвакуации	0,0861396	0,0597259
4	процентное соотношение узло...обилем используемое в объекте	0,0638188	0,0000000
5	Обнаружение противника средствами десанта	0,0634096	0,0000000
6	Обнаружение противника средствами экипажа	0,0634096	0,0000000
7	Автономность по переносимости человека	0,0520140	0,0618590
8	Профильная проходимость	0,0481282	0,3404408
9	Опорная проходимость	0,0412565	0,2507796
10	Тормозные свойства	0,0410048	0,0000000
11	поражен.противника комплексом машины	0,0356978	0,2792198
12	Приспособленность к ремонту (Ремонтопригодность)	0,0338156	0,2474358

Экспертов (из) 3 (12) ОС <= 20 W >= 0,75

Рис. 3. Значимость критериев 5-го уровня иерархии

В третьей главе представлены математические модели, разработанные для прогнозирования показателей ВКМ как при движении в нормальном состоянии, так и после воздействия на машину средств поражения.

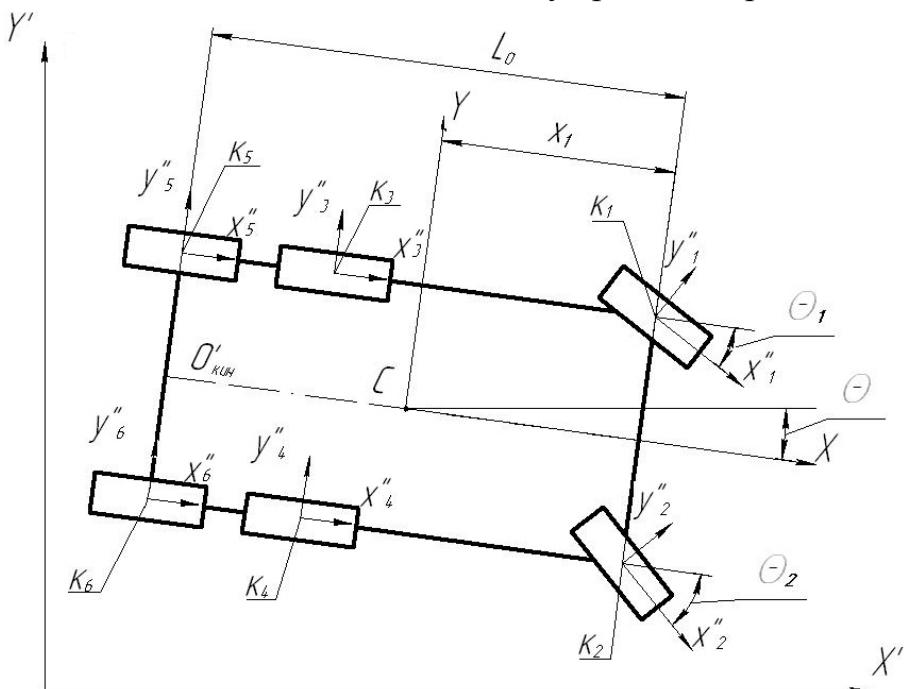


Рис. 4. Системы координат

В первой части главы описана математическая модель криволинейного движения ВКМ с колёсной формулой 6×6 по ровному недеформируемому опорному основанию. Движение ВКМ складывается из поступательного движения центра масс и вращательного движения вокруг центра масс (Рис. 4).

