

УДК 621.85-52

ПОВЫШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Соловьев В.М., к.т.н.,

Початовский С.В., к.т.н.,

Стримовский С.В., к.т.н.

*Государственное предприятие «Харьковское конструкторское бюро
по машиностроению им. А.А. Морозова»*

Тел. (057) 757-41-45

Аннотация – в статье, на основе обзора отечественных и зарубежных научных источников, составлена унифицированная классификация наземной военной техники по назначению, определены современные модели подвижности, рассмотрены их назначение, структура и алгоритмы проведения расчета, определены направления дальнейшего их развития. Предложены методы повышения подвижности на основе использования математической модели гидротрансформатора и методов целенаправленного изменения его параметров и разработки системы автоматического управления трансмиссией.

Ключевые слова – параметры подвижности, наземная военная техника, математическая модель, гидротрансформатор, параметрический синтез, система автоматического управления коробкой передач.

Постановка проблемы. Сбалансированное сочетание таких основных качеств боевой машины, как огневая мощь, защита и подвижность, является залогом эффективного выполнения поставленной задачи в условиях современного боя.

Анализ последних исследований. На сегодняшний день одним из вариантов структурированной классификации наземной военной техники по назначению можно считать схему, представленную на рис.1.

Повышающиеся требования к техническим характеристикам современной наземной военной техники обуславливают дальнейшее развитие теории подвижности, создание новых и совершенствование существующих моделей.

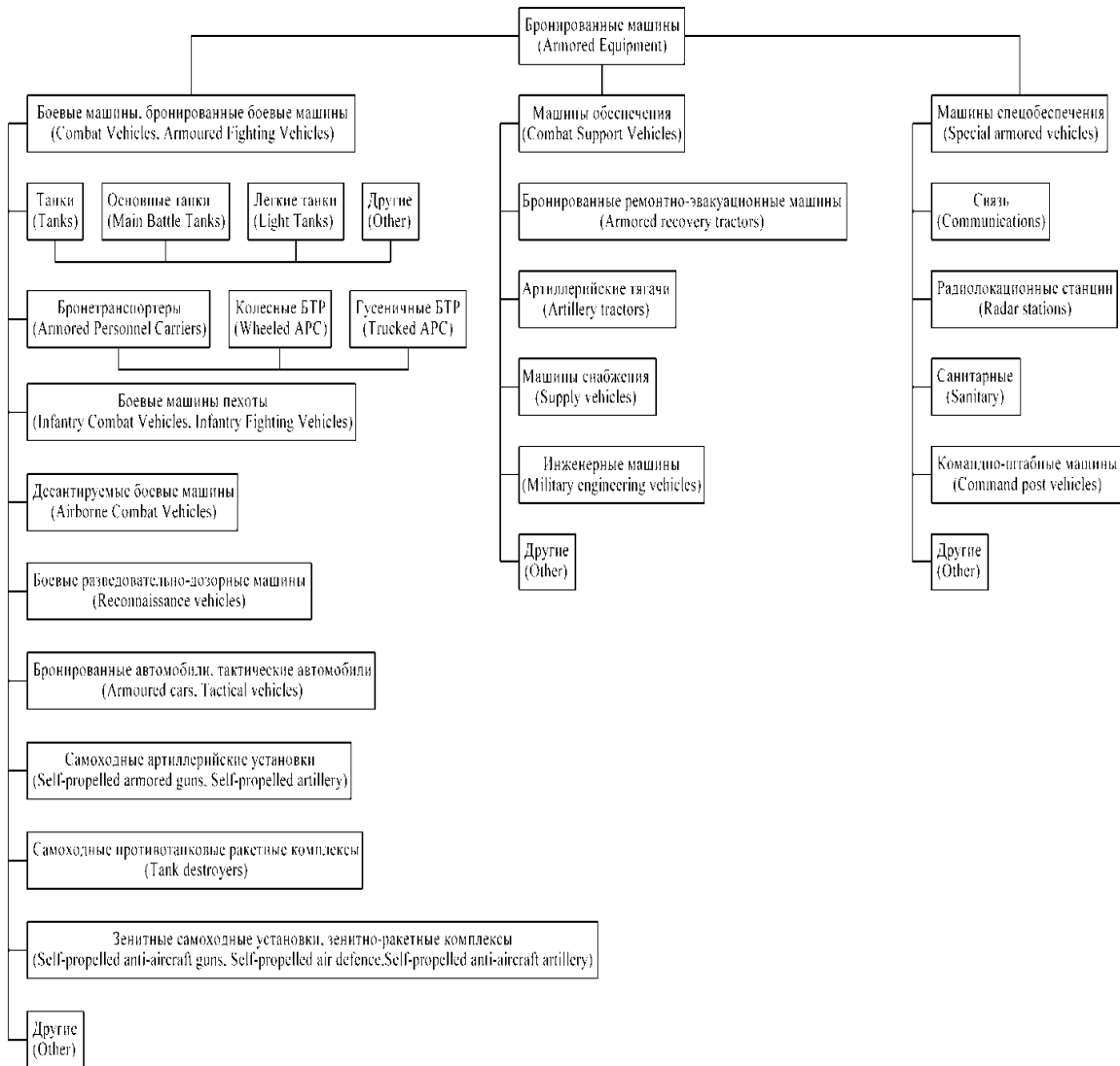


Рис. 1. Классификация наземных боевых машин

В середине 1960-х годов за рубежом было определено, что под термином «подвижность» (англ. *mobility*) следует понимать максимальную комфортную скорость транспортного средства при движении, главным образом, по пересеченной местности между двумя точками по наиболее короткому возможному маршруту [1].

Отечественное определение подвижности имеет схожую формулировку [2]: под подвижностью понимается средняя скорость движения транспортного средства из пункта А в пункт В, полученная из соотношения расстояния между точками по прямой, отнесенного к общему времени движения

$$\Pi = \frac{S}{t_D + t_3 + t_P}, \quad (1)$$

где S – расстояние между двумя точками, соединенными прямой

линией;

t_d – время движения транспортного средства;

t_z – время заправки;

t_r – время ремонта.

Также существуют несколько альтернативных формулировок термина «подвижность» [3].

В США интерес к созданию единой унифицированной методологии подвижности был обусловлен потребностями трех основных категорий будущих пользователей: разработчиков новой военной техники, ее изготовителями и поставщиками, и армии как конечного потребителя [4].

Модели АМС-71 (1971г.) и АМС-74 (1974г.). Одной из первых моделей, описывающих подвижность транспортного средства повышенной проходимости, является АМС-71 [5].

Было отмечено, что эффективность движения является функцией, зависящей от технических характеристик транспортного средства, особенностей рельефа местности и реакции водителя.

Упрощенный структурный алгоритм модели АМС-71 представлен на рис.2.

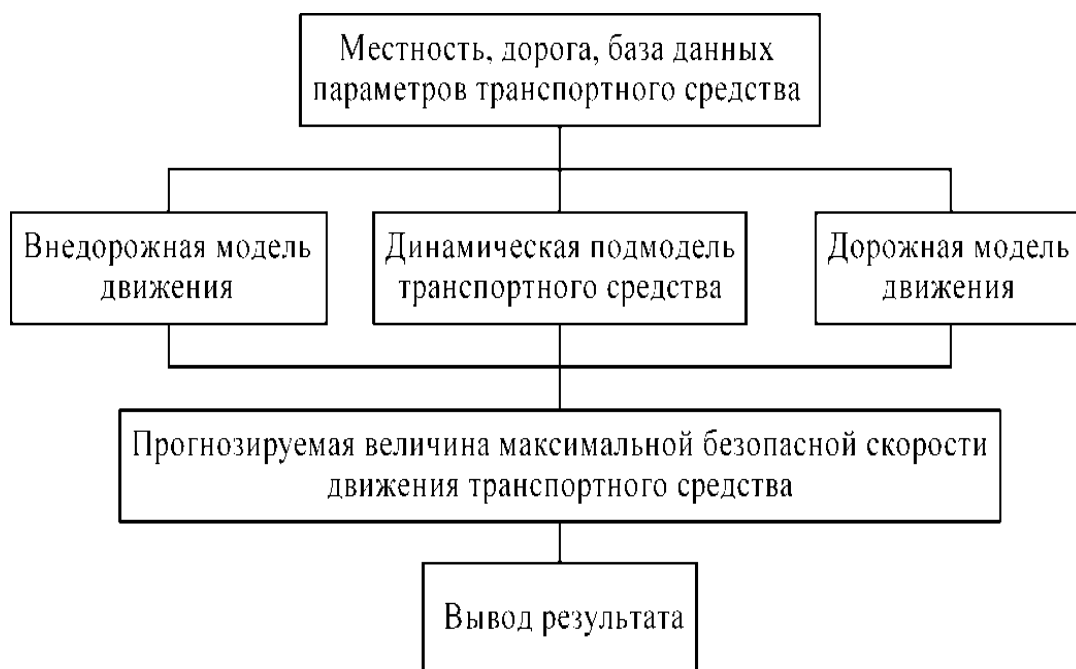


Рис. 2. Алгоритм работы модели АМС-71

В модели АМС-71 рельеф местности описывается факторами, которые потенциально могут оказать влияние на параметры движения транспортного средства. Каждая группа факторов объединяется по количественному признаку в массив, образуя блок местности или ареал. Ареал участков включает 13 характеристик, которые отражают тип

поверхности: наклон, преобладающая высота неровностей, отдельные препятствия, растительные преграды и др. Водные преграды описывают 9 характеристик, такие как тип дна, его сечение и прочность, глубина и скорость потока, и др. Участок движения по дорогам общего назначения описывается пятью характеристиками поверхности: тип дороги, прочность, наклон и кривизна дорожного полотна, величина неровностей.

