

УДК 629.36

А.С. Дьяков

НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ВЫСОКОПОДВИЖНЫХ БЕЗЭКИПАЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Представлены научные методы разработки ходовых систем, обеспечивающие заданные показатели подвижности на этапе проектирования, отличающиеся прогнозированием проходимости, быстроходности и автономности с использованием виртуального полигона и метода анализа иерархии для определения рациональных конструктивных параметров ходовых систем безэкипажных наземных транспортных средств (БНТС) и выбора приоритетных технических решений. Представлен комплекс новых математических моделей динамики БНТС, отличающихся возможностью моделирования «больших» перемещений и связанных с этим нехарактерных случаев взаимодействия движителей с опорной поверхностью. Описана совокупность эксплуатационных свойств, определяющих подвижность наземных БНТС, отличающихся отсутствием ограничений, накладываемых психофизиологическими возможностями экипажа. В работе применены метод прогнозирования подвижности БНТС, отличающийся использованием виртуальных полигонных испытаний и метод формирования технического облика ходовых систем, отличающийся использованием научно обоснованной иерархии приоритетов эксплуатационных свойств, определяющих подвижность БНТС.

Ключевые слова: безэкипажные наземные транспортные средства, методы проектирования, математическое моделирование, виртуальный полигон, подвижность, эксплуатационные свойства, метод анализа иерархий, «большие» перемещения.

Для обеспечения обороноспособности страны, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, проведения поисковых и исследовательских работ особое значение имеет эффективное выполнение транспортных и технологических задач в условиях, опасных для человека. Важнейшая роль в решении этой проблемы отводится безэкипажным наземным транспортным средствам (БНТС). Все современные подходы по созданию БНТС направлены на обеспечение управляемого движения, при этом практически отсутствуют работы, кардинально решающие проблемы повышения подвижности. Очевидно, что отсутствие экипажа на борту позволит существенно повысить подвижность БНТС по сравнению с их экипажными аналогами из-за отсутствия психофизиологических ограничений, связанных с нахождением человека на борту:

- окружающая среда, несовместимая с жизнью (химическое, бактериологическое и радиационное воздействие на организм);
- воздействие осколочно-фугасных боеприпасов и т.п.;
- положение экипажа в пространстве;
- виброударные перегрузки;
- скорость реакции и воздействие на органах управления;
- усталость, включая скорость восприятия зрительной информации.

Существующие методы проектирования ходовых систем экипажных транспортных средств направлены на обеспечение управляемого движения при ограничениях по виброударным нагрузкам на экипаж, по скорости восприятия зрительной информации и воздействию на органы управления. Таким образом, и облик транспортного средства, и достижение эксплуатационных показателей в значительной мере определяется присутствием экипажа. В связи с этим, необходимо создание специальных методов проектирования ходовых систем БНТС с колесными, гусеничными и другими типами контактных движителей, отличающихся отсутствием ограничений, связанных с присутствием человека на борту.

Для БНТС можно обозначить случаи движения, не изучаемые современной теорией движения экипажных наземных транспортно-технологических средств (колесных, гусеничных машин и др.), в рамках которых допустимы реализации «больших перемещений» и связанные с этим нехарактерные случаи взаимодействия движителей с внешней средой (например, контактное взаимодействие боковой поверхности шины с опорной поверхностью, падения, перевороты). Таким образом, разработка новых методов проектирования ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств является актуальной научной проблемой.

Анализ регламентированных испытаний транспортных машин и исследований, посвященных обитаемости, позволил выявить существенное влияние психофизиологических свойств человека на облик, технические и эксплуатационные характеристики транспортного средства. С учетом нахождения человека на борту, ограничения при создании экипажных транспортных средств можно условно разделить на два класса. Во-первых, это ограничения по внешнему воздействию на человека в процессе движения (акустический шум, виброударные нагрузки, загрязняющие вещества, микроклимат, изменение положения человека относительно опорной поверхности и др.). Во-вторых – эргономические ограничения по размещению человека в транспортном средстве и воздействию на органы управления ТС. Таким образом, отсутствие накладываемых наличием человека на борту ограничений (на облик и технические характеристики), позволит создавать транспортные средства с более высокими показателями эксплуатационных свойств. Для создания специальных методов проектирования ходовых систем БНТС научно обоснована совокупность эксплуатационных свойств, определяющих подвижность БНТС. Их можно разделить на три следующих класса.

1. Свойства, определяющие подвижность как экипажных ТС, так и БНТС, не ограниченные психофизиологическими возможностями экипажа.
2. Свойства, определяющие подвижность БНТС и экипажных ТС, для последних – ограниченные психофизиологическими возможностями экипажа.
3. Свойства, определяющие подвижность только для БНТС в условиях, когда движение экипажных ТС невозможно.

В результате сделан вывод, что основные отличия эксплуатационных свойств БНТС от экипажных ТС будут характеризоваться: 1) уровнем допустимых виброударных нагрузок; 2) существованием разных равновесных положений ходовой системы относительно опорной поверхности; 3) средой обитания, недопустимой по физиологическим возможностям человека. Структурная схема формирования подвижности для БНТС будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Установлено, что оценка показателей эксплуатационных свойств БНТС, определяющих подвижность, может быть выполнена путем имитационного математического моделирования движения на совокупности дорожно-грунтовых условий и при преодолении препятствий. В связи с этим проведено обоснование требований, предъявляемых к разрабатываемым математическим моделям динамики БНТС. Эти требования определяются совокупностью задач, при решении которых должна быть получена необходимая информация для оценки эксплуатационных свойств, отличающихся возможными «большими перемещениями» и связанных с этим нехарактерных случаев взаимодействия движителей с внешней средой.