Система уравнений (1), описывающая данное движение, позволяет рассчитать текущие ускорения по значениям сил и моментов, действующим на ВКМ.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_x = \frac{dV_x}{dt} - \omega_z \cdot V_y = \frac{1}{m} \cdot \left( \sum_{i=1}^6 R_{xi} - m \cdot g \cdot \sin \theta \right) \\ a_y = \frac{dV_y}{dt} + \omega_z \cdot V_x = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^6 R_{yi}; \\ J_z \cdot \frac{d\omega_z}{dt} = \sum_{i=1}^6 M_{nki} + \sum_{i=1}^6 M(\vec{R}_i) \\ V_x' = \frac{dx'}{dt} = V_x \cdot \cos \theta - V_y \cdot \sin \theta; \\ V_y' = \frac{dy'}{dt} = V_x \cdot \sin \theta + V_y \cdot \cos \theta; \\ \omega_z = \frac{d\theta}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $m$  – масса ВКМ;  $J_z$  – момент инерции ВКМ относительно оси  $z$ ;  $\vec{V}$  – вектор скорости центра масс ВКМ;  $\vec{a}$  – вектор ускорения центра масс ВКМ (абсолютная производная от вектора скорости центра масс ВКМ);  $\frac{d\vec{V}}{dt}$  – относительная производная от вектора скорости центра масс ВКМ;  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости поворота объекта;  $\theta$  – угол поворота ВКМ

относительно оси  $z'$ ;  $x'$ ,  $y'$ - координаты центра масс ВКМ в неподвижной системе координат;  $x$ - $y$  – подвижная система координат, связанная с ВКМ;  $\vec{R}_i$  – вектор силы взаимодействия с опорной поверхностью, действующей на  $i$ -ое колесо,  $M_{nki}$  – момент сопротивления повороту  $i$ -го колеса;  $\alpha$  – угол преодолеваемого подъема/спуска (учитывается только в направлении прямолинейного движения ВКМ).

Для моделирования движения ВКМ с различными типами трансмиссии, схемами РУ и компоновкой движителя в модель были внесены следующие изменения и дополнения: составлены и реализованы математические модели системы рулевого управления ВКМ с формулами 1-00, 12-0, 1-0-3; составлены зависимости, реализующие изменение распределения нормальных реакций на грунт при отрыве правого колеса передней оси; составлены и реализованы математические модели различных схем и типов трансмиссии для ВКМ с колесной формулой  $6 \times 6$ ; составлена библиотека блоков для реализации распределения моментов в трансмиссии при повреждённом движителе с учетом блокировки дифференциальных связей; разработана модель движения двух однотипных ВКМ в сцепке.

Система уравнений (2) описывает динамику трансмиссии колесной машины  $6 \times 6$  со схемой трансмиссии, представленной на Рис. 5.

На Рис. 5: ДВС – двигатель внутреннего сгорания, КП – коробка передач, РК – раздаточная коробка, МКД – межколёсный дифференциал, МОД – межосевой дифференциал, КР – колёсный редуктор.

$$\left\{
\begin{aligned}
J_{\partial\theta} \cdot \dot{\omega}_{\partial\theta} &= M_{\partial\theta} - M_c; \\
\dot{\omega}_{\partial\theta} &= \left( \frac{1}{3} \cdot \dot{\omega}_{nep} + \frac{2}{3} \cdot \dot{\omega}_{za\theta} \right) \cdot U_{K\pi} \cdot U_{PK}; \\
\dot{\omega}_{nep} &= \left( \frac{\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2}{2} \right) \cdot U_{\Gamma\pi}; \\
\dot{\omega}_{za\theta} &= \dot{\omega}_{za\theta 1} = \dot{\omega}_{za\theta 2}; \\
\dot{\omega}_{za\theta 1} &= \left( \frac{\dot{\omega}_3 + \dot{\omega}_4}{2} \right) \cdot U_{\Gamma\pi}; \\
\dot{\omega}_{za\theta 2} &= \left( \frac{\dot{\omega}_5 + \dot{\omega}_6}{2} \right) \cdot U_{\Gamma\pi}; \\
J_{nep} \cdot \dot{\omega}_{nep} &= \frac{1}{3} \cdot M_c \cdot U_{K\pi} \cdot U_{PK} \cdot \eta_{K\pi} \cdot \eta_{PK} - M_{nep}; \\
J_{za\theta} \cdot \dot{\omega}_{za\theta} &= \frac{2}{3} \cdot M_c \cdot U_{K\pi} \cdot U_{PK} \cdot \eta_{K\pi} \cdot \eta_{PK} - M_{za\theta 1} - M_{za\theta 2}; \\
J_{ki} \cdot \dot{\omega}_i &= \frac{M_{nep}}{2} \cdot U_{\Gamma\pi} \cdot \eta_{\Gamma\pi} - M_{ki}; \\
J_{ki} \cdot \dot{\omega}_i &= \frac{M_{za\theta 1}}{2} \cdot U_{\Gamma\pi} \cdot \eta_{\Gamma\pi} - M_{ki}; \\
J_{ki} \cdot \dot{\omega}_i &= \frac{M_{za\theta 2}}{2} \cdot U_{\Gamma\pi} \cdot \eta_{\Gamma\pi} - M_{ki},
\end{aligned} \tag{2}
\right.$$