Отмечается, что многообразии существующих транспортных средств и параметров местности, образуя сложнейшие комбинации, требуют проведения расчетов для каждого взаимодействия «местность - транспортное средство». В модели АМС-71 эти взаимодействия эмулируются подмоделями, составляющими внедорожный модуль местности.

Основные структурные компоненты, входящие в алгоритм модуля местности, представляют собой серию отдельных взаимосвязанных подмоделей, которые содержат соотношения, предназначенные для моделирования взаимодействий в системе автомобиль – местность – водитель. Подмодели используют теоретические и эмпирические зависимости, которые могут корректировать теоретическую скорость движения транспортного средства с целью моделирования влияния местности на подвижность транспортного средства.

Функционально подмодели имитируют:

- силовой агрегат и трансмиссию;
- грунт и его наклон;
- видимость;
- геометрию препятствий, силу тяги;
- объезд препятствий;
- маневрирование;
- разгон и торможение.

Отдельно вынесена подмодель динамики движения транспортного средства.

В модели АМС-71 приняты следующие допущения:

- во всех подмоделях, за исключением подмодели объезда препятствий, предполагается, что транспортное средство движется по прямой линии;
- местность состоит из отдельных участков с параметрами, которые могут быть описаны в количественном выражении;
- водитель может снижать скорость движения для сохранения комфортных условий вождения;
- движение рассматривается как двухмерная задача без учета продольных и поперечных наклонов машины;
- препятствия преодолеваются фронтально, под прямым углом;
- поверхность дороги, неровности, шины рассматриваются как

абсолютно твердые тела;

- характеристики подвижности для транспортного средства определяются на основе полученных ранее данных для аналогичной машины;

- не учитывается скольжение (занос) машины.

Было проведено сравнение предложенной модели подвижности с экспериментальными данными, полученными при исследовании пяти боевых машин армии США: колесного небронированного тактического автомобиля повышенной проходимости M151, грузового автомобиля M35A2, гусеничного бронетранспортера M113A1, танков M48 и M60. В результате было получено расхождение численных и экспериментальных данных до 30,1% с указанием о возможности уменьшения расхождения до 15% в случае введения в модель более точной геометрии рельефа местности. Апробация модели была проведена в 1971-74 гг. тремя подразделениями армии США: U.S. Army Tank Automotive Command (TACOM), U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) и U.S. Army Engineer Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL).

Результатом дальнейшего развития модели АМС-71 является АМС-74 [6].

Модели NRMM (1979 г.) и NRMM2 (1992 г.). Двумерная модель подвижности NATO Reference Mobility Model (NRMM) [1] представляет собой набор уравнений и алгоритмов, предназначенных для имитации движения транспортных средств по пересеченной местности.

Модель NRMM разработана с учетом ранее созданных моделей АМС-71 и АМС-74. В модели NRMM также внедрена замена существующего рельефа местности на отдельные участки с различными характеристиками, совокупность которых образует мозаичную карту местности с допущением, что в пределах каждого из участков характеристики местности являются однородным и их незначительными изменениями можно пренебречь. Помимо величины максимальной скорости движения, модель рассчитывает данные, которые могут быть использованы для прогнозирования эксплуатационных уровней вибрации, расхода топлива и пр.

В основе модели NRMM лежат три основных вычислительных модуля, каждый из которых содержит как аналитические, так и эмпирические зависимости:

- **модуль местности:** определяет максимальную скорость движения транспортного средства в пределах участка пересеченной местности с заданными характеристиками;

- **модуль водного препятствия:** определяет минимальное время для пересечения локальной водной преграды: канава, ручей и т.д.;

- **дорожный модуль:** определяет максимальную скорость при

движении по участку дороги общего пользования.

Подготовка исходных данных для NRMM: местность. Каждый участок местности для любого момента времени описывают 22 параметра местности. Для задания характеристик водной преграды используются 10 параметров, для задания характеристик автомобильных дорог – 9 параметров. Вводятся следующие характеристики местности:

- состав поверхности, тип, прочность;
- геометрия поверхности: наклон, высота над уровнем моря, локальные препятствия, неровности, кривизна дороги, ширина дороги, возвышение дороги;
- растительность: размер и площадь;
- водная преграда: сечение, скорость и глубина потока и др.

Технические параметры транспортного средства: вводятся геометрические, инерционные и механические характеристики.

Модель NRMM содержит динамический модуль VEHNDYN и модуль препятствий OBS78B. Оба модуля могут работать самостоятельно и получают исходные данные от модуля технических параметров транспортного средства.

Динамический модуль VEHNDYN вычисляет величины ускорения или замедления на рабочем месте водителя (или в другой точке транспортного средства) при движении с заданной скоростью в границах участка местности. В качестве возможных ограничений водителем скорости транспортного средства динамический модуль VEHNDYN имеет возможность учета двух факторов:

- величины вибраций на рабочем месте водителя;
- подготовку к преодолению препятствия.

Также имеется модуль исходных данных транспортного средства VDP (Vehicle Data Preprocessor), который осуществляет три функции:

- преобразование входных данных транспортного средства в систему измерений, принятую в США (дюймы, фунты и т.д.);
- выполняет расчет предварительных параметров движения, параметров сцепления;
- проводит расчет величины тягового усилия и скоростных характеристик.

Модуль препятствий OBS78B имитирует наклон транспортного средства, его положение на карте, препятствия, вектор тягового усилия. Процесс пересечения насыпи или канавы происходит путем замены преграды на геометрический аналог трапецевидной формы. Также модуль может определять ряд положений статического равновесия автомобиля, составлять таблицу минимальной величины клиренса для заданного маршрута движения.

Водитель. Закладываемые в модель навыки водителя характеризуют его индивидуальные особенности с точки зрения порога терпимости к величине толчков и вибраций, способности воспринимать и реагировать на визуальные стимулы, в т.ч. при выполнении боевых задач, и, в конечном итоге, оказывающих влияние на его поведение.

Дополнительный модуль модели NRMM называется «Сценарий», в котором доступно задание следующих функций:

- время года, т.е. время, когда сезонные различия в прочности грунта играют значительную роль при составлении компьютерной карты участка местности. Модель позволяет выбрать характеристики грунта в соответствии с сезоном и с учетом влияния, которое оказывает погода;

- видимость, влажность и вероятность движения юзом для участка местности, в том числе для сухого снега и льда;

- несколько дополнительных индивидуальных особенностей водителя, такие как поведенческая стратегия и манера вождения;

- учет величины давления в шинах в зависимости от типа местности: дорога, пересеченная местность, песок.

Порядок проведения расчета

1. Технические характеристики автомобиля измеряются, рассчитываются или назначаются по аналогии, проводится ввод исходных данных в файлы;

2. Данные о рельефе местности измеряются, рассчитываются или назначаются по аналогии, и вводятся в файлы исходных данных;

3. Данные о препятствиях и неровностях из файлов данных рельефа местности используются для ввода базовых значений в модуль предварительного расчета;

4. Модуль VEHNDYN, используя файл технических характеристик транспортного средства и файл профиля местности, проводит задание величины неровностей, высоты или области препятствий. Проводится расчет мгновенной величины скорости и потребляемой мощности;

5. Для каждого препятствия модуль OBS78B рассчитывает минимальный клиренс, максимальное усилие преодоления и среднее усилие. Полученные данные являются частью исходных данных для операционного модуля;

6. Параметры автомобиля вместе с полученными ранее результатами включаются в файл исходных данных;

7. Создается файл контроля сценария;

8. На основе использования данных, полученных в п. 2, 6 и 7, запускаются оперативные расчетные модули.

