На правах рукописи

УДК 629.11.012.816

Стадухин Антон Алексеевич

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «ДВИГАТЕЛЬ-ДВИЖИТЕЛЬ» ГУСЕНИЧНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Специальность

05.05.03 - Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:	доктор технических наук Сарач Евгений Борисович, профессор МГТУ имени Н.Э. Баумана
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Беляков Владимир Викторович, Начальник управления научных исследований и инновационных работ НГТУ имени Р.Е. Алексеева
	кандидат технических наук, Чернышев Николай Васильевич, Главный конструктор ООО «КАТЕ»
Ведущая организация:	Государственный технический университет МАМИ

Защита диссертации состоится 23 декабря 2013 г. в 14^{30} на заседании Диссертационного Совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью просьба выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке М государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан "__" _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук Сарач Е.Б.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2039245
Стадухин А.А. Метод опред.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Развитие современных наземных транспортных средств специального назначения идёт по пути автоматизации и роботизации рабочих процессов. Это объясняется стремлением обеспечить сохранность личного состава, снизить профессиональные требования к человеку-оператору и повысить эффективность операций. Особенно актуально эти вопросы стоят для систем, участвующих в операциях на плохо доступных и заражённых участках местности. Именно поэтому в настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию гусеничных мобильных роботизированных комплексов (ГМРК), в том числе и на базе серийных гусеничных машин.

Для мобильных роботизированных комплексов, работающих в качестве аварийно-спасательных машин на труднодоступных участках местности, при разборке завалов, на сильно загрязненных площадках (свалках мусора) и т.д., характерно применение гусеничного движителя. Это обусловлено тем, что в таких тяжелых условиях, машины, оснащенные гусеничным движителем, имеют ряд преимуществ. Они обладают большей маневренностью, лучшей профильной проходимостью, менее подвержены внешнему повреждению элементов, взаимодействующих с опорным основанием. Однако наличие у гусеничных машин открытой зоны зацепления ведущего колеса с гусеницей, снижает их надежность.

Данное зацепление является высоконагруженным и чаще всего работает в условиях абразивного износа. При выходе из строя элементов зацепления гусениц с ведущими колесами машина теряет подвижность. В условиях работы машины на сильно загрязненных участках данная проблема усугубляется тем, что в зону зацепления попадают посторонние предметы (трос, арматура), что вызывает заклинивание ведущих колес или приводит к сбросу гусеницы. Восстановление подвижности машины при такой аварии требует значительных временных затрат. Если гусеничная машина является роботизированным мобильным комплексом, то выход из строя элементов зацепления гусениц с ведущими колесами приводит к потере объекта. Таким образом, поиск альтернативного тягового элемента гусеничного шасси является актуальной задачей.

Развитие современных транспортных и тяговых машин, в том числе и гусеничных, идет по пути совершенствования силовых установок и трансмиссий за счет применения гибридных элементов, таких как дизель-генераторные силовые установки, моторколеса, дополнительные тяговые электродвигатели, накопители энергии и т.д. То есть, повышение энергооснащенности шасси ведется не за счет увеличения мощности двигателя, а путем перераспределения энергии, вследствие ее накопления в одних, более легких условиях, и интенсивного расхода в других – тяжелых условиях движения. Следовательно, можно сделать вывод, что перспективные

гусеничные машины будут использовать в трансмиссии тяговые электродвигатели.

Несмотря на все преимущества и долгую историю попыток применения электрической трансмиссии на транспортных гусеничных машинах, она так и не получила широкого распространения. Одной из причин этого является громоздкость её основных элементов – электрических машин и редукторов.

Часто эта проблема решается встраиванием тяговых электродвигателей в исполнительные органы ходовой части мотор-колёса и мотор-звёздочки. Для колёсных машин такое решение себя оправдало и весьма распространено (луноходы, карьерные самосвалы).

Применение мотор-звездочек на гусеничном шасси ограничивается компоновочными соображениями из-за сложности встроить мотор-редуктор, необходимой мощности, в сравнительно небольшие габариты ведущего колеса.