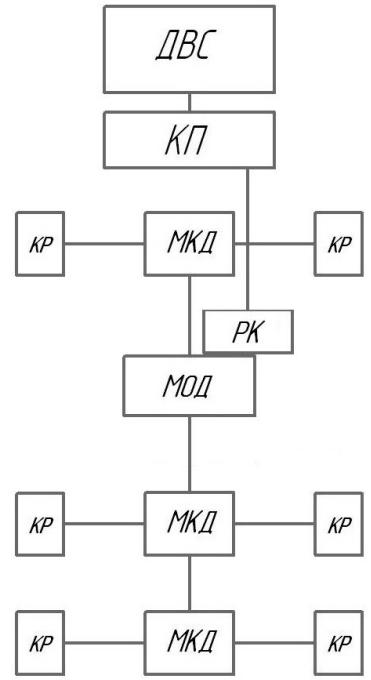


Рис. 5. Схема трансмиссии

где  $J_{\partial\theta}$  – момент инерции выходного вала двигателя;  $\dot{\omega}_{\partial\theta}$  – угловое ускорение выходного вала двигателя;  $M_{\partial\theta}$  – момент, развиваемый двигателем на выходном валу;  $M_c$  – момент сопротивления, приведенный к валу двигателя;  $\dot{\omega}_{nep}$  и  $\dot{\omega}_{za\theta}$  – угловые ускорения приводного вала 1-ой оси и задней тележки, соответственно;  $\dot{\omega}_i$  – угловое ускорение  $i$ -го колеса;  $J_{ki}$  – момент инерции  $i$ -го колеса;  $M_{ki}$  – момент сопротивления на  $i$ -ом колесе;  $M_{nep}$ ,  $M_{za\theta 1}$  и  $M_{za\theta 2}$  – моменты сопротивления на 1-ой, 2-ой и 3-ей осях, соответственно;  $J_{nep}$  и  $J_{za\theta}$  – моменты инерции 1-ой оси и 2-ой и 3-ей осей соответственно;  $U_{K\pi}$ ,  $U_{\Gamma\pi}$ ,  $U_{PK}$  – передаточное число коробки передач, главной передачи и раздаточной коробки;  $\eta_{K\pi}$ ,  $\eta_{\Gamma\pi}$ ,  $\eta_{PK}$  – КПД коробки передач, главной передачи и раздаточной коробки, соответственно.

$$M_{ki} = R_{x''i} \cdot r_{\partial i} + M_{mi} + M_{fi}, \tag{3}$$

где  $M_{mi}$  – тормозной момент на  $i$ -ом колесе;  $r_{\partial i}$  – расстояние от оси  $i$ -го колеса до опорной поверхности;  $M_{fi}$  – момент сопротивления качению  $i$ -го колеса.