Результат расчета. В результате расчета полученные данные записываются в файл, в котором для каждой точки маршрута была опреде-

лена скорость движения, средняя скорость движения, величины ускорения или замедления и другие данные.

В 1992 г. комитет NRMM Technical Management Committee одобрил изменения и дополнения к модели, предложенные в период с 1979 по 1991гг. и утвердил выпуск второй редакции модели – NRMM2 [7]. Изменения были введены и для динамического модуля VENDDYN, который первоначально был разработан для АМС-74 [8]. В 1986 г. модуль VENDDYN был перепрограммирован и получил название VENDDYN II. Блок-схема модуля VENDDYN II представлена на рис. 3.

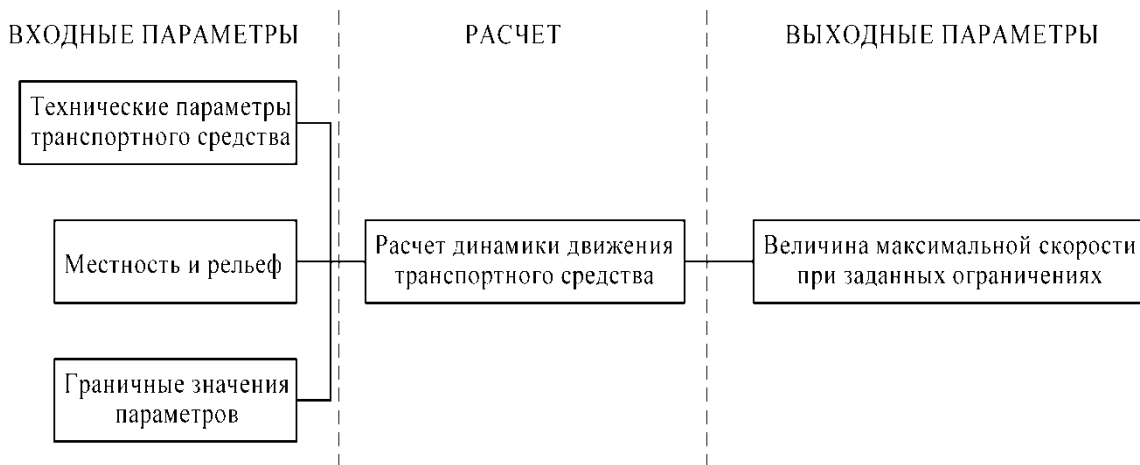


Рис. 3. Блок-схема модуля VENDDYN II

Также был доработан модуль преодоления препятствий OBS78B, который, также как и VENDDYN II, является двумерным (рис. 4).



Рис. 4. Блок-схема модуля OBS78B

Развитие получил и основной модуль расчета NRMM Main Module, предназначенный для определения максимальной эффективной скорости (рис. 5).

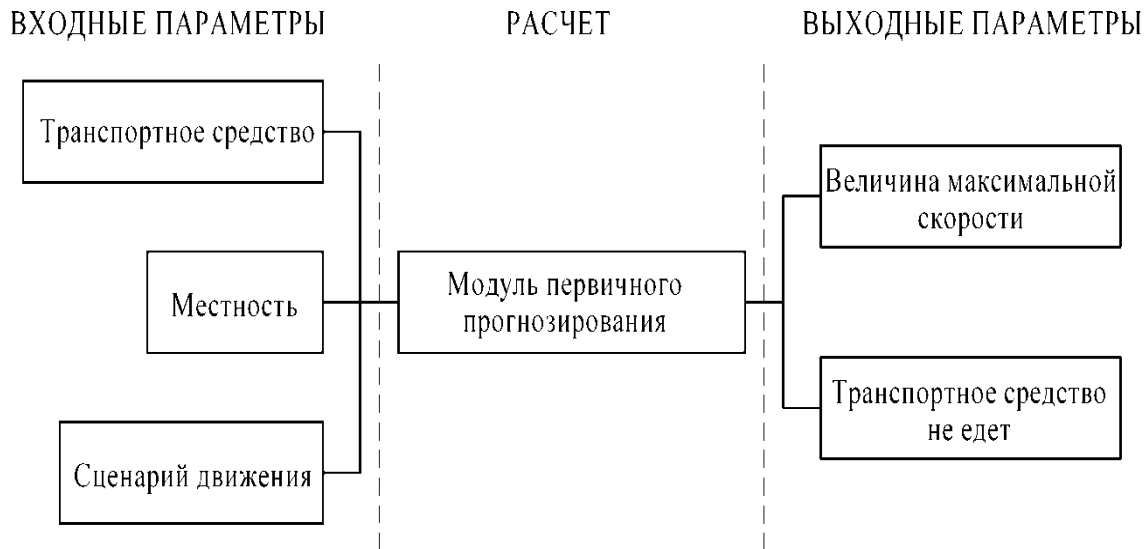


Рис. 5. Блок-схема модуля первичного прогнозирования (NRMM Main)

В 1993 г. представлен доклад [9], в котором для модели подвижности NRMM2 было предложено перейти от детерминированной (предопределенной) модели прогнозирования к стохастической (случайной) модели. Результаты исследований показали, что получаемые данные в основном верны, и что стохастические методы с некоторой погрешностью результата могут быть использованы для решения подобных задач.

В 1994 г. исследовательская станция U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) совместно с Nevada Automotive Test Center (NATC) провели полигонные испытания следующих транспортных средств: тактического автомобиля M1025 (HMMWV), военного грузового автомобиля M923A1, ходового макета ремонтной машины на базе грузового автомобиля MTVR, гусеничного вездехода BV206, с последующим выполнением прогнозирования параметров их подвижности на основе использования модели NRMM2 [7]. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показало значительное влияние показателей рельефа местности и технических характеристик транспортного средства, вводимых в качестве исходных данных, на прогнозируемые параметры подвижности и подтвердило ранее заявленные точности прогнозирования. Был сделан вывод о необходимости дальнейшего улучшения алгоритмов модели подвижности NRMM2.

В 1999 г. лаборатории U.S. Army Research Laboratory (ARL) было поручено выполнить расчет параметров подвижности с использо-

ванием модели NRMM2 и провести полигонные испытания для экспериментальной беспилотной колесной транспортной платформы [8]. Ввиду того, что NRMM2 не поддерживает моделирование транспортного средства без водителя, для дальнейшего проведения исследования было решено выполнить прогноз параметров мобильности, как для транспортного средства с водителем. С целью проведения сравнительной оценки получаемых данных, в исследование был включен многоцелевой тактический автомобиль HMMWV. Полученные показатели подвижности для беспилотной платформы показали снижение средней развиваемой скорости на 2-4 мили/ч по сравнению с тактическим автомобилем HMMWV. Также было установлено, что платформа обеспечивает среднюю скорость движения 25-30 миль/ч при необходимой скорости 20 миль/ч.

Модель SAMMS (1987 г.). Оперативно-тактическая модель подвижности SAMMS (Condensed Army Mobility Model System) [10] предназначена для оценки параметров подвижности транспортного средства в условиях боя. Модель прогнозирует параметры транспортного средства при движении по пересеченной местности, дорогам общего пользования, во время выполнения маневра, при пересечении воронок, проводит интерактивную оценку маршрута движения, определяет потенциальные зоны посадки или высадки десанта и пр.

Особенностью SAMMS является возможность корректирования характеристик почвы на основе текущих погодных условий. Модель содержит характеристики для 16 типов почвы, шесть классов влажности местности (засушливая, сухая, средняя, мокрая, насыщенная, заболоченная) и три типа погоды (сезонная, текущая, по прогнозу).

Численное моделирование AdamsMBS (1999 г.) и симуляционный метод VES (2002 г.).

На основе использования программы численного моделирования AdamsMBS в 1999 г. проведена оценка параметров подвижности транспортного средства, в частности рассмотрено влияние полуактивной и активной систем подвесок для БТР Boxer с колесной формулой 8x8 на параметры движения [11]. Результаты моделирования показали, что максимальное вертикальное ускорение и другие перемещения корпуса БТР могут быть уменьшены благодаря применению управляемой подвески.

В 2002 г., в рамках совместной работы U.S. Army Tank Automotive Research Development and Engineering Center и U.S. Army Corps of Engineers с целью дальнейшего совершенствования существующих

методов определения параметров подвижности наземных транспортных средств армии США был предложен компьютерный симуляционный метод моделирования, который получил название Virtual Evaluation Suite (VES) [12].