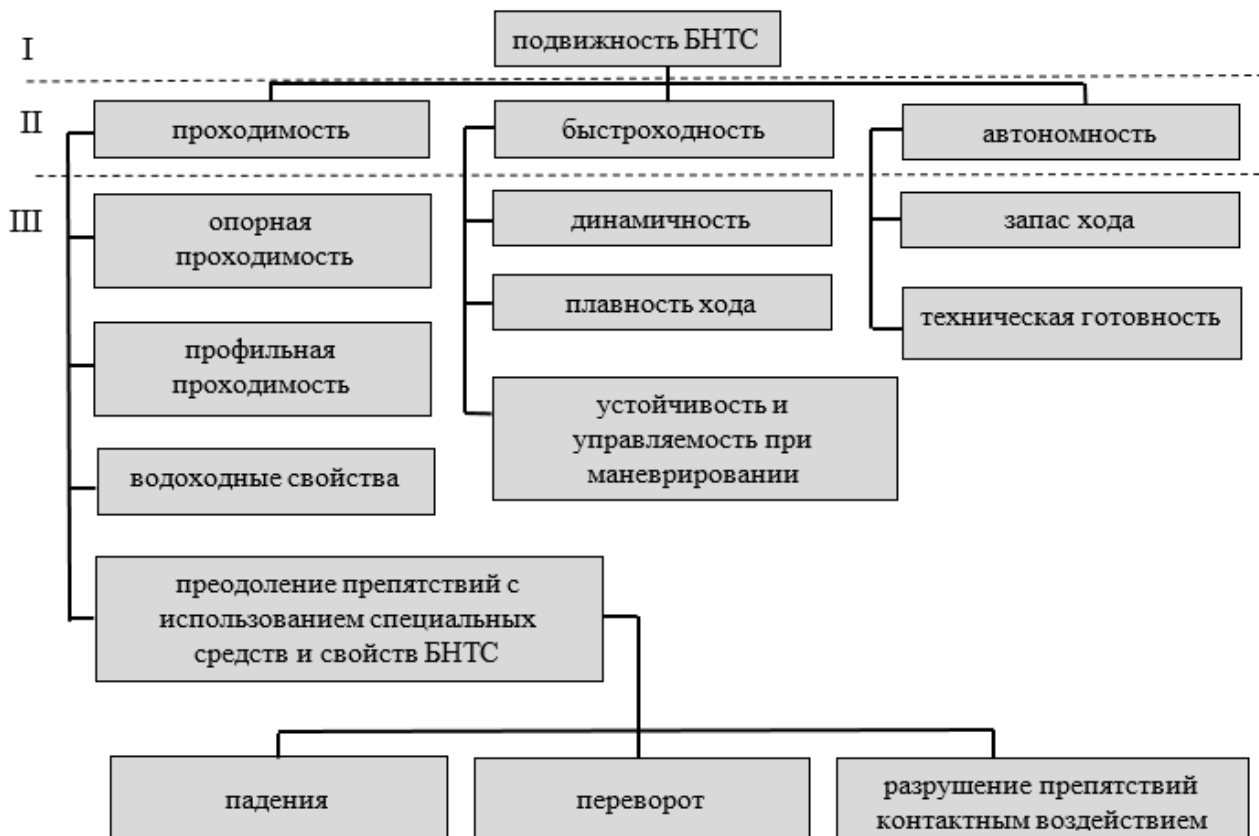


Рис. 1. Структурная схема формирования показателей подвижности БНТС

Структурная схема комплекса необходимых математических моделей (ММ) различного уровня представлена на рис. 2.

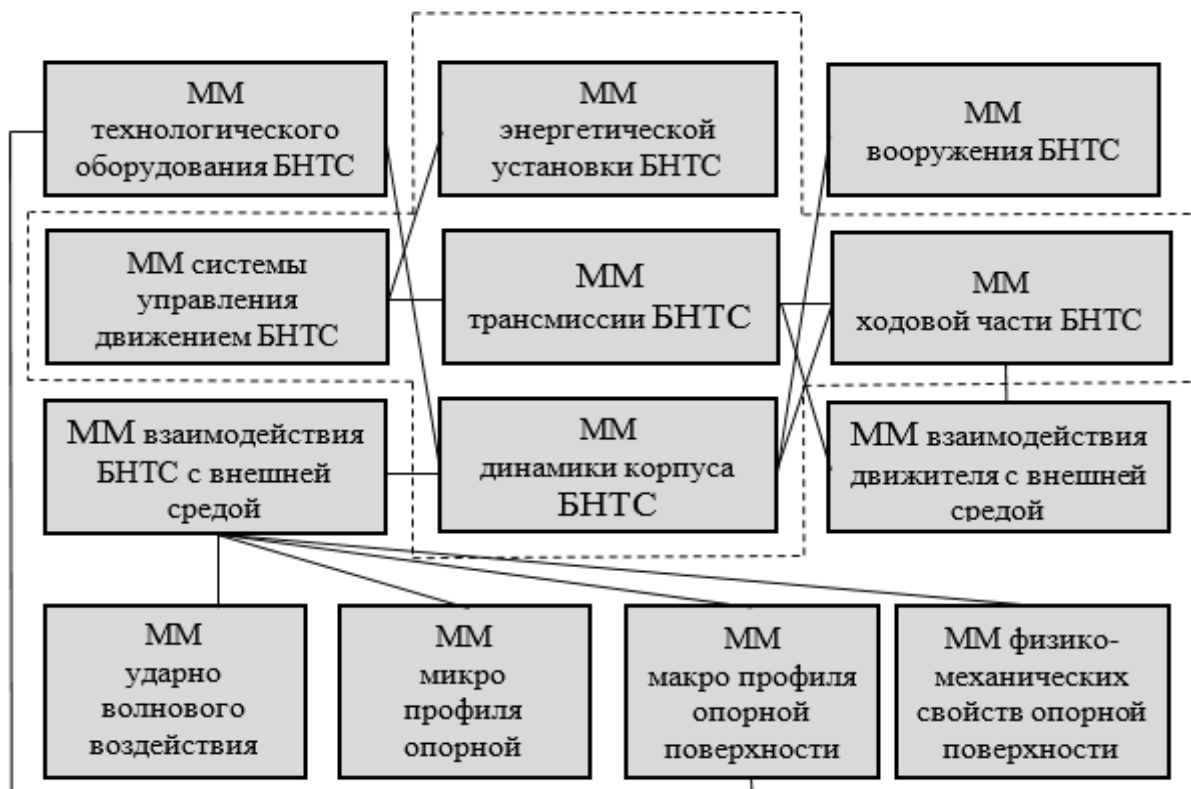


Рис. 2. Комплексное математическое моделирование динамики БНТС

К числу основных можно отнести следующие требования к математическим моделям БНТС для прогнозирования эксплуатационных свойств:

- модель должна описывать совместную динамику корпуса, силовой установки, трансмиссии и ходовой части БНТС, что необходимо для определения показателей эксплуатационных свойств с необходимой точностью;
- в моделях должны быть учтены конструктивные особенности ходовых систем;
- в модели не должно накладываться ограничений на геометрические и физико-механические характеристики дорожно-грунтовых условий в пространстве, что позволит теоретически исследовать поведение БНТС, в том числе при движении через искусственные препятствия;
- движение БНТС при преодолении препятствий с использованием специальных средств и свойств должно моделироваться с учетом возможности «больших перемещений» тел, в том числе при описании динамики нельзя пренебречь геометрической и кинематической нелинейностью.

Математические модели, удовлетворяющие этим требованиям, могут быть реализованы в современных комплексах инвариантного моделирования динамики систем тел, таких как: ПК «Универсальный механизм», ПК «ФРУНД», ПК «Эйлер», ПК «Adams» и т.д.

Для комплексной оценки подвижности БНТС сформирована файловая база данных типовых условий эксплуатации, содержащая геометрические характеристики и физико-механические свойства внешней среды, которая выполнена в виде виртуального испытательного полигона, элементы которого представлены на рис. 3.

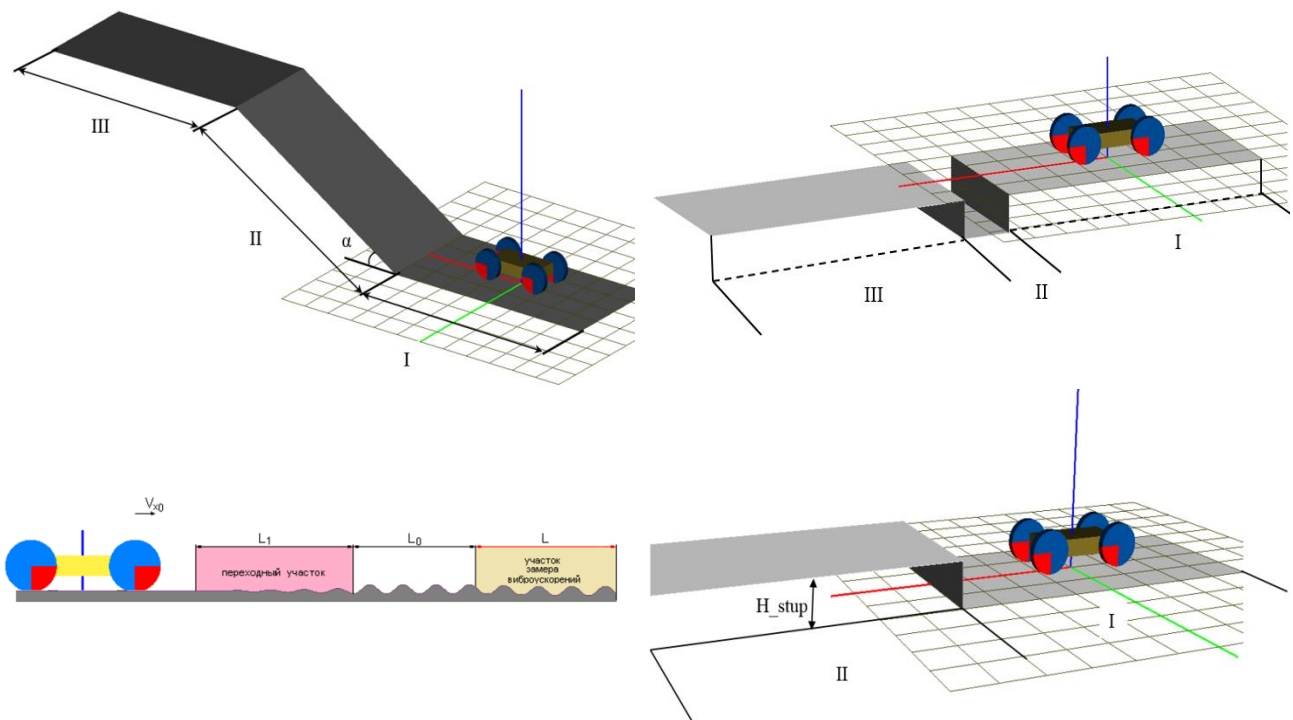


Рис. 3. Элементы виртуального испытательного полигона

Разработан метод определения приоритетных технических решений и конструктивных параметров ходовых систем (рис. 5), при этом на начальном этапе формируется декомпозиция проблемы (построение иерархии) для решения задачи выбора типа ходовой системы БНТС. Опираясь на анализ отечественного и зарубежного опыта создания БНТС, а также на собственные исследования, нами предложен следующий перечень связанных критериев различных уровней (рис. 4), характеризующих основные эксплуатационные свойства, определяющие подвижность.