Серьезные преимущества в этом отношении удастся получить, применив новую конструкцию линейного тягового электродвигателя на гусеничном шасси. Новизна состоит в реализации тягового усилия не через трансмиссию или электродвигатель на ведущее колесо, а непосредственно с линейного тягового электродвигателя на траки гусеницы. В этом случае целесообразно разместить линейный тяговый электродвигатель в обычно малоиспользуемом пространстве – вокруг верхней ветви гусеницы, видоизмененные траки которой будут выполнять роль ротора линейного электродвигателя (рис. 1).

Помимо компоновочных преимуществ такой привод лишает машину высоконагруженного зацепления ведущего колеса с гусеницей, либо облегчает его работу. Так же становится возможным лишить ходовую часть гусеничной машины неподрессоренных ведущих и направляющих колёс.

Машины с линейным тяговым электродвигателем предполагается использовать для устранения последствий аварий и стихийных бедствий, охраны помещений или выполнения транспортных функций внутри помещений.

Целью работы является повышение эксплуатационных качеств ГМРК за счёт использования линейного тягового электродвигателя, совмещённого с гусеничным движителем мобильного робота и создание метода определения характеристик электромеханической системы "двигатель-движитель" на стадии проектирования.

Так как гусеницы ГМРК работают в тяжёлых условиях и подвержены интенсивному износу, размещение в них обмоток или постоянных магнитов крайне нежелательно. Поэтому, из всего многообразия электрических машин была выбрана вентильно-индукторная машина, имеющая один из самых простых роторов.

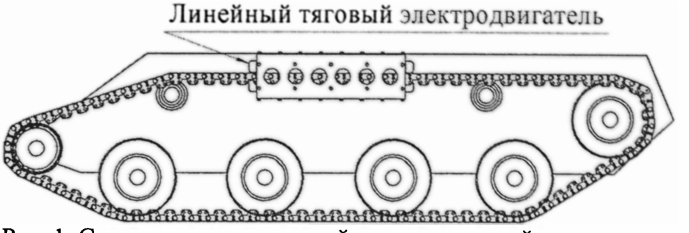


Рис. 1. Схема шасси гусеничной машины с линейным тяговым электродвигателем

Сложная взаимосвязь различных физических процессов протекающих в линейном вентильно-индукторном тяговом электродвигателе (ЛВИТЭД) и его взаимодействие с элементами ходовой части ГМРК, затрудняют исследование данной системы аналитическим способом. Поэтому основным методом теоретического исследования в данной работе является имитационное моделирование.

Для достижения намеченной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи исследования:

- получена имитационная модель ЛВИТЭД, позволяющая оценить его тяговые качества, массовые и габаритные характеристики;
- создана математическая модель, пригодная для оценки динамических качеств ГМРК, учитывающая особенности работы ЛВИТЭД, гусеничного обвода и системы подрессоривания;
- разработан метод определения основных характеристик ЛВИТЭД для ГМРК;
- проведено экспериментальное и теоретическое исследование для уточнения и верификации разработанных математических моделей.

Научная новизна работы заключается в том, что в результате теоретических и экспериментальных исследований:

- разработан метод определения основных характеристик ЛВИТЭД совмещённого с движителем ГМРК отличающейся тем, что метод, с использованием имитационного математического моделирования, позволяет определять геометрические, электромагнитные и тепловые параметры тягового двигателя исходя из геометрических размеров движителя ГМРК на стадии проектирования;
- разработана новая математическая модель прямолинейного движения ГМРК оснащённого линейным тяговым электродвигателем отличающаяся тем, что модель в качестве подсистем включает в себя модели линейного тягового электродвигателя, системы подрессоривания и оригинальную модель гусеничного обвода. Модель позволяет имитировать движение ГМРК, оснащённого линейным тяговым электродвигателем и оценивать работоспособность двигателя.

Практическая значимость работы. На основе результатов выполненных исследований для практического использования при проектировании ЛВИТЭД совмещённого с движителем ГМРК создан комплекс программ для ЭВМ. Использование комплекса позволяет определять геометрические, электромагнитные и тепловые параметры электромеханической системы "двигатель-движитель" на стадии проектирования для конкретного шасси ГМРК, а также оценивать работоспособность двигателя, имитируя динамику прямолинейного движения машины, оснащенной линейным тяговым электродвигателем, и, тем самым, сократить сроки проектирования и доводочных испытаний.