Метод использования переменных данных FLM (2011г.). В 2011г. предложен новый подход для определения подвижности, основанный на использовании нечетких переменных (fuzzy logic), которые принимают значения в промежутке от 0 до 1, изменяясь в диапазоне от абсолютно верного значения до полностью ложного [13]. Модель получила название fuzzy logic mobility (FLM). Сообщается, что FLM модель подвижности нетребовательна к вычислительным ресурсам и минимизирует время для проведения расчета параметров подвижности.

Модель подвижности на основе GPS-данных навигации (2012 г.). Сообщается, что в связи с появлением новых образцов военной техники с основной силовой установкой гибридного типа и электро-трансмиссией возникла необходимость в проведении оценки этих машин с целью определения их основных характеристик в различных условиях эксплуатации для улучшения топливной экономичности и снижения заметности [14]. Предложен новый подход, основанный на использовании системы спутниковой навигации GPS. Очевидно, что при наложении координат нахождения транспортного средства на цифровую топографическую карту местности могут определяться такие данные как особенности рельефа, высота над уровнем моря и пр. Дополнив географические данные сведениями о времени года, климатических и дорожных условиях, полученная информация вводится в модель подвижности, тем самым расширяя ее функциональность и повышая точность расчета. Помимо получаемых географических координат в качестве исходных данных модель использует динамические характеристики автомобиля, такие как сопротивление движению, гравитационная постоянная, линейная инерция, инерция при повороте и аэродинамическое сопротивление с целью прогнозирования ряда параметров, в том числе величины мощности, затрачиваемой для движения. Была проведена экспериментальная верификация разработанной модели, в качестве объектов были выбраны БТР Stryker и гражданский автомобиль Chevrolet Equinox. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составило не более 21%.

Зимние модели (модули) подвижности. Представленный в 1995 г. доклад [15] содержит описание процедур прогнозирования, вклю-

ченних в модель подвижности САММС для описания взаимодействия автомобиля с опорной поверхностью для зимы: свежеснеженный снег; утрамбованный снег, лед, оттаивающая почва и их комбинации.

В 2012 г. представлена статья [16], в которой предложен подход для определения сопротивления движения колесной машины по заснеженному склону с учетом скорости движения, радиуса поворота и влияния силы сопротивления подъему. Полученные данные могут быть использованы в качестве основных или дополнительных исходных данных для модели подвижности.

Формулирование целей статьи (постановка задания). Анализ публикаций показывает, что в настоящее время теория подвижности оперирует элементами «транспортное средство – местность – водитель» как в условиях ведения боя, так и при отсутствии соприкосновения с противником. Также под общепринятым термином «подвижность» может пониматься средняя скорость движения, полученная как отношение расстояния по прямой между начальной и конечной точками маршрута к времени, затраченному на движение. Методы повышения подвижности применяются для увеличения параметров подвижности и снижения затрат на проведение полигонных испытаний при создании новых или модернизации существующих наземных боевых машин.

Термин «подвижность транспортного средства» является широким комплексным понятием, который характеризуются следующими основными составляющими: быстроходность (максимальная, средняя, минимальная устойчивая скорости движения и др.), динамичность (время разгона/торможения и др.), маневренность или управляемость (поворотливость, устойчивость движения и др.), проходимость (опорная, габаритная, плавучесть и др.), плавность хода (определяется параметрами подвески), эргономичность, запас хода по топливу и маслу без дозаправки.

Цель работы – усовершенствовать методы повышения подвижности транспортного средства на основе использования математической модели гидротрансформатора.

Основная часть. Из общей цепочки подвижности «транспортное средство – местность – водитель» выделим элемент, которым, главным образом, оперируют разработчики наземной военной техники – «транспортное средство». В свою очередь, «транспортное средство» включает следующие основные составляющие: «двигатель – трансмиссия – ходовая часть». На сегодняшний день специалистами

ГП «ХКБМ» накоплен достаточный опыт по повышению параметров подвижности за счет внедрения компактных силовых установок повышенной мощности как для колесных [17], так и для гусеничных [18] машин, элементов ходовой части [19], определены направления дальнейшего совершенствования современных трансмиссий [20].

Внедрение гидромеханической трансмиссии. Одним из методов повышения параметров подвижности, который используется для увеличения быстроходности транспортного средства, является внедрение трансмиссии с комплексным гидродинамическим трансформатором крутящего момента: с ростом величины коэффициента трансформации на пусковом режиме происходит увеличение значения максимального ускорения [22], что позволяет повысить динамические характеристики транспортного средства.

Комплексный гидротрансформатор, благодаря бесступенчатому изменению величины крутящего момента в зависимости от нагрузки позволяет уменьшить число переключений передач и автоматически изменить тяговое усилие на ведомом звене в зависимости от характеристик преодолеваемого препятствия. Также замена жесткой силовой связи между двигателем и коробкой передач на гидродинамическую энергию движения потока рабочей жидкости позволяет сгладить как крутильные колебания двигателя, так и динамические колебания, вызванные движением по неровностям и передающиеся на элементы трансмиссии. Перечисленные достоинства, а также относительно высокий максимальный КПД (до 92% при работе в режиме гидромукты) позволяют повысить среднюю скорость движения по пересеченной местности и увеличить срок службы двигателя и элементов трансмиссии [21]. Для обеспечения высоких показателей быстроходности транспортного средства при движении по дорогам общего назначения предусматривается принудительная блокировка насосного и турбинного колес гидротрансформатора.

При внедрении гидротрансформатора в трансмиссию должны быть определены внешние и внутренние характеристики гидротрансформатора, проведено совмещение внешних характеристик гидротрансформатора с внешней характеристикой двигателя и трансмиссией. Для оптимального решения данных задач служат математическая модель гидротрансформатора и методика изменения внешней характеристики гидротрансформатора за счет колеса реактора.

Математическая модель гидротрансформатора предназначена для определения параметров внешних и внутренних характеристик

работы гидротрансформатора на основе его геометрических данных. Модель основана на использовании усовершенствованного уравнения баланса гидравлической энергии с дополнительной возможностью дифференцированного задания коэффициентов ударных потерь ψ_m для каждого из рабочих колес при наличии соответствующих экспериментальных кривых $\psi_m = f(i)$.

Уравнение баланса в безразмерном виде:

$$\dot{A} \cdot \phi^2 + \hat{A} \cdot \phi + \tilde{N} = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{A} = & \frac{-(1-\eta_{ia}^*)}{(\phi^*)^2} \cdot \left(Kz_{\gamma} - \phi^* \cdot \left(\operatorname{ctg} \beta_{21} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{23} \cdot \sigma_{zP} \cdot \tau_{23}}{B_{23}} \right) \right) \frac{\psi_1}{2} \cdot \left[\frac{\operatorname{ctg} \beta_{11} \cdot \tau_{11}}{\rho_{11} \cdot B_{11}} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{23} \cdot \sigma_{zP} \cdot \tau_{23}}{\rho_{11} \cdot B_{23}} \right]^2 - \\ & \frac{\psi_2}{2} \cdot \left[\frac{\operatorname{ctg} \beta_{12} \cdot \tau_{12}}{\rho_{12} \cdot B_{12}} - \frac{\operatorname{ctg} \beta_{21}}{\rho_{12}} \right]^2 - \frac{\psi_3}{2} \cdot \left[\frac{\operatorname{ctg} \beta_{13} \cdot \tau_{13}}{\rho_{13} \cdot B_{13}} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{22} \cdot \tau_{22}}{\rho_{13} \cdot B_{22}} \right]^2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} B = & -\operatorname{ctg} \beta_{21} \cdot \frac{\operatorname{ctg} \beta_{23} \cdot \sigma_{zP} \cdot \tau_{23}}{B_{23}} + i \cdot \left(\operatorname{ctg} \beta_{21} - \frac{\operatorname{ctg} \beta_{22} \cdot \tau_{22}}{B_{22}} \right) + \psi_1 \cdot \left(\frac{\operatorname{ctg} \beta_{11} \cdot \tau_{11}}{B_{11}} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{23} \cdot \sigma_{zP} \cdot \tau_{23}}{B_{23}} \right) - \\ & - \psi_2 \cdot (Kz_{\gamma} - i) \cdot \left(\frac{\operatorname{ctg} \beta_{12} \cdot \tau_{12}}{\rho_{12} \cdot B_{12}} - \frac{\operatorname{ctg} \beta_{21}}{\rho_{12}} \right) + \psi_3 \cdot \frac{\rho_{22}^2}{\rho_{13}} \cdot i \cdot Kz_{\phi} \cdot \left(\frac{\operatorname{ctg} \beta_{13} \cdot \tau_{13}}{\rho_{13} \cdot B_{13}} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{22} \cdot \tau_{22}}{\rho_{13} \cdot B_{22}} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$C = Kz_{\gamma} \cdot (1-i) + \rho_{22}^2 \cdot i^2 \cdot Kz_{\phi} - \frac{\psi_1}{2} \cdot \rho_{11}^2 - \frac{\psi_2}{2} \cdot [Kz_{\gamma} - i]^2 - \frac{\psi_3}{2} \cdot \frac{\rho_{22}^4}{\rho_{13}^2} \cdot i^2 \cdot Kz_{\phi}^2, \quad (5)$$