При моделировании движения в сцепке в случае эвакуации однотипной машины (Рис. 6) сила в сцепном устройстве  $F_s$  определяется по (4):

$$\begin{aligned}
F_s &= C_F \cdot \Delta + \mu_F \dot{\Delta}; \\
\Delta &= \sqrt{(X'_1 - X'_2)^2 + (Y'_1 - Y'_2)^2}; \\
\dot{\Delta} &= \frac{(X'_1 - X'_2) \cdot (\dot{X}'_1 - \dot{X}'_2) + (Y'_1 - Y'_2) \cdot (\dot{Y}'_1 - \dot{Y}'_2)}{\Delta},
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $C_F$  – коэффициент жесткости сцепного устройства в продольном направлении;  $\mu_F$  – коэффициент сопротивления демпфера сцепного устройства

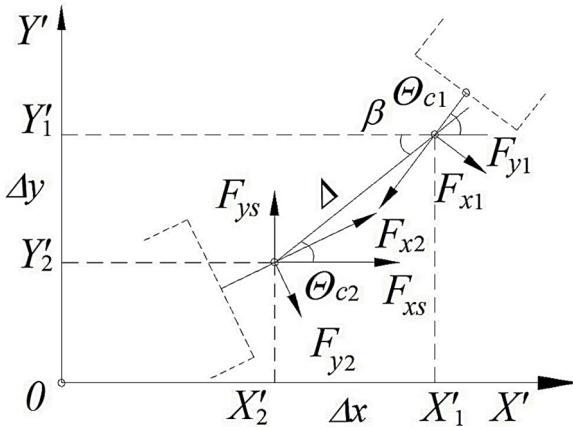


Рис. 6. Схема направления действия сил и моментов в узле сочленения

на оси систем координат, связанных с корпусами звеньев, определяются по зависимостям (5):

$$\begin{aligned} F_{x1} &= \cos \Theta_{c1} \cdot (-F_{xs}) + \sin \Theta_{c1} \cdot (-F_{ys}); \\ F_{x2} &= \cos \Theta_{c2} \cdot F_{xs} + \sin \Theta_{c2} \cdot F_{ys}; \\ F_{y1} &= \sin \Theta_{c1} \cdot F_{xs} + \cos \Theta_{c1} \cdot (-F_{ys}); \\ F_{y2} &= \sin \Theta_{c2} \cdot (-F_{xs}) + \cos \Theta_{c2} \cdot F_{ys}; \\ M_1 &= F_{y1} \cdot d_1; \\ M_2 &= F_{y2} \cdot d_2, \end{aligned} \quad (5)$$

от центра масс до шарнира сцепного устройства для первой и второй машин соответственно.

Вторая часть главы посвящена прогнозированию показателей плавности хода ВКМ при движении по неровностям.

Показатели плавности хода ВКМ прогнозируются с целью оценки быстроходности. В качестве зависимостей, отражающих ограничения скорости по системе подпрессоривания, были приняты скоростные характеристики. Построение скоростной характеристики в работе осуществлялось по трем критериям: вертикальное ускорение на месте водителя больше  $3g$ ; «пробой» подвески – касание рычагов подвески ограничителей хода или касание свесов машины опорной поверхности; вертикальная сила в пятне контакта на 20% меньше статической нагрузки.

В ходе моделирования были получены характеристики систем подпрессоривания для ВКМ при движении по периодическим неровностям с длиной волны, равной двум базам машины (Рис. 7), а также зависимость радиуса поворота от скорости движения ВКМ со схемой РУ 1-00 (Рис. 8).

в продольном направлении;  
 $\Delta$  – расстояние между шарнирами секций автопоезда в неподвижной системе координат;  
 $\dot{\Delta}$  – степень изменения расстояния между шарнирами секций по времени;  $X'_1, X'_2, Y'_1, Y'_2$  – проекции точек шарниров сцепных устройств звеньев на оси неподвижной системы координат.