Реализация результатов работы.

Материалы диссертационной работы вошли в отчеты по научно-исследовательским работам, выполненным в НИИЦ АТ 3 ЦНИИ МО РФ, а также используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Внедрение работы рекомендуется в ОАО "СКБМ", ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ", СКТБ ПР МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Апробация работы и публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 научные работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов МГТУ им. Н.Э. Баумана, на научно-исследовательской конференции МАДИ (ТУ) (г. Москва 2010 г.), на научно-технической конференции, посвящённой 75-летию кафедры «Гусеничные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2013 г.).

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Работа изложена на 155 листах машинописного текста, содержит 99 рисунков и 13 таблиц. Библиография работы содержит 74 наименования.

Содержание работы

Введение содержит обоснование необходимости поиска альтернативных способов передачи тяги на движитель ГМРК. Здесь представлена основная идея тягового линейного двигателя для ГМРК, сформулирована цель работы и приведено краткое содержание выполненных исследований.

В первой главе представлен анализ применения тягового электропривода на транспортных средствах. Указаны основные преимущества и недостатки применения тягового электропривода для гусеничных машин, затронуты вопросы компоновки электрических трансмиссий. Проведён обзор типов электрических двигателей, используемых на транспортных машинах. Сделан вывод о целесообразности использования в качестве тягового двигателя для ГМРК ЛВИТЭД. Описаны отличительные особенности принцип действия вентильно-индукторной машины, обоснована необходимость его

математического моделирования в рамках проводимого исследования. Проведён обзор существующих математических моделей вентильно-индукторных машин отечественных и зарубежных авторов. Особенно отмечен вклад научной школы МЭИ авторов Бычкова М.Г. и Красовского А.Б.

Также в данной главе обоснована необходимость использования имитационного математического моделирования динамики ГМРК с ЛВИТЭД для полноценного изучения динамических качеств машины. Модель должна представлять совместно динамику корпуса машины, ее ходовой части (подвески и гусеничного обвода, взаимодействующего с опорным основанием) и процессов, протекающих в ЛВИТЭД. Перечислен ряд работ научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, академии БТВ и других организаций, занимавшихся вопросами динамики движения гусеничных машин. Основными из них являются научные труды Аврамова В.П., Дмитриева А.А., Савочкина В.А., Забавникова Н.А., Платонова В.Ф., Котиева Г.О.

В итоге первой главы были сформулированы основные задачи исследования, которые необходимо решить для достижения цели работы.

Во второй главе описана математическая модель ЛВИТЭД для ГМРК, в которой магнитные свойства материалов приняты линейными. Обосновано рациональное конструктивное размещение ЛВИТЭД на ГМРК (рис. 2). Предложена расчётная схема ЛВИТЭД. Приведены зависимости основных геометрических, магнитных и электрических величин ЛВИТЭД: U – напряжение в обмотках фазы, В; i – сила тока в обмотке, А; Ф – магнитный поток через магнитопровод, Вб; Λ - магнитная проводимость, Вб/А; s – перемещение ротора, м; w – число витков обмоток фазы. Рассмотрены три этапа работы ЛВИТЭД: 1 - включение фазы (положения ротора $s = 0..s_1$ на рис. 3 и рис. 4); 2 - рабочий этап ($s = s_1..s_2$); 3 - этап отключения фазы ($s = s_2..s_4$). Отмечено, что, для простоты, в данной главе магнитная проводимость Λ - исключительно геометрический параметр, зависящий от размеров зубцов электродвигателя и их взаимного положения. При этом Λ вместе с силой тока в обмотках фазы i и числом витков обмоток фазы w определяет главный параметр ЛВИТЭД – силу тяги F_t. Её предлагается вычислять по известной формуле:

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot (i\,w)^2 \frac{\partial \Lambda}{\partial x}$$

Далее в главе 2 рассмотрен качественный вид внешней механической характеристики ЛВИТЭД (рис. 4) и влияние на неё таких параметров как напряжение питания, времени отключения и включения фазы и «токоограничения». Получение частичных характеристик. Некоторые алгоритмы управления параметрами ЛВИТЭД (по аналогии с работами Красовского А.Б.). Кратко рассмотрен генераторный режим ЛВИТЭД.