где $B_{mn} = b_{mn}/b_{21}$ – относительная ширина проточной части гидротрансформатора в меридиональном сечении;

$\tau_{mn} = \chi_{mn}/\chi_{21}$ – относительная величина стеснения потока лопатками;

β_{mn} – угол лопаточной системы гидротрансформатора, град.;

$\rho_{mn} = r_{mn}/r_{21}$ – относительный радиус положения кромки лопаточной системы гидротрансформатора на средней линии тока;

Kz_n, Kz_t, σ_{zP} – коэффициенты учета конечного числа лопаток насосного, турбинного и реакторного колес, соответственно;

m – обозначение входа или выхода из лопаточной системы гидротрансформатора: 1 – вход, 2 – выход;

n – обозначение лопаточной системы: 1 – насосное колесо, 2 – турбинное колесо, 3 – колесо реактора.

Коэффициент скорости ϕ_{21} на выходе из насосного колеса

$$\varphi_{21} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \quad (6)$$

Определение меридиональной скорости на выходе из насосного колеса проводится по уравнению

$$Cm_{21} = \varphi_{21} \cdot U_{21}, \quad (7)$$

где U_{21} – величина окружной скорости на выходе из насосного колеса, м/с.

Значение расхода, м³/с

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r_{21} \cdot b_{21} \cdot Cm_{21}. \quad (8)$$

К основным параметрам внешней характеристики гидротрансформатора, которые определяют его совместную работу с двигателем и трансмиссией транспортного средства, относят:

- значения моментов на насосном M_1 , турбинном M_2 и реакторном M_3 колесах:

$$M_1 = -\frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot r_{21}^2 \omega_1 \cdot \left[Kz_n - \varphi_{21} \left(\rho_{21} \operatorname{ctg} \beta_{21} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{23} \cdot \sigma_{zP} \cdot \tau_{23}}{B_{23}} \right) \right]; \quad (9)$$

$$M_2 = -\frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot r_{21}^2 \omega_1 \cdot \left[-Kz_n + \rho_{22}^2 i Kz_m + \varphi_{21} \cdot \left(\operatorname{ctg} \beta_{21} - \frac{\operatorname{ctg} \beta_{22} \cdot \tau_{22}}{B_{22}} \right) \right]; \quad (10)$$

$$M_3 = -\frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot r_{21}^2 \omega_1 \cdot \left[-\rho_{22}^2 i Kz_m + \varphi_{21} \cdot \left(\frac{\operatorname{ctg} \beta_{23} \sigma_{zP} \tau_{23}}{B_{23}} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{22} \tau_{22}}{B_{22}} \right) \right]; \quad (11)$$

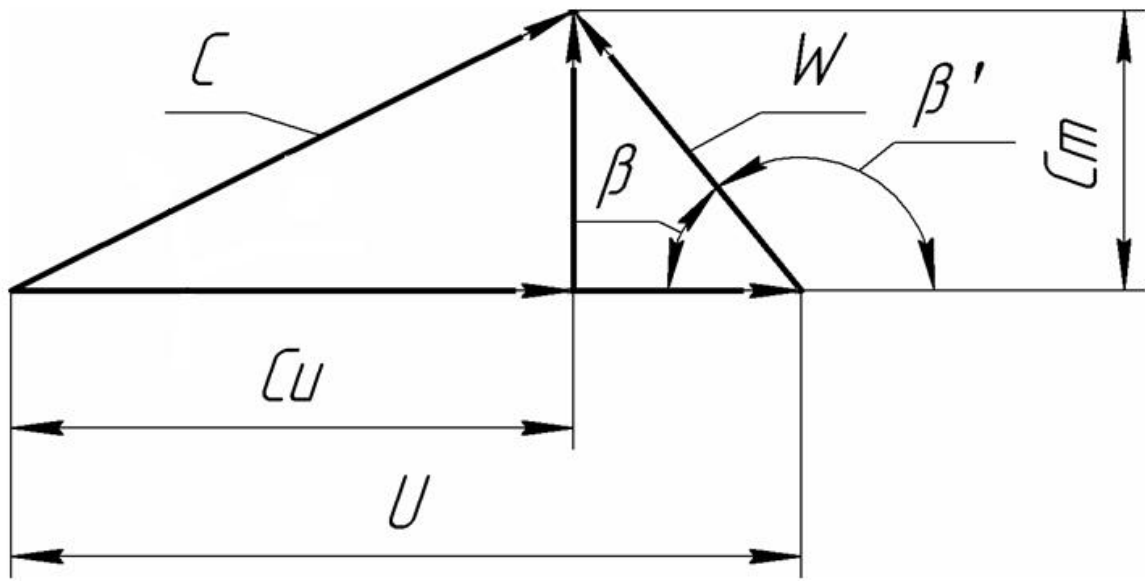


Рис.6. Треугольник скорости

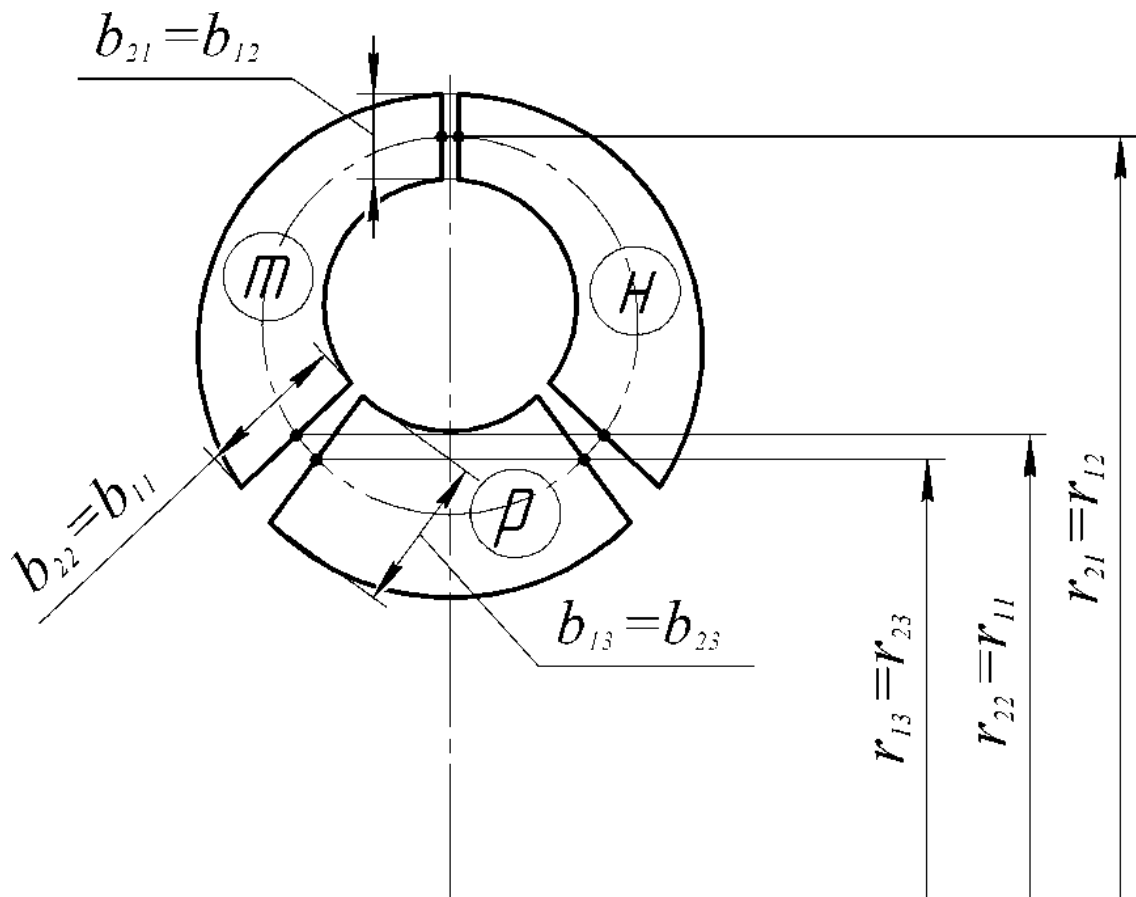


Рис.7. Расположение радиусов и ширины канала вдоль средней линии тока в проточной части гидротрансформатора