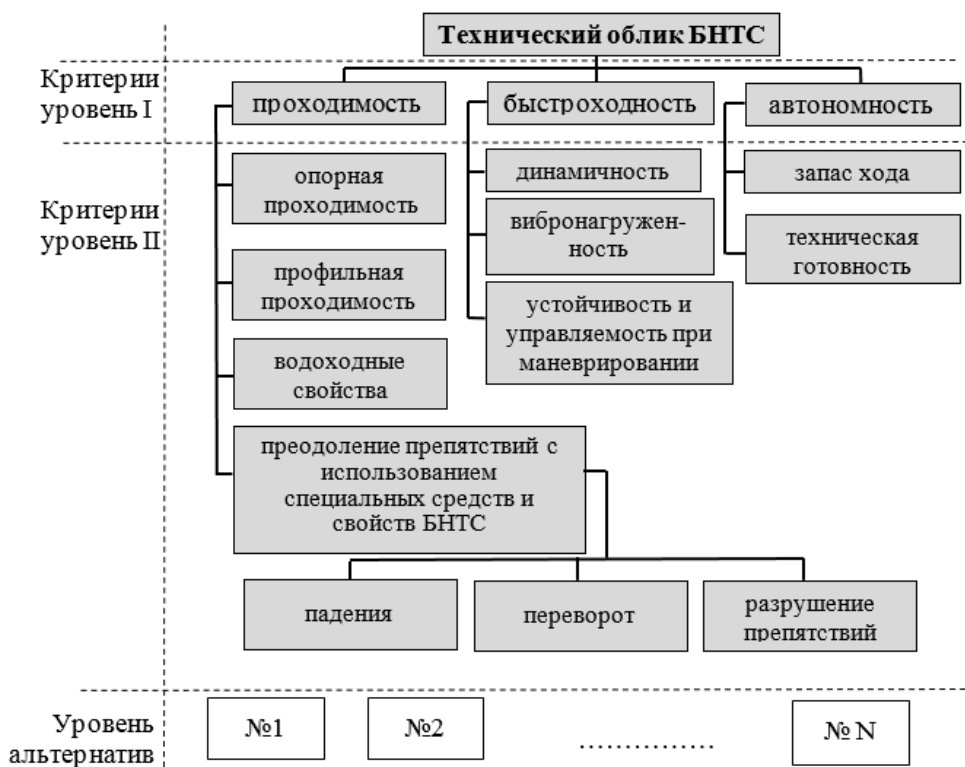


Рис. 4. Иерархия свойств для определения технического облика БНТС

Сравнение альтернатив по результатам определения возможных вариантов технического облика БНТС необходимо проводить с использованием имитационного математического моделирования для определения показателей по всем критериям, включая преодоление препятствий с использованием специальных средств и свойств БНТС. Научно обоснованная иерархия (рис. 4) проблемы выбора технического облика БНТС отражает характерные особенности и основные свойства подвижности. По результатам парных сравнений критериев различного уровня и альтернатив, в соответствии с методом анализа иерархий (МАИ) Т. Сатаи, осуществляется синтез локальных приоритетов и выбор наиболее подходящего варианта технического облика. Специфика построенной иерархии проблемы выбора технического облика БНТС состоит в ее универсальности по отношению к классу создаваемых объектов и представительности уровня альтернатив.

При этом необходимо отметить, что речь идет о создании БНТС, в техническом задании на разработку которого определено функциональное назначение и заданы условия эксплуатации. На первом уровне располагается цель выбора – технический облик БНТС. На самом нижнем уровне иерархии – уровне альтернатив – находятся конструктивные варианты, из которых определяется лучший. Второй уровень иерархии по МАИ занимают критерии, в соответствии с которыми осуществляется решение поставленной задачи. Естественно, что совокупность критериев должна служить для оценки возможных вариантов конструкции БНТС, в которых могут быть воплощены альтернативные технические решения.

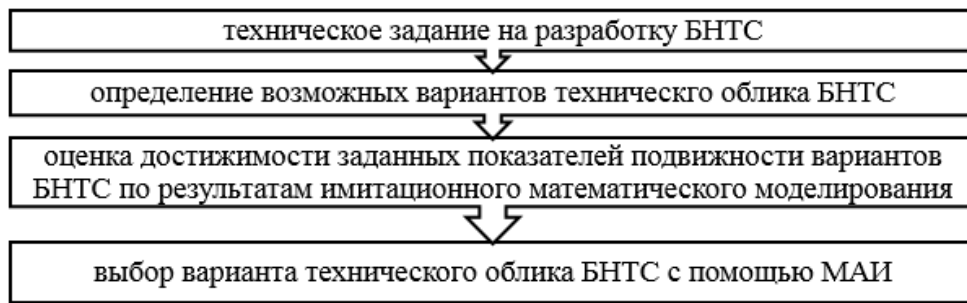


Рис. 5. Метод определения приоритетных технических решений и конструктивных параметров ходовых систем

После получения задания на проектирование БНТС перед разработчиками встают следующие задачи (рис. 6): во-первых, определение возможного перечня альтернативных вариантов конструктивных исполнений БНТС; во-вторых, выполнение имитационного математического моделирования динамики БНТС на виртуальном полигоне для оценки достижимости заданных показателей подвижности и выбор наилучшего варианта с использованием МАИ.

Разработан метод прогнозирования подвижности БНТС при преодолении препятствий и движении по дорогам и местности с использованием виртуального полигона (рис. 6).

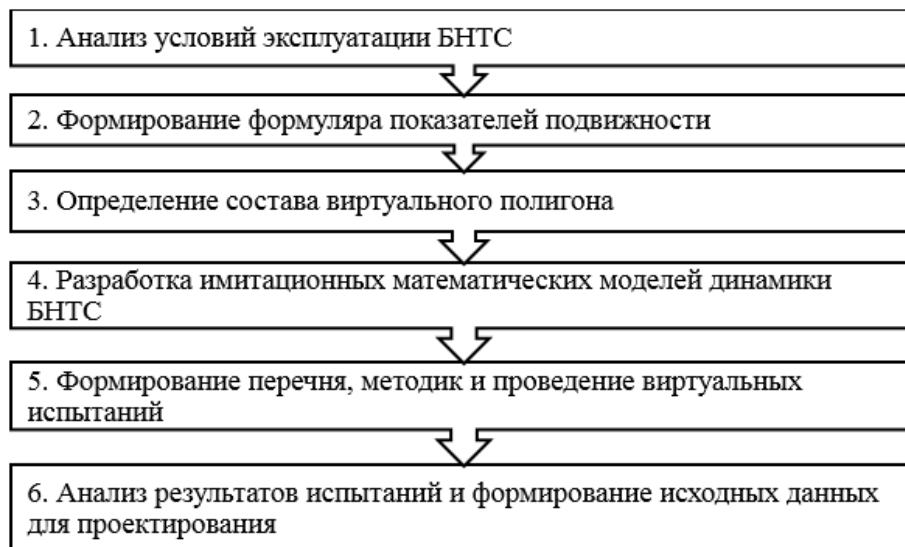


Рис. 6. Метод прогнозирования подвижности БНТС

Прогнозирование подвижности БНТС с использованием имитационного математического моделирования включает в себя комплекс мероприятий, направленных на оценку способности БНТС преодоления заданных препятствий на этапе проектирования. При этом определяются требуемые конструктивные параметры и характеристики ходовых систем БНТС для преодоления препятствий с максимально возможной энергоэффективностью.