В следующем разделе главы 2 представлен метод выбора основных параметров ЛВИТЭД для ГМРК.

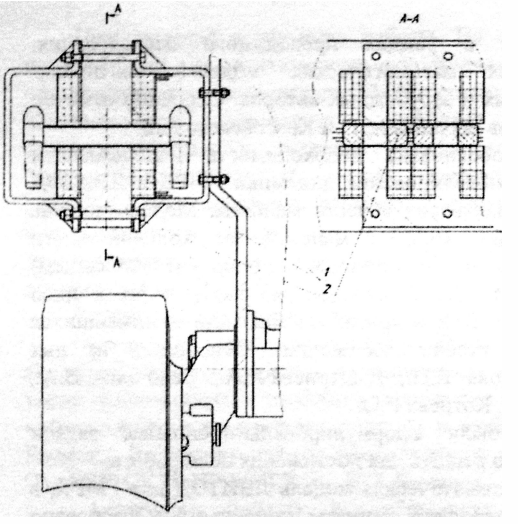


Рис. 2. Размещение ЛВИТЭД на ГМРК:
1 – статор; 2 – гусеница-ротор

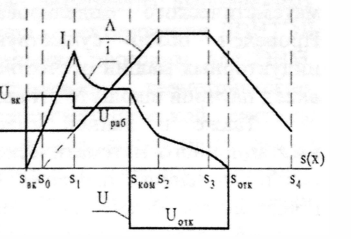


Рис. 3. Этапы работы ЛВИТЭД

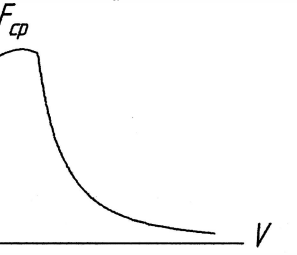


Рис. 4. Внешняя механическая характеристика ЛВИТЭД

В заключительной части 2 главы представлено описание имитационной математической модели ЛВИТЭД, реализованной в программном комплексе Matlab/Simulink. На рис. 5 представлена структурная схема имитационной математической модели ЛВИТЭД, а на рис. 6 пример сводного графика, отражающего работу модели ЛВИТЭД без учёта нелинейных магнитных свойств его материалов.

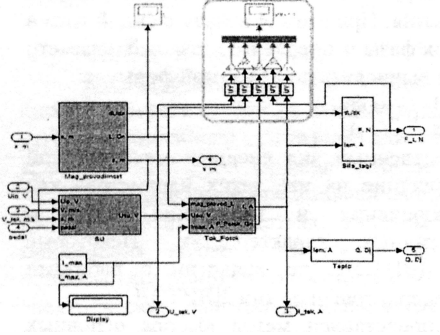


Рис. 5. Структурная схема имитационной математической модели ЛВИТЭД

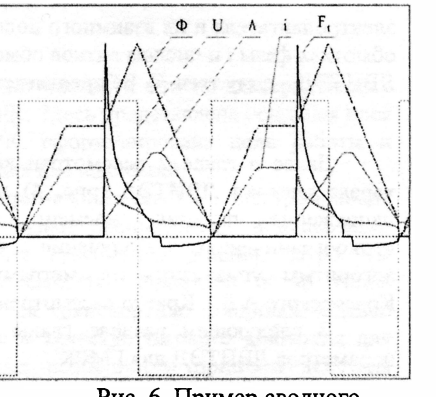


Рис. 6. Пример сводного графика блока ЛВИТЭД

В главе 3 представлено описание разработанной имитационной математической модели ГМРК пригодной для использования совместно с имитационной математической моделью ЛВИТЭД.

В данной модели приняты следующие допущения: дорожные условия одинаковы под обеими гусеницами, опорное основание недеформируемое, кусочно-линейное; система подрессоривания симметрична относительно продольной вертикальной плоскости, проходящей через центр тяжести корпуса машины; корпус недеформируем и не взаимодействует с опорным основанием; трение в шарнирных опорах подвески пренебрежимо мало.