- коэффициент трансформации

$$K = -\frac{\overline{\Delta\Gamma_2}}{\overline{\Delta\Gamma_1}}, \quad (12)$$

где безразмерные разности циркуляций насосного $\overline{\Delta\Gamma_1}$ и турбинного колес $\overline{\Delta\Gamma_2}$ соответственно равны:

$$\overline{\Delta\Gamma_1} = Kz_n - \varphi_{21} \cdot \left(\rho_{21} \operatorname{ctg} \beta_{21} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_{23} \cdot \sigma_{zP} \cdot \tau_{23}}{B_{23}} \right); \quad (13)$$

$$\overline{\Delta\Gamma_2} = -Kz_n + \rho_{22}^2 i Kz_m + \varphi_{21} \cdot \left(\operatorname{ctg} \beta_{21} - \frac{\operatorname{ctg} \beta_{22} \cdot \tau_{22}}{B_{22}} \right); \quad (14)$$

- коэффициент полезного действия гидротрансформатора

$$\eta = K \cdot i, \quad (15)$$

где i - передаточное отношение гидротрансформатора

$$i = \frac{n_2}{n_1}, \quad (16)$$

где n_1 - частота вращения насосного колеса, мин^{-1} ;

n_2 - частота вращения турбинного колеса, мин^{-1} ;

- коэффициент прозрачности Π

$$\ddot{i} = \frac{\dot{I}_{10}}{\dot{I}_{1i}}, \quad (17)$$

где M_{10} - момент насосного колеса на пусковом режиме, Нм;

M_{1m} - момент насосного колеса на муфтовом режиме, Нм.

Приведенная математическая модель может применяться для расчета параметров одноступенчатых трехколесных гидротрансформаторов конструктивного исполнения Allison, Voith, Trillock, Twin-Disc и др.

Методика изменения внешней характеристики гидротрансформатора. На основе проведения оптимизации углов лопатки колеса реактора предложен подход, позволяющий проводить изменение параметров внешних и внутренних характеристик гидротрансформатора в требуемом направлении [23].

Использование при оптимизации параметров внешней характеристики гидротрансформатора в качестве целевой функции коэффициента трансформации на пусковом режиме K_0 , обусловлено его влиянием на значение величины ускорения a при разгоне транспортного средства [22].

В неявном виде уравнение для K_0 является сложной функцией двух независимых переменных - углов входа β_{13} и выхода β_{23} колеса

реактора (рис. 8)

$$K_o = f(\varphi_0(\beta_{13}, \beta_{23}), \beta_{23}). \quad (18)$$

Для определения экстремума функции K_o продифференцируем целевую функцию по каждой из переменной

$$\begin{cases} \frac{dK_o}{d\beta_{13}} = \frac{\partial K_o}{\partial \varphi_0} \cdot \frac{d\varphi_0}{d\beta_{13}} \\ \frac{dK_o}{d\beta_{23}} = \frac{\partial K_o}{\partial \varphi_0} \cdot \frac{d\varphi_0}{d\beta_{23}} + \frac{\partial K_o}{\partial \beta_{23}} \end{cases}; \quad (19)$$

приравняем уравнения системы к нулю

$$\begin{cases} \frac{dK_o}{d\beta_{13}} = 0 \\ \frac{dK_o}{d\beta_{23}} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

и, подставив значения геометрических параметров изменяемого гидротрансформатора, найдем решение. Оно может быть получено как аналитически, так и методом полного перебора.

В качестве примера получения решения возьмем серийно выпускаемый гидротрансформатор ГТК XV.

Задаются интервалы значений для переменных, которые принимаются в соответствии с рекомендациями [24]: $\beta_{13} = 40 \dots 160^\circ$; $\beta_{23} = 19 \dots 120^\circ$, шаг дискретизации принимается равным $\Delta\beta_{m3} = 1^\circ$. Выполняется проверка на отсутствие разрывов для всех заданных значений β_{13} и β_{23} .

Проводится ввод дополнительных ограничений.

Ввод первого ограничения осуществляется путем задания неравенства – величина максимального гидравлического КПД на режиме гидротрансформатора должна быть не менее 90%

$$\eta_{g \max} \geq 0,9. \quad (21)$$

Ввод второго и третьего ограничений обусловлен обеспечением оптимального совмещения внешних характеристик двигателя и гидротрансформатора.

Значение момента насосного колеса на пусковом режиме

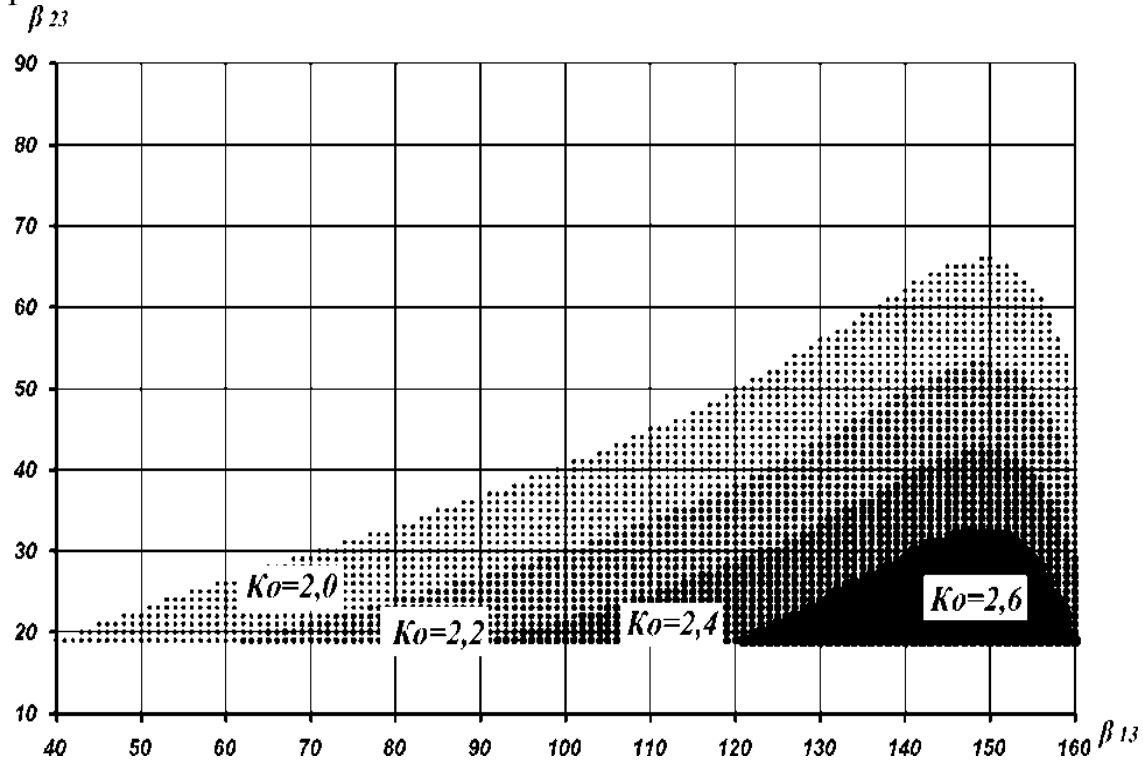
$$M_{10} = \rho \cdot Q_0 \cdot r_{21}^2 \cdot \omega_{10} \cdot \overline{\Delta\Gamma_{10}}, \quad (22)$$

где Q_0 – величина расхода в гидротрансформаторе на пусковом режиме;

r_{21} – радиус к средней линии тока на выходе потока из насосного колеса (см. рис. 7);

ω_{10} – угловая скорость вращения насосного колеса на пусковом

режиме.

Рис. 8. Графическое отображение поверхности $Ko=f(\beta_{13}, \beta_{23})$

Ограничение для момента M_{I0} задается равным максимальному моменту двигателя, в данном примере $M_{I0} = 1250$ Н·м при $\omega_{10} = \omega_{дв(при\ M_{дв_max})} = 209,44$ рад/с ($n_{10} = 2000$ мин⁻¹). Для получения более полной картины рекомендуется задание диапазона значения $M_{I0} \pm 100$ Н·м:

$$1350 \text{ Н}\cdot\text{м} \geq M_{I0} \geq 1150 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (23)$$

В качестве третьего ограничения вводится диапазон значений величины момента насосного колеса на муфтовом режиме работы: $M_{I_M} = 1000$ Н·м $\pm 5\%$ при $n_{об} = 2380$ мин⁻¹.