В зависимости от функционального назначения и области применения БНТС должны быть проведены исследования условий эксплуатации, результатом которых являются:

- 1) перечень препятствий с геометрическими параметрами, преодоление которых должно обеспечить требуемый уровень подвижности;
- 2) геометрические размеры коридоров маневрирования;
- 3) физико-механические свойства опорных поверхностей, где возможно движение.

Определенные условия эксплуатации позволяют сформировать перечень значений показателей подвижности БНТС.

Для оценки подвижности в определенных условиях эксплуатации БНТС составляется формуляр показателей подвижности БНТС, табл. 1. Значения показателей назначаются в техническом задании. Их достижимость проверяется путем имитационного математического моделирования динамики БНТС при преодолении препятствий, движении по дорогам и местности.

Таблица 1

Формуляр показателей подвижности БНТС

Подвижность БНТС	Проходимость	показатели $N_1^П \dots N_K^П$
	Быстроходность	показатели $N_1^Б \dots N_L^Б$
	Автономность	показатели $N_1^А \dots N_M^А$

Для оценки подвижности БНТС в заданных условиях эксплуатации создается файловая база данных графически выполненных опорных поверхностей и препятствий с изменяемыми геометрическими и физико-механическими свойствами. Перечень препятствий и коридоров маневрирования определяется по результатам анализа условий эксплуатации и необходимых для оценки достижимости заданных показателей подвижности БНТС, зафиксированных в соответствующем формуляре. Следующим этапом в программных комплексах имитационного моделирования динамики систем тел разрабатываются математические модели БНТС с альтернативными вариантами ходовых систем.

Для проведения виртуальных испытаний разработана методика проведения вычислительного эксперимента, включающая возможные способы преодоления препятствий с варьированием скорости и направления движения БНТС (рис. 7). Вычислительный эксперимент осуществляется в программных комплексах имитационного моделирования динамики систем тел для каждого способа преодоления препятствий, определенного в методике, а также для всех альтернативных вариантов ходовых систем БНТС.

После проведения комплекса вычислительных экспериментов с успешным выполнением маневра фиксируются:

- 1) максимальная скорость выполнения маневра;
- 2) способ выполнения маневра;
- 3) требуемые характеристики энергетической установки;
- 4) нагрузочные режимы и виброударные воздействия;
- 5) затраты энергии на выполнение маневра.

Таким образом, метод прогнозирования подвижности позволяет сформировать требования к ходовым системам БНТС, к энергетической установке БНТС, к аппаратуре, находящейся на борту БНТС по стойкости к виброударным воздействиям, а также к управляющим воздействиям для выполнения маневра по преодолению препятствия.

Оценку эксплуатационных свойств БНТС на стадии проектирования целесообразно проводить методами имитационного математического моделирования, поскольку провести аналитические исследования на стадии проектирования по определению соответствующих характеристик не представляется возможным. В этой связи имитационное математическое моделирование движения БНТС в различных режимах на совокупности дорожно-грунтовых условий, а также преодоления им типовых препятствий, является основным методом исследования динамики БНТС.



Рис. 7. Методика проведения вычислительного эксперимента

Модели динамики БНТС, построенные на принципах, предложенных в работах А.С. Горобцова, В.Г. Бойкова, Д.Ю. Погорелова и др., учитывают в расчетных схемах ряд важных свойств, среди которых можно отметить: пространственный характер движения, произвольную структура расчетной схемы, различные нелинейности в характеристиках упругих и демпфирующих элементов, многомерные детерминированные и случайные возмущения, упругие свойства отдельных тел, «большие перемещения» тел.

Модели динамики обеспечивают возможность включения моделей специфических взаимодействий, например, качение эластичного колеса по различным опорным поверхностям, взаимодействие гусеничного трака с грунтом, а также нехарактерных случаев взаимодействия с опорными поверхностями, например, взаимодействие боковой поверхности шины или корпуса БНТС. В основе моделирования динамики БНТС в данных комплексах лежит их представление системой абсолютно твердых или упругих тел, связанных типовыми шарнирами и силовыми элементами.

Программная реализация математических моделей динамики БНТС была получена с использованием комплекса инвариантного моделирования динамики систем тел «Универсальный механизм». В программных комплексах смоделированы контактные движители различных конструкций путем создания сложной геометрии и расположения контактных точек. Математические модели БНТС с роторно-винтовым движителем (а), с колесно-шагающим движителем (б), с омни-колесами (в) и (г) с колесным движителем, реализующим боковое шагание, представлены на рис. 8.