Уравнения динамики корпуса:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \sum_i (P_{шх(i)} + P_{грунт(i)} - P_{f(i)}), \\ m\ddot{z} = \sum_i P_{п(i)} - P_{гус(2)} \cdot \cos\alpha_1 - P_{гус(j)} \cdot \cos\alpha_k - mg, \\ I_Y\ddot{\varphi} = \sum_i ((P_{шх(i)} + P_{грунт(i)} - P_{f(i)}) \cdot (z_c - z_{грунт(i)})) + \\ + \sum_i (P_{п(i)} \cdot l_i \cdot \cos\varphi) - P_{гус(2)} \cdot \cos\alpha_1 \cdot l_{nk1} \cdot \cos\varphi - P_{гус(j)} \cdot \cos\alpha_k \cdot l_{nk2} \cdot \cos\varphi. \end{cases}$$

Здесь x, z, φ - координаты корпуса; m, I_y – масса и момент инерции корпуса; $P_{грунт(i)}$ - горизонтальные реакции грунта под каждым i-м опорным катком; $P_{шх(i)}$ – горизонтальные составляющие реакции в шине; $P_{f(i)}$ – силы сопротивления прямолинейному движению; $P_{п(i)}$ – силы от подвески; $P_{гус(j)}$ – силы от j-го участка гусеницы; l_{nk1}, l_{nk2} – горизонтальные расстояния от центра тяжести до направляющих колёс, l_i – горизонтальные расстояния от центра тяжести до опорных катков. Расчётная схема для модели показана на рис. 7.

В предлагаемой математической имитационной модели гусеничной машины содержится оригинальная модель гусеничного обвода (рис. 8). Гусеничная лента здесь представляется в виде нескольких сосредоточенных в материальных точках масс m_i с одной степенью свободы, соединённых упруго-демпфирующими связями. Массы m_i сосредоточены в точках гусеницы, в которых возможно приложение продольных сил, то есть в точке приложения усилия от ЛВИТЭД и точках контакта опорных катков с несущим основанием.

Следует отметить, что такое разделение на массы достаточно условно и картина не изменится, если прикладывать тяговое усилие к массе сосредоточенной на ведущем колесе. Это позволит увеличить практическую значимость предлагаемой модели гусеницы, распространив её и на гусеничные машины с ведущими колёсами. Сумма m_i равняется массе гусеницы $M_{гус}$.

На каждую массу m_i действуют упругие и демпфирующие силы соседних ветвей гусеницы $P_{гус(i+1)}$ и $P_{гус(i)}$. На массу на ведущем колесе кроме того действует сила тяги двигателя $P_{тяги}$. Массы под опорными катками также испытывают дополнительные воздействия от горизонтальной реакции грунта $P_{грунт(n)}$.

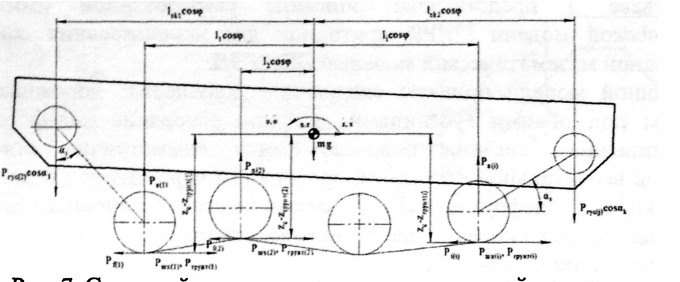


Рис. 7. Силы, действующие на корпус гусеничной машины

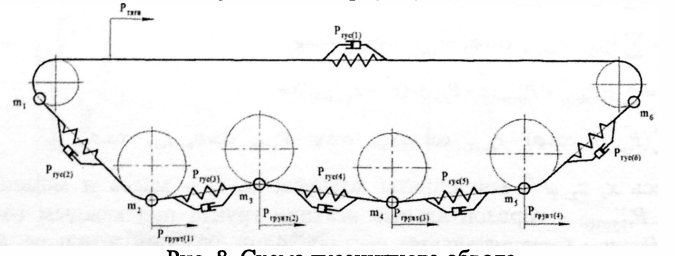


Рис. 8. Схема гусеничного обвода

С учётом всего вышесказанного, уравнения динамики гусеничного обвода примут вид:

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 = P_{\text{тяги}} + P_{\text{гус}(1)} - P_{\text{гус}(2)}, \\ m_2\ddot{x}_2 = P_{\text{гус}(2)} - P_{\text{гус}(3)} - P_{\text{грунт}(1)}, \\ m_3\ddot{x}_3 = P_{\text{гус}(3)} - P_{\text{гус}(4)} - P_{\text{грунт}(2)}, \\ \dots \\ m_{(N_m-1)}\ddot{x}_{(N_m-1)} = P_{\text{гус}(N_m-1)} - P_{\text{гус}(N_m)} - P_{\text{грунт}(N_{OK})}, \\ m_{N_m}\ddot{x}_{N_m} = P_{\text{гус}(N_m)} - P_{\text{гус}(1)}. \end{cases}$$

Здесь x_i – перемещение соответствующей массы m_i, $\dot{x}, \ddot{x}$ - первая и вторая производная по времени – скорость и ускорение; N_m - количество масс m_i.

В разработанной математической модели учитывается воздействие упругодемпфирующих сил в гусенице на подвеску машины. При одномерной (свечной) модели подвески, реализованной в математической модели, к опорным каткам прикладываются только вертикальные составляющие сил в гусенице $P_{\text{гус.z}}$.

Для вычисления вертикальных составляющих $P_{\text{гус.z}}$ достаточно знать углы направлений на следующий элемент ходовой части α_i (рис. 9).

Таким образом, динамика каждого опорного катка массой $m_{\text{ОК}}$ описывается следующим уравнением:

$$m_{OK(n)}\ddot{z}_{OK(n)} = -P_{\text{гус}(n+1)}\sin\alpha_n + +P_{\text{гус}(n+2)}\sin\alpha_{n+1} - P_{\text{п}(i)} - m_{OK(n)}g,$$

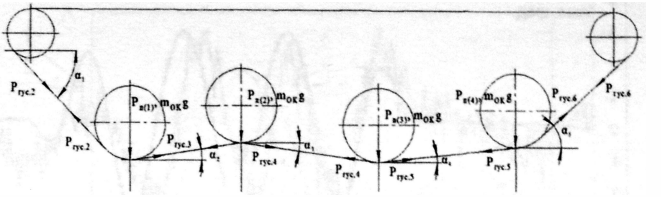


Рис. 9 Влияние гусеничного обвода на подвеску

В случае отрицательных углов охвата гусеницей опорного катка $\alpha_i < 0$, сила $P_{гус.z}$ обнуляется.

В главе 4 представлены результаты проведения верификаци разработанной математической модели движения гусеничной машины путём сравнения с экспериментальными данными. В качестве экспериментальных данных были использованы результаты испытаний модернизированной БМП-2, проводимые ОАО "СКБМ" (г. Курган). В результате верификации выяснилось, что относительное расхождение экспериментальных и расчётных данных на совокупности условий движения не превосходит: по вертикальным ускорениям на месте механика-водителя - 17%, по скоростям продольно-угловых колебаний – 15%, по продольно-угловым перемещениям – 16%. Проведённое сравнение позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели объекту, а также практической пригодности модели для оценки динамики корпуса ГМРК при движении по неровностям дороги. На графике рис. 10 сравниваются данные моделирования и эксперимента.

Также в главе 4 рассмотрен метод получения кривых намагничивания $\Psi(I_ф)$ фазы ЛВИТЭД (рис. 11) с помощью программного обеспечения, использующего метод конечных элементов (программы FEMM и Elcut) и так называемой, нормировочной кривой Миллера. При создании метода использовались работы авторов Красовского А.Б. и Miller T. J. E.

Применение данного метода в имитационной математической модели ЛВИТЭД позволяет учитывать явление насыщения и сложную форму воздушного зазора.