Проекции силы, действующей в узле сочленения, и моменты от

где  $\Theta_{c1}$  и  $\Theta_{c2}$  – угол поворота корпуса первой и второй машины в сцепке, соответственно, в неподвижной системе координат;  $F_{xs}$  и  $F_{ys}$  – проекции силы, действующей в узле сочленения, на оси неподвижной системы координат;  $d_1$  и  $d_2$  – расстояние

График, представленный на Рис. 8, демонстрирует, что независимо от угла поворота колёс на предельных скоростях движения может быть реализован только определённый радиус поворота. Данное замечание относится ко всем схемам РУ.

В заключительной части главы приводятся результаты теоретических исследований ВКМ с колесной формулой  $6 \times 6$ , различными типами трансмиссии, компоновкой движителя и схемой рулевого управления, а также при имитации неисправностей тормозной системы и повреждения ходовой части при самоэвакуации после воздействия средств поражения.

В четвёртой главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Даётся подробное описание объекта исследований, аппаратурно-измерительного комплекса, условий и методики проведения эксперимента.



Рис. 9. Общий вид объекта исследований

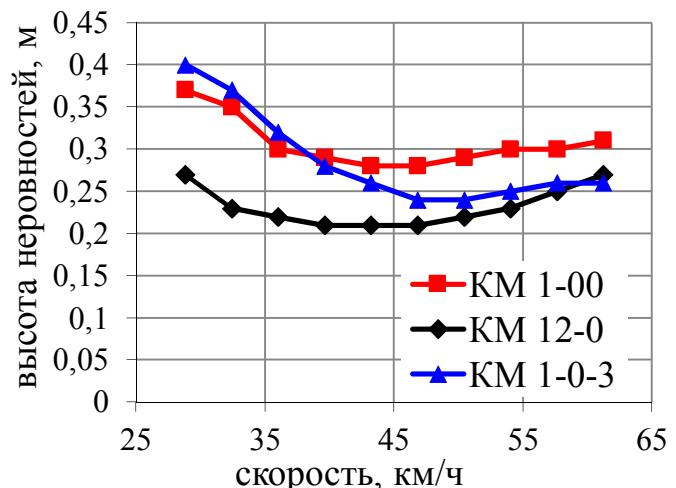


Рис. 7. Скоростные характеристики системы подпрессоривания ВКМ при различной расстановке осей по базе

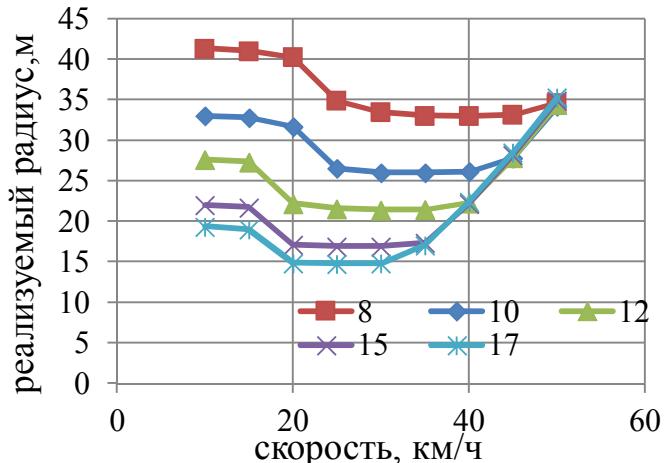


Рис. 8. График зависимости радиуса поворота от скорости движения ВКМ со схемой РУ 1-00 при различных углах поворота колес



Рис. 10. Установка тензодатчика в сцепке



Рис. 11. Измерительная система

давлении в шинах.

Сравнение результатов эксперимента с расчётными данными, представленное в Таблице 1, показывает, что среднее расхождение не превышает 12,5%.

Таблица 1

Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований позволила сделать вывод об адекватности модели движения ВКМ в сцепке при эвакуации. В связи с тем, что модель движения в сцепке была разработана на основании модели описывающей движение одиночной ВКМ, обе модели имеют практическую пригодность для прогнозирования динамических показателей ВКМ, как при движении ВКМ в сцепке, так и при движении одиночной ВКМ.