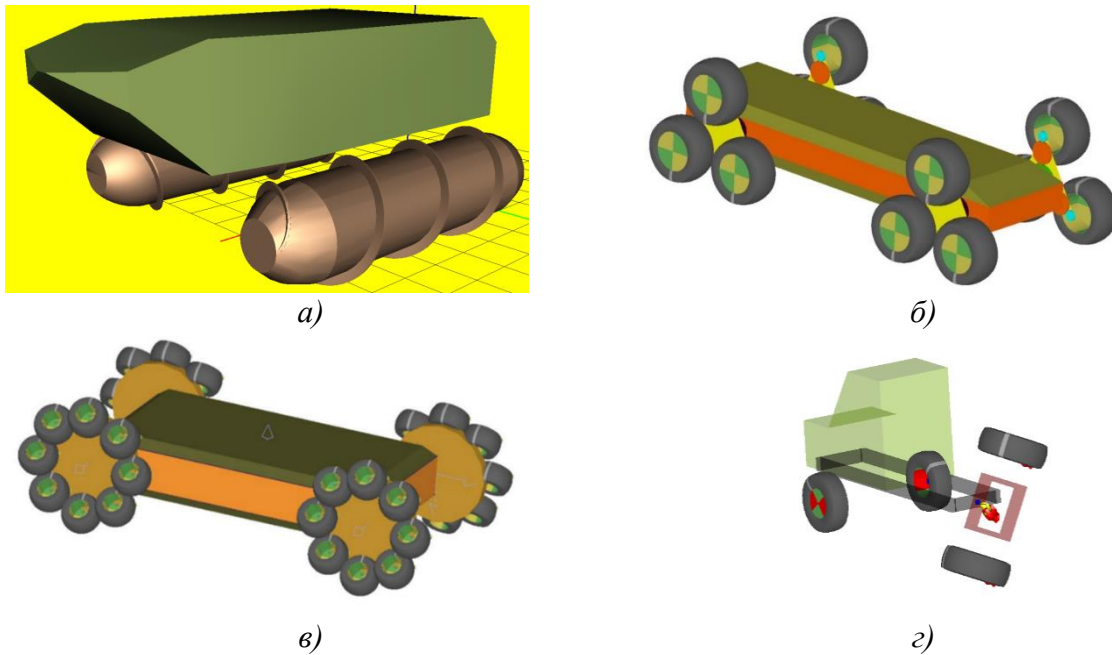


Рис. 8. Математические модели БНТС с контактными двигателями

Разработанный комплекс новых математических моделей БНТС, отличающихся возможностью моделирования «больших» перемещений и связанных с этим нехарактерных случаев взаимодействия двигателя с внешней средой, позволяет проводить теоретическое исследование подвижности.

Проведены экспериментальные исследования с целью оценки точности и адекватности математических моделей БНТС с разным конструктивным исполнением ходовых систем. Путем сравнения экспериментальных и расчетных данных, установлено, что расхождение результатов не превышает 10 %, а среднеквадратическое отклонение составляет не более 14 %. Разработанные для целей исследования математические модели движения БНТС следует считать адекватными.

Процесс проведения оценки показателя подвижности БНТС представлен на блок-схеме (рис.9).

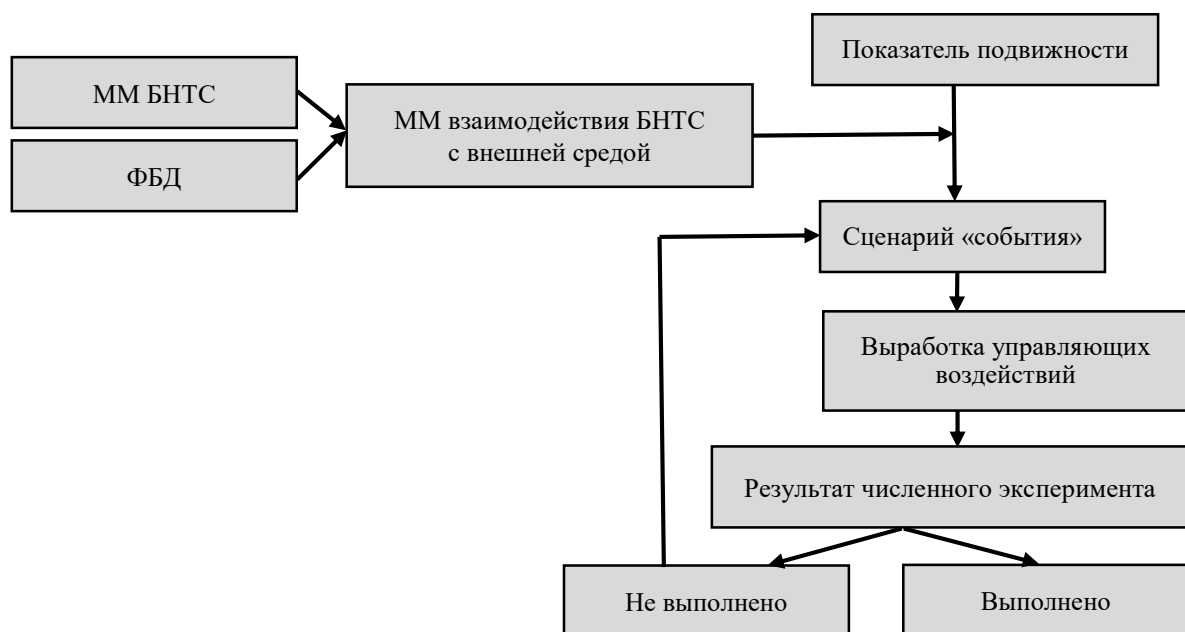


Рис. 9. Процесс проведения оценки показателя подвижности БНТС

Состав виртуальных испытаний определяется совокупностью эксплуатационных свойств, определенных в техническом задании на проектирование БНТС, а также формуляром заданных показателей подвижности.

По результатам анализа виртуальных испытаний для оценки показателей подвижности сформирована структура виртуального полигона, который состоит из файловой базы данных представлений полотна пути и препятствий. Он обладает вариативностью в части изменения геометрических характеристик, что позволяет использовать его для различного класса БНТС.

Проведены исследования удельной значимости показателей подвижности БНТС с колесным и гусеничным двигателем для условий эксплуатации, соответствующих средней полосе Европейской части территории РФ, с целью определения технического облика БНТС для заданных условий эксплуатации. Проведена экспертиза рассматриваемой проблемы на основе результатов имитационного математического моделирования с использованием шкалы относительной важности по парным сравнениям элементов иерархии.

Для первого уровня иерархии (рис. 4) матрица парных сравнений показателей оценки по степени их влияния на подвижность БНТС имеет вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Матрица парных сравнений показателей первого уровня иерархий

	Проходимость	Быстроходность	Автономность
Проходимость	1	3	3
Быстроходность	1/3	1	1/2
Автономность	1/3	2	1

Проходимость БНТС имеет умеренное превосходство над быстроходностью и автономностью, и в тоже время автономность менее умеренно превосходит быстроходность, так как БНТС должно решать задачи в условиях несовместимых с психофизиологическими возможностями экипажа и иметь достаточную автономность для решения транспортных задач, при этом скорость движения менее существенна.