Пример расчёта такой имитационной модели показан, на рис. 11 (кривая 3) и 12 (кривая 3). На этих рисунках слева значения $\Lambda(x_{рот}, I_ф)$ и $F_f(x_{рот}, I_ф)$ при токе фазы $I_ф < I_{нас}$, справа при $I_ф > I_{нас}$. Для получения кривых использовалось одинаковое количество вычислений программы FEMM. Видны большие требования к числу вычислений при табличном задании магнитных свойств, по сравнению с использованием методов Миллера.

Для сравнения даны результаты модели, описанной в главе 2 (кривые 1).

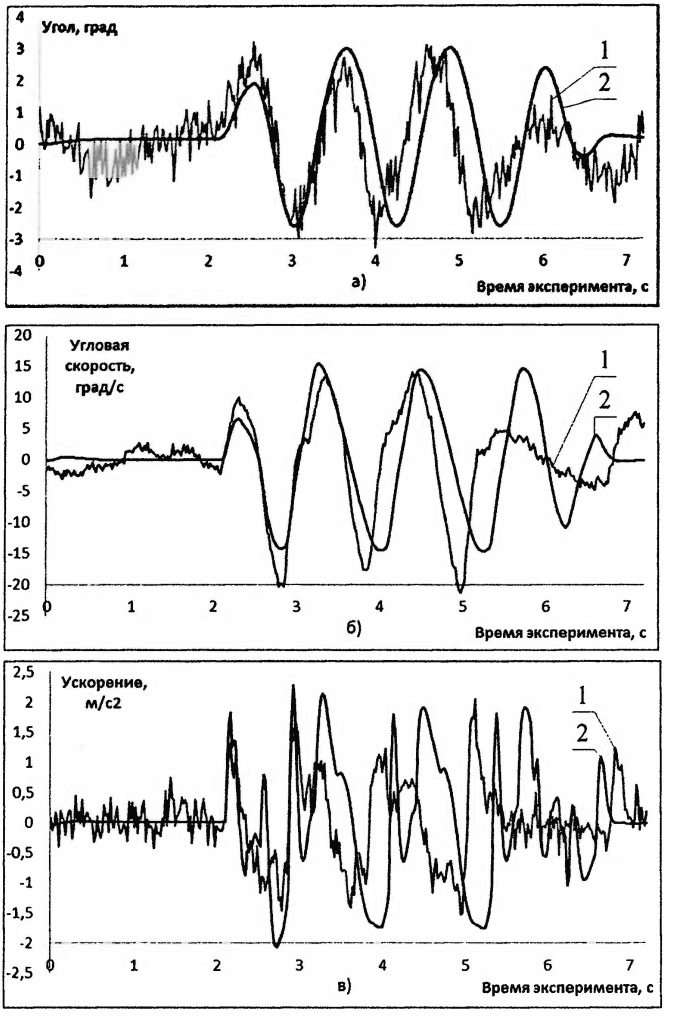


Рис. 10. Сравнение результатов натурного эксперимента и моделирования: а - продольно-угловое перемещение корпуса; б - продольно-угловая скорость корпуса; в - вертикальные ускорения на месте механика-водителя; 1 – эксперимент; 2 – расчет в математической модели

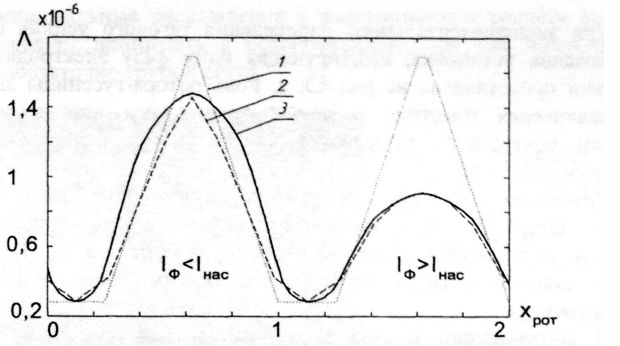


Рис. 11. Магнитные проводимости ЛВИТЭД:
1 - линейная модель; 2 – полученные по данным из FEMM;
3 – восстановленные по кривым Миллера