Проведя оптимизацию, получим результат, графически представленный на рис.9. В дальнейшем полученные соотношения углов β_{13} и β_{23} используются для проведения теоретического исследования меридионального потока в проточной части гидротрансформатора с целью определения кинематических параметров вдоль входных и выходных кромок колес гидротрансформатора, выполняется профилирование нового колеса реактора, проводятся численное моделирование и экспериментальные исследования гидротрансформатора.

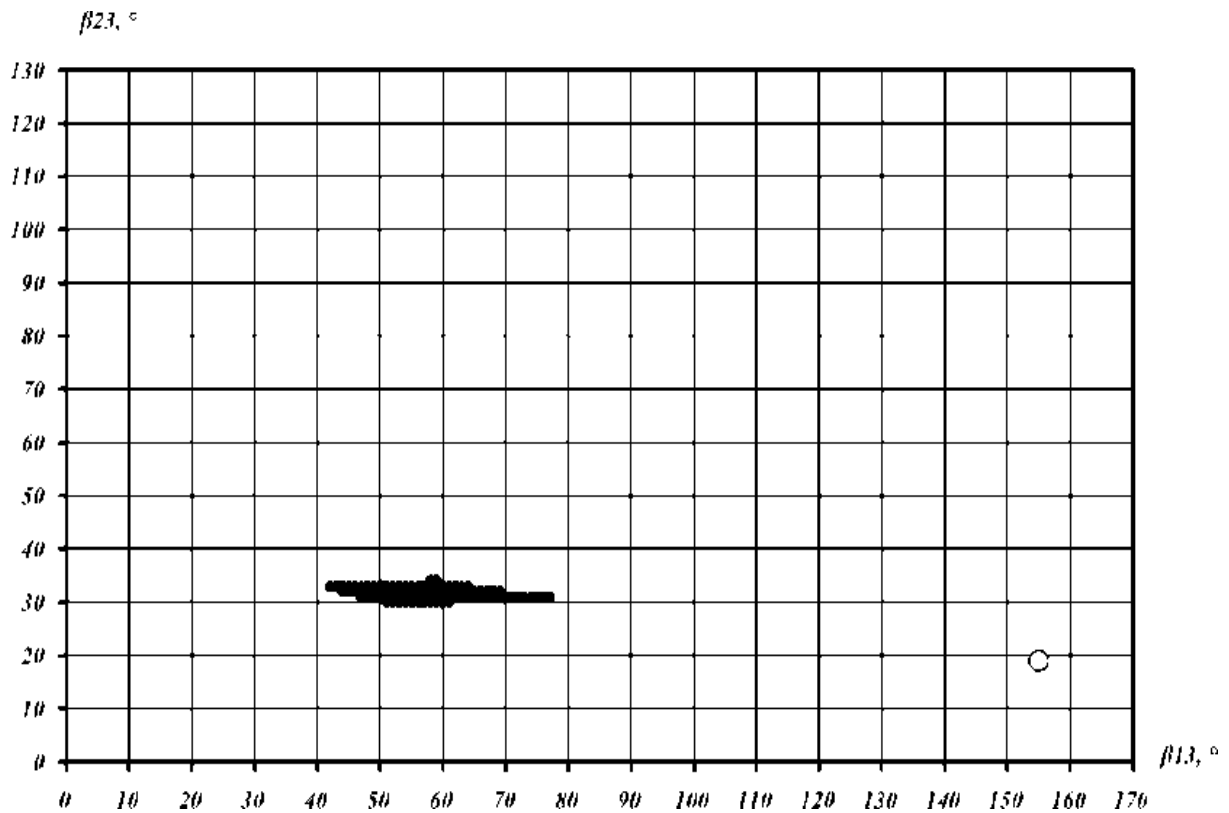


Рис.9. Поверхность распределения углов β_{13} и β_{23} после введения третьего ограничения

Внедрение системы автоматического управления коробкой передач. При недостаточной подготовленности водителя к управлению транспортным средством движение может осуществляться с неоптимальным использованием силовой установки и ошибками в выборе передачи, что приводит к снижению тягового усилия и повышению расхода топлива. Ввиду этого, происходит ухудшение таких параметров подвижности, как быстроходность, динамичность и запас хода [21].

С целью устранения указанных недостатков был предложен метод по разработке системы автоматического управления (САУ) трансмиссией (рис.10), применение которого за счет облегчения управления транспортным средством и снижения утомляемости водителя дополнительно позволит улучшить такие показатели подвижности, как управляемость и эргономичность. В основу подхода положен метод параметрического синтеза, который позволяет выбрать рациональные параметры для создания эффективной системы автоматического управления и основан на методах теории управления двигателем и гидромеханической трансмиссией автомобиля, кинестатики, математического моделирования движения транспортной машины, а также методах теории построения микропроцессорных устройств, повышения надежности и живучести электронных устройств.

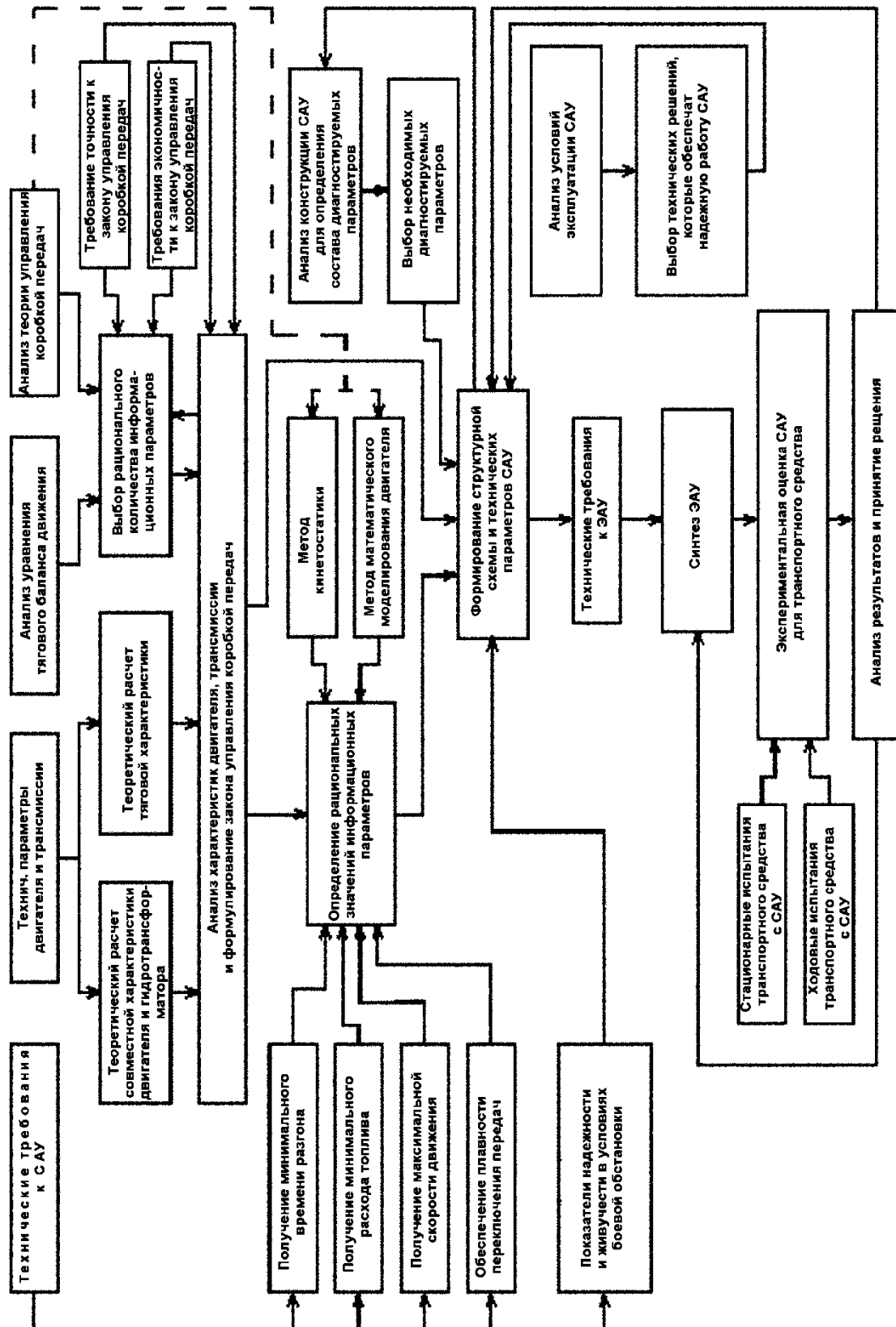


Рис.10. Структурная схема проектирования САУ

Перечисленные выше научно-технические наработки были успешно реализованы в изделии БТР-4 производства Харьковского кон-

структорского бюро по машиностроению им. А.А. Морозова, прошли стендовые [25], стационарные и ходовые испытания [26].