Максимальное значение матрицы равно 3,054. Нормированный главный собственный вектор матрицы, определяющий приоритетность показателей, представлен в табл. 3.

Таблица 3

Приоритетность показателей, определяющих подвижность

Проходимость	Быстроходность	Автономность
0,594	0,157	0,249

Индекс согласованности IS равен 0,027. Отношение согласованности OS равно 0,047 и находится в допустимых пределах.

Таким образом, при выборе технического облика БНТС предпочтение отдается проходимости. Второе место, занимает автономность, а третье – быстроходность.

Проведено исследование приоритетности оценочных показателей низших уровней в отношении показателей высокого уровня.

Результаты синтеза локальных приоритетов элементов иерархии позволяют судить о степени влияния составляющих низшего уровня иерархии на элемент, к которому они примыкают. Однако МАИ позволяет определить и значения глобальных приоритетов элементов низших уровней на общую цель. Для этого необходимо подняться по иерархическому дереву с уровня элемента, для которого вычисляется глобальный приоритет, до первого уровня. Для рассматриваемой иерархии проблемы формирования технического облика БНТС, приоритеты показателей уровня определяются умножением значения локального приоритета на зна-

чение приоритета показателя высшего уровня, с которым они соединяются, поскольку, начиная со второго уровня, каждый элемент низшего уровня примыкает только к одному элементу вышестоящего уровня.

Результаты синтеза глобальных приоритетов показателей различных уровней, к которым примыкают элементы с уровня альтернатив, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Приоритеты критериев подвижности различных уровней

1	Опорная проходимость	0,3
2	Запас хода	0,218
3	Профильная проходимость	0,171
4	Динамичность	0,112
5	Преодоление препятствий с использованием специальных средств и свойств БНТС	0,085
6	Водоходные свойства	0,038
7	Устойчивость и управляемость	0,034
8	Техническая готовность	0,031
9	Вибронагруженность	0,011

Критерии расположены в порядке убывания влияния приоритета в достижении их общей цели – формировании технического облика БНТС, а сумма числовых значений приоритетов (удельных весов) равна единице.

Анализ приоритетов позволяет определить основные характеристики и свойства, которыми должно обладать БНТС. Так, сумма приоритетов трех показателей превосходит 0,65. Таким образом, именно опорная проходимость, запас хода и профильная проходимость определяют идеологию формирования технического облика БНТС и основные требования к его конструкции. Динамичность и преодоление препятствий с использованием специальных средств и свойств БНТС имеют примерно одинаковые приоритеты, следовательно, при формировании технического облика БНТС, им также необходимо уделить внимание. Анализ значений глобальных приоритетов оценочных показателей, полученных с использованием МАИ, важен для конструктора, поскольку они не только позволяют выбрать наилучший из альтернативных вариантов БНТС, но и определяют тенденции и основные принципы проектирования БНТС.

Для выбора наилучшего варианта технического облика рассмотрены варианты БНТС с колесным и гусеничным движителем, полученные по результатам имитационного моделирования на виртуальном полигоне (табл. 5).

Для выбора наилучшего варианта технического облика проведены парные сравнения альтернативных вариантов по показателям, представленным в табл. 4. После получения матриц суждений определены векторы локальных приоритетов альтернатив по каждому из показателей табл. 4. Затем определены глобальные приоритеты всех вариантов альтернатив БНТС путем суммирования произведений значений локальных приоритетов каждой альтернативы на глобальные приоритеты соответствующих показателей.

В результате получены следующие значения: $A_1 = 0,6149$ и $A_2 = 0,3851$. Таким образом, предпочтительнее вариант A_1 (БНТС с гусеничным движителем) по сравнению с вариантом A_2 (БНТС с колесным движителем).

Таблица 5

Варианты БНТС с колесным и гусеничным движителем

Показатели	Альтернатива А1	Альтернатива А2
Технический облик БНТС		
Давление на грунт, $кг / см^2$	0,2	1
Высота преодолеваемой стенки, $м$	1	0,8
Скорость на воде, $км / ч$	7	12
\varnothing разрушаемого дерева, $м$	0,3	0,2
Максимальная скорость, $км / ч$	60	110
Среднее квадратическое ускорение при движении, $м / с^2$	0,5	0,3
Скорость выполнения защитного маневра, $км / ч$	30	45
Запас хода, $км$	500	1000
Время технической готовности, $ч$	1	0,45

Заклучение

Обоснована совокупность эксплуатационных свойств, определяющих подвижность БНТС, отличающаяся от экипажных транспортных средств по измерителям (в части преодоления препятствий с применением специальных средств и режимов движения) и показателям, связанным с отсутствием человека на борту транспортного средства.

Установлено, что методы проектирования специально создаваемых транспортных средств для безэкипажного применения отсутствуют, а разработка новых методов определяется, прежде всего, учетом возможности «больших» перемещений, отсутствием ограничений по вибронегативности и скорости управляющих воздействий (реакции), а также описанием нехарактерных взаимодействий движителей с опорной поверхностью.

Установлено, что оценка показателей эксплуатационных свойств БНТС, определяющих подвижность, может быть выполнена путем имитационного математического моделирования движения на совокупности дорожно-грунтовых условий и при преодолении препятствий. Разработан комплекс новых математических моделей динамики БНТС в программных комплексах инвариантного моделирования динамики систем тел, отличающихся возможностью моделирования «больших» перемещений и связанных с этим нехарактерных случаев взаимодействия движителей с опорной поверхностью, позволяющий определять показатели подвижности БНТС.

Проведены экспериментальные исследования с целью оценки точности и адекватности математических моделей БНТС с разным конструктивным исполнением ходовых систем. Путем сравнения экспериментальных и расчетных данных установлено, что расхождение результатов не превышает 10 %, а среднеквадратическое отклонение составляет не более 14 %.

Разработанные для целей исследования математические модели движения БНТС следует считать адекватными.