В пятой главе изложена методика обеспечения эвакуационных свойств ВКМ. Схематичное изображение алгоритма методики приведено на рисунке 12. Методика представлена в виде следующего алгоритма:

1. Составление перечня критериев для сравнения приоритетности различных модификаций ВКМ.

2. Составление перечня модификаций объектов сравнения (ВКМ с различными комбинациями типов трансмиссии, рулевого управления,

На основании сравнения полученных результатов с расчётными данными произведена оценка адекватности и определена точность математической модели движения сцепки из двух ВКМ при эвакуации повреждённой однотипной машины.

В качестве объекта исследований выбрана сцепка из двух полноприводных машин семейства Урал-4320. Общий вид объекта представлен на Рис. 9.

Экспериментальные исследования проводились на бетонно-асфальтовом основании и заключались в определении усилия в сцепном устройстве при прямолинейном движении сцепки однотипных машин с установленной скоростью при нормальном и пониженном

№	Эксперимент, кН	Мат. модель, кН	Расхождение, %	Среднее расхождение, %
1	1,598	1,783	11	12,125
2	1,640		9	
3	1,536		16	
4	4,548	4,457	2	3,098
5	4,496		1	
6	4,763		6	

компоновкой колёсного движителя и др.). Исключение заведомо неэффективных вариантов.

3. Доработка с учётом всех предъявляемых к теоретическим исследованиям динамики выбранных модификаций, математических моделей движения ВКМ при различных вариантах конструкции трансмиссии, рулевого управления, а также при имитации неисправностей тормозной системы и повреждения ходовой части.

4. Последовательная реализация в математической модели всех модификаций ВКМ из составленного перечня и определение значения показателей при движении:

- с исправными узлами и системами;
- с неисправными узлами и системами.

5. Проведение экспертной оценки значимости свойств ВКМ и приоритетность альтернативных модификаций, используя значения показателей, полученные посредством математического моделирования.

6. Выбор наиболее приоритетной модификации ВКМ на основе полученных результатов.

В главе приведены:

- алгоритм прогнозирования значений показателей ВКМ посредством имитационного моделирования;



Рис. 12. Алгоритм методики повышения приспособленности к эвакуации ВКМ на этапе проектирования

- алгоритм определения значимости показателей, входящих в номенклатуру свойств;

- алгоритм сравнения эффективности различных модификаций ВКМ.

На Рис. 13 представлены результаты сравнения приоритетности нескольких модификаций объекта ВКМ, полученные с помощью разработанной методики.

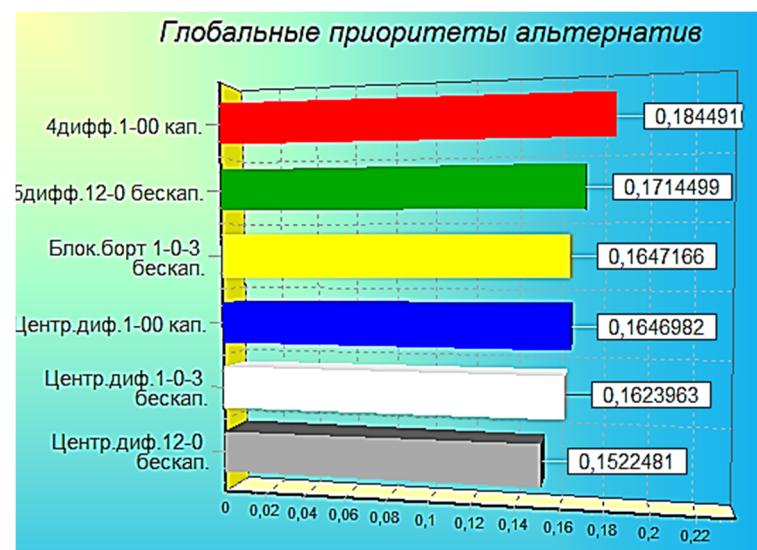


Рис. 13. Диаграмма приоритетности

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана номенклатура свойств, позволяющая определять значимость показателей и предпочтительность возможных конструктивных решений ВКМ типа МРАР, находящихся на стадии проектирования, а также сравнивать уже существующие машины. Общее количество критериев, включенных в номенклатуру, 109.