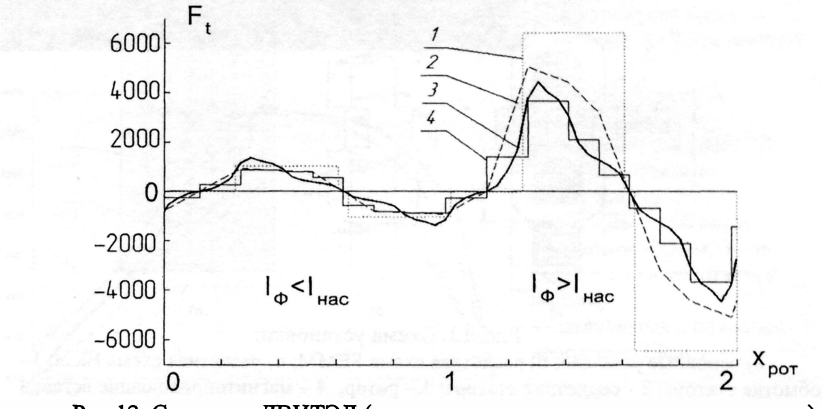


Рис.12. Сила тяги ЛВИТЭД (статическая механическая характеристика):
1 - линейная модель; 2 – напрямую полученная из FEMM;
3 – линейно-интерполированные значения, восстановленные по кривой Миллера; 4 – полученные по табличным данным магнитной проводимости из FEMM

Сравнение результатов вычислений имитационной модели с данными, полученными с помощью программы МКЭ FEMM, а так же многочисленные публикации авторов Красовский А.Б. и Miller T. J. E. по данной теме говорят о высокой степени достоверности выражений и зависимостей используемых в модели. Тем не менее, сама реализация имитационной модели, предлагаемой в работе, нуждается в проверке на адекватность.

Для экспериментального определения тягового усилия фазы ЛВИТЭД была создана установка, имитирующая одну фазу электродвигателя. Схема установки представлена на рис 13, а. Роль ротора-гусеницы здесь выполняет неметаллическая пластина с двумя магнитными вставками. Для точной выставки воздушного зазора между статором и ротором использовались картонные пластины.

Установка позволяет исследовать работу фазы ЛВИТЭД в статике, а именно получить кривую статической механической характеристики (зависимость силы тяги от положения ротора как на рис. 12). Подобные кривые широко используются в теории традиционных электрических машин и электропривода

В соответствии с основными размерами установки, были созданы расчётные схемы для программ метода конечных элементов FEMM (рис 13, б), и Elcut (рис 13, в).

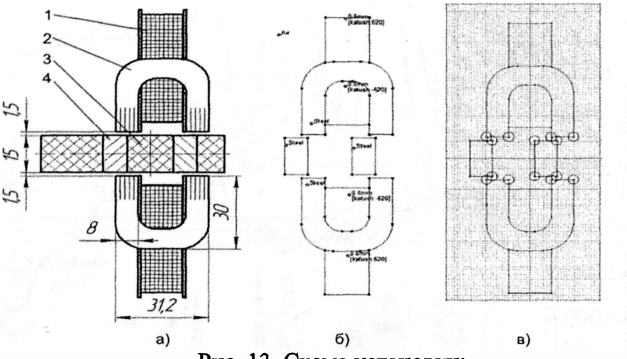


Рис. 13. Схема установки:

а) основные размеры; б) расчётная схема FEMM; в) расчётная схема Elcut; 1 – обмотка статора; 2 - сердечник статора; 3 – ротор; 4 – магнитопроводящие вставки ротора

С помощью экспериментальной установки (рис. 14) определялось тяговое усилие фазы ЛВИТЭД для различного положения ротора. Для каждого положения ротора проводилось по пять опытов. Значимость полученных экспериментальных данных определялась по критерию Стьюдента.

В результате расчётов в программах FEMM и Elcut, а так же в разработанной имитационной модели были получены силы тяги для разных перемещений ротора x (рис. 15). Там же показана сила тяги, полученная в результате физического эксперимента на установке

Расхождение экспериментальных данных и полученных с помощью разработанной математической модели не превысили 27%. Расхождения с силами тяги полученными программами МКЭ так же незначительны. Стоит

отметить, что минимальные расхождения с экспериментом расчёта учебной версией Elcut следует принимать с осторожностью, так как исследование проводилось на достаточно грубой сетке.