Разработан новый метод прогнозирования подвижности БНТС с использованием имитационного математического моделирования на виртуальном полигоне, обладающем вариативностью геометрических характеристик и дорожно-грунтовых условий. Особенностью предложенного метода является комплекс вычислительных мероприятий, позволяющих уже на этапе проектирования оценить способность БНТС преодолевать заданные препятствия. При этом определяются требуемые конструктивные параметры ходовых систем БНТС для преодоления препятствий с максимальной энергоэффективностью. Для проведения виртуальных испытаний разработана методика проведения вычислительного эксперимента, включающая разнообразные способы преодоления препятствий с возможностью варьирования скорости и направления движения БНТС.

Разработан новый метод определения технического облика ходовых систем БНТС, отличающийся использованием научно обоснованной иерархии приоритетов эксплуатационных свойств, определяющих подвижность.

Проведено исследование приоритета критериев для определения технического облика БНТС с альтернативными (колесным или гусеничным) типами движителей. Определены приоритеты глобальных и локальных критериев подвижности. На основании проведенных экспертных оценок установлено, что для эксплуатации БНТС в условиях средней полосы европейской части территории Российской Федерации, приоритетность показателей, определяющих подвижность следующая: проходимость – 59,4 %; автономность – 24,9 % и быстроходность – 15,7 %. Для альтернативных вариантов БНТС с колесным и гусеничным движителем с использованием метода анализа иерархий доказано, что для обеспечения лучшей подвижности в заданных условиях эксплуатации предпочтительнее в 1,6 раза вариант с гусеничным движителем.

Совокупность научных методов разработки ходовых систем БНТС, обеспечивающих заданную подвижность, отличающихся использованием имитационного математического моделирования, позволяет решить проблему определения рациональных конструктивных параметров и оценки приоритетов технических решений на этапе проектирования.

Библиографический список

1. **Горобцов, А.С.** Управляемость многоопорного колесного транспортера / А.С. Горобцов, В.А. Шурыгин, В.А. Серов, В.О. Фирсова, А.С. Дьяков // Оборонная техника. – 2015. – № 9-10. – С. 124-128.
2. **Дьяков, А.С.** Анализ отечественного и зарубежного опыта создания безэкипажных наземных транспортных средств специального назначения / А.С. Дьяков // Труды НАМИ. – 2017. – № 4 (271). – С. 75-90.
3. **Дьяков, А.С.** Боковое шагание транспортной машины / А.С. Дьяков, Г.О. Котиев, М.В. Шивирев // Вестник машиностроения. – 2015. – № 11. – С. 86-88.
4. **Дьяков, А.С.** Научные методы проектирования ходовых систем наземных безэкипажных автономных платформ под монтаж вооружения / А.С. Дьяков // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXI Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (3–6 апреля 2018 г.). Т. 1. Вооружение, военная и специальная техника. – СПб., 2018. – С. 159-166.
5. **Дьяков, А.С.** Основы метода проектирования ходовых систем безэкипажных наземных транспортных средств / А.С. Дьяков, Г.О. Котиев // Труды НАМИ. – 2016. – № 4 (267). – С. 45-53.
6. **Дьяков, А.С.** Пути создания ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств в интересах подразделений Воздушно-десантных войск и специального назначения / А.С. Дьяков // Тенденции развития военных наземных робототехнических комплексов для подразделений Воздушно-Десантных войск и специального назначения. Материалы научно-практической конференции (РВВДКУ, 23 ноября 2017 г.) – Рязань, 2017. – С. 52-67.
7. **Дьяков, А.С.** Решение задач профильной проходимости робототехнического комплекса с колесно-шагающим движителем с помощью математического моделирования / А.С. Дьяков, В.И. Ря-

занцев, Г.Г. Анкинович // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 12. – С. 291-307.

8. **Котиев, Г.О.** Метод разработки ходовых систем высокоподвижных безэкипажных наземных транспортных средств / Г.О. Котиев, А.С. Дьяков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2016. – Т. 174, № 1. – С. 186-197.

*Дата поступления
в редакцию: 06.02.2019*

A.S. Diakov

SCIENTIFIC METHODS FOR THE DEVELOPMENT OF THE RUNNING SYSTEMS OF HIGH-MOBILE UNCOMPENDEED GROUND VEHICLES

Bauman Moscow state technical university

Purpose: Confirmation of the possibility of achieving the specified parameters of the unmanned ground vehicles (BNTS) mobility at the design stage by determining the rational design parameters of the running systems using mathematical modeling of interaction with the external environment.

Methodology: Scientific methods of development of navigation systems that provide specified rates of mobility in the design phase, wherein the prediction of the cross, the rapidity and autonomy using virtual ground and method of analysis of hierarchy to determine the rational design parameters of navigation systems, BNTS and priority technical solutions; a set of new mathematical models of BNTS dynamics, characterized by the ability to simulate «large» movements and associated non-typical cases of interaction of propellers with the support surface; a set of operational properties that determine the mobility of ground BNTS, characterized by the absence of restrictions imposed by the psycho-physiological capabilities of the crew; a method for predicting the mobility of BNTS, characterized by the use of virtual field tests; the method of formation of the technical appearance of running systems, characterized by the use of science-based hierarchy of priorities of operational properties that determine the mobility of the BNTS.

Findings: for practical use in the design of running systems of high-mobility BNTS and predicting mobility in the specified operating conditions are developed:

1. The complex of computer programs that allows to simulate the dynamics of the BNTS movement on the virtual ground and, thereby, to reduce the design time.
2. Software «Virtual polygon», which has the variability in terms of changes in the geometric characteristics and physical and mechanical properties of road and soil conditions and obstacles to use in the development of BNTS and comparative virtual tests.
3. Software for selection of priority technical solutions for running systems BNTS at the design stage using the method of analysis of hierarchies.

Limitations of research: This study serves as a starting point for further research in the field of running systems BNTS.

Originality: The scientific novelty of the work lies in the creation of a new method for the development of running systems BNTS, providing specified mobility indicators at the design stage, characterized by the prediction of patency, speed and autonomy using a virtual polygon and the method of hierarchy analysis to determine the rational design parameters of running systems BNTS and the choice of priority technical solutions.

Key words: specific ground vehicle; design methods; math modeling; virtual range; mobility; operational properties; method of analysis of hierarchies; «great» movements.