2. Обоснована принадлежность свойства «Приспособленность к эвакуации» к группе свойств «Живучесть», а также с помощью экспертных оценок определена значимость этого свойства, по отношению к другим свойствам, входящим в номенклатуру. Установлено, что свойство «Приспособленность к эвакуации» имеет значимость «0,086» и занимает третье место среди критериев пятого уровня, при общем количестве критериев пятого уровня - 31. Коэффициент вариации по данному свойству имеет значение «0,059», что показывает высокую согласованность мнений экспертов о значимости данного свойства.

3. На базе существующих математических моделей разработаны оригинальные модели, пригодные для прогнозирования движения колёсной машины при различных вариантах конструкции с неисправностями тормозной системы и повреждениями ходовой части, в том числе, в составе сцепки. Сравнение результатов имитационного моделирования с результатами натурных испытаний показывает, что среднее расхождение между значениями усилий в сцепном устройстве не превышает 12,5%, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели, а также практической пригодности модели для прогнозирования динамических показателей ВКМ, в том числе при эвакуации и самоэвакуации.

4. Проведенный с помощью имитационного математического моделирования комплекс теоретических исследований ВКМ с колесной

формулой  $6 \times 6$  при различных вариантах конструкции трансмиссии, рулевого управления, а также при имитации неисправностей тормозной системы и повреждения ходовой части позволил сделать вывод о возможностях в части приспособленности к эвакуации, а также о влиянии данного свойства на общую эффективность ВКМ;

5. Разработана методика обеспечения эвакуационных свойств ВКМ на этапе проектирования, включающая в себя 6 основных этапов. На базе разработанной методики проведена сравнительная оценка ВКМ с различными конструктивными решениями, показавшая превосходство конструкции ВКМ типа «4 дифференциала при схеме РУ 1-00 и капотной компоновке» над другими не менее, чем на 7%.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Морозов А.В. Комплексное сравнение объектов военной автомобильной техники типа MRAP на стадии проектирования // Журнал автомобильных инженеров. 2015. №1 (90). С.40-45. (0,38 п.л.)
2. Сарач Е.Б., Морозов А.В., Смирнов И.А. Влияние расстановки колес по базе на плавность хода трехосной машины // Труды НАМИ / ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». 2015. №262. С.77-85. (0,56 п.л. / 0,14 п.л.)
3. Морозов А.В., Рождественский Ю.Л. Использование вербальных методов при решении задач сравнения в области колесно-гусеничной техники // Образование через науку.: тез. докл. Междунар. конф. . М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2005. С.206. (0,06 п.л. / 0,03 п.л.)
4. Морозов А.В. Анализ влияния эвакопригодности на общую эффективность образца автобронетанковой техники // Исследование, проектирование и расчет колесных и гусеничных машин: Сборник научных трудов МАДИ. М.: МАДИ, 2013. С. 58-65. (0,5 п.л.)
5. Морозов А.В. Эвакоспособность в номенклатуре свойств объектов автобронетанковой техники. Инженерный журнал: наука и инновации. Рег. № ФС 77-53688. 2013. Вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/984.html> (0,5 п.л.)
6. Морозов А.В., Котовский А.А., Филев А.В. Выбор метода комплексного сравнения объектов автобронетанковой техники на этапе проектирования // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. № 2 (104). С.120-123. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.)
7. Морозов А.В., Рязанцев В. И. Методика проведения согласования экспертных оценок полученных путем индивидуального анкетирования методом анализа иерархий // Инженерный вестник. Рег. № ФС 77-51036. 2014. Вып. 12 (декабрь). URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/742182.html> (0,63 п.л. / 0,5 п.л.)