Выводы.

1. На основе проведенного анализа отечественной и зарубежной научно-технической литературы была предложена унифицированная классификация наземной военной техники по назначению. Также были определены современные модели подвижности военных транспортных средств, рассмотрены их назначение, структура и алгоритмы проведения расчета, определены направления развития моделей подвижности;

2. На основе усовершенствованного уравнения баланса гидравлической энергии с дополненной возможностью дифференцированного задания коэффициентов ударных потерь для каждого из рабочих колес предложена математическая модель расчета внешних и внутренних параметров гидротрансформатора;

3. Предложен метод, позволяющий проводить целенаправленное изменение основных параметров внешней характеристики гидротрансформатора путем оптимизации углов лопатки колеса реактора;

4. На основе параметрического синтеза предложен метод по разработке системы автоматического управления трансмиссией;

5. Результаты расчетов с использованием предложенных методов повышения подвижности на основе математической модели гидротрансформатора и внедрения системы автоматического управления коробкой передач подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Литература:

1. *Jurkat M.P.* NATO reference mobility model. Edition I users guide. Vol. I /*M.P. Jurkat, P.M. Brady Jr., P.W. Haley* ; Stevens Institute of Technology, Davidson Lab, Castle Point Station, Army tank-automotive research and development command. – Report № 12503. – 1979. – 390 p. – (www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b047979.pdf.)

2. *Чобиток В.А.* Теория движения танков и БМП / *В.А. Чобиток*. – М.: Воениздат, 1984. – 264 с.

3. *Беляков В.В.* Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин [Текст] / *В.В. Беляков* [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета. – 2013. – № 3(100). – С.145-174. – (<http://www.nntu.ru/trudy/2013/03/145-174.pdf>.)

4. *Rula A.A.* An analysis of ground mobility models / *A.A.Rula, C.J. Nuttall Jr.*; U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. – Report M-71-4. – 1971. – 200 p. – (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a023609.pdf>.)

5. *Schreiner B.G.* Validation of the AMC-71 Mobility / *B.G.*

Schreiner, W.E. Willoughby ; U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Mobility and Environmental Systems Laboratory Model. – Technical Report M-76-5. – 1976. – 200 p. – (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a023609.pdf>.)

6. *Jurkat M.P.* The AMC-74 mobility model / *M.P. Jurkat, C.J. Nuttall, P.W.Haley* ; U.S. Army Tank-Automotive Command. – 1975. – Report № 11921 (LL-149).

7. *Murphy Jr. N.R.* A limited NRMM validation study for ISTVS / *N.R. Murphy Jr., D.D. Randolph* ; U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. – Miscellaneous Paper GL-94-20. – 1994. – 59 p. – (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a282588.pdf>.)

8. *Vong T.T.* NATO Reference Mobility Model (NRMM) Modeling of the DEMO III Experimental Unmanned Ground Vehicle / *T.T. Vong, G.A. Haas, C.I. Henry* ; Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground. – Report ARL-MR-435. – 1999. – 69 p. – (<http://www.arl.army.mil/arlreports/1999/ARL-MR-435.pdf>.)

9. *Lessem A.* Stochastic Vehicle Mobility Forecasts Using the NATO Reference Mobility Model / *A. Lessem [et al.]* ; US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. – Report GL-93-15. – 1993. – 155 p. – (www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a268797.pdf.)

10. *Lashlee D.* Tactical mobility modeling for REFORGER 87 / *D. Lashlee, J.H. Robinson*; U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. – 1987. – 8 p. – (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a500794.pdf>.)

11. *Hönlinger M.* Mobility analysis of a heavy off-road vehicle using a controlled suspension / *M. Hönlinger, U. Glauch*; Krauss-Maffei Wegmann GmbH. - RTO AVT Specialists Meeting on Structural Aspects of Flexible Aircraft Control, Ottawa, Canada, 18-20 October, 1999. – 13 p. – (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p010497.pdf>.)

12. *Patrick N.* A virtual evaluation suite for military ground vehicle dynamic performance and mobility/ *N. Patrick [et al.]* //SAE Technical Paper. – No. 2002-01-3049.

13. *Dattathreyal M.S.* A Novel Approach for Combat Vehicle Mobility Definition and Assessment / *M.S. Dattathreyal, H.Singh*; U.S. Army TARDEC. – Report №22314. – 2011. – 12 p. – (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a577081.pdf>.)

14. *Bozdech G.W.* A GPS-based mobility power model for military vehicle applications : Master of Science Degree Thesis / *G.W. Bozdech*. – Knoxville : The University of Tennessee, 2012. – 202 p. – (http://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/1135.)

15. *Richmond P.W.* Cold Regions Mobility Models / *P.W. Richmond, S.A. Shoop, G.L. Blaisdell* ; U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research&Engineering Laboratory. – Report 95-1.– 1995. – 78 p.– (http://ntl.bts.gov/lib/8000/8800/8856/CR95_01.pdf.)

16. *Вахидов У.Ш.* Подвижность колесных машин на заснеженном склоне / *У.Ш. Вахидов*; Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – 8 с. – (<http://www.science-education.ru/pdf/2012/4/141.pdf>.)

17. *Кудров В.М.* Исследование параметров моторно-трансмиссионных установок бронетранспортеров / *В.М. Кудров* [и др.] // *Механіка та машинобудування*. - 2005. - №1. - С. 145-149.

18. *Вакуленко В.В.* Методы повышения характеристик подвижности танка Т-72 при его модернизации / *В.В. Вакуленко* [и др.] // *Механіка та машинобудування*, – 2009. – №2. – С. 168-173.

19. *Рассказов И.И.* Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова / *И.И. Рассказов, К.В. Сидоров, Е.И. Решетило*; Под ред. М.Д. Борисюка. – Харьков, 2007. – 188 с.

20. *Бусяк Ю.М.* Перспективы развития трансмиссий военных бронированных машин / *Ю.М. Бусяк* [и др.] // *Механіка та машинобудування*. - 2004. - №1. - С. 102-106.

21. *Толстоуцький В.О.* Розробка та впровадження автоматичної трансмісії легкоброньованих колісних військових машин для підвищення параметрів рухливості : Робота на здобуття премії Президента України для молодих вчених від Харківського конструкторського бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова / *В.О. Толстоуцький, С.В. Стрімовський, В.М. Соловйов*. – Харків, 2010. – 185 с.

22. *Соловьев В.М.* Влияние коэффициента трансформации гидротрансформатора на динамику разгона транспортной машины с автоматической коробкой передач / *В.М. Соловьев* // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 43.– С. 29–33.

23. *Соловьев В.М.* Адаптация внешних характеристик гидротрансформатора с центростремительной турбиной к требованиям транспортного средства путем изменения лопатки колеса реактора: Дис... канд. техн. наук : 05.05.17 / *В.М. Соловьев*. – Харків, 2010. – 180 с.

24. *Лантев Ю.Н.* Автотракторные гидротрансформаторы / *Ю. Н. Лантев*. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.

25. О результатах стендовых испытаний комплексной гидроредачи : Акт № 83 от 19.05.2005/ Харьковское конструкторское бюро по машиностроению. – 6 с.

26. Об испытаниях изделия БТР-4 пробегом Харьков – Ровно – Харьков : Акт № 161 от 21.09.2007 / Харьковское конструкторское бюро по машиностроению. – 2007.– 6 с.

ПІДВИЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХЛИВОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Соловйов В.М., Початовський С.В., Стрімовський С.В.

Анотація – на основі огляду вітчизняних і зарубіжних наукових джерел, у статті складена уніфікована класифікація наземної військової техніки за призначенням, визначені сучасні моделі рухливості, розглянуті їх призначення, структура і алгоритми проведення розрахунку, визначені напрями подальшого їх розвитку. Запропоновано методи підвищення рухливості на основі використання математичної моделі гідротрансформатора і методів цілеспрямованої зміни параметрів гідротрансформатора та розробки системи автоматичного управління трансмісією.

INCREASING OF MOBILITY PARAMETERS FOR MILITARY VEHICLES

V. Solovyov, S. Pochartovsky, S. Streamovsky

Summary

On basis of a review of domestic and foreign scientific references, the unified classification of land military vehicles by their purpose is made in this paper. Also modern mobility models are analyzed, their purpose, structure and calculation algorithms are considered, and further development direction of these models are determined. Methods for increasing mobility parameters are proposed on basis of using the torque converter mathematical model and methods of the aimed change of torque converter parameters and the development of the automatic transmission control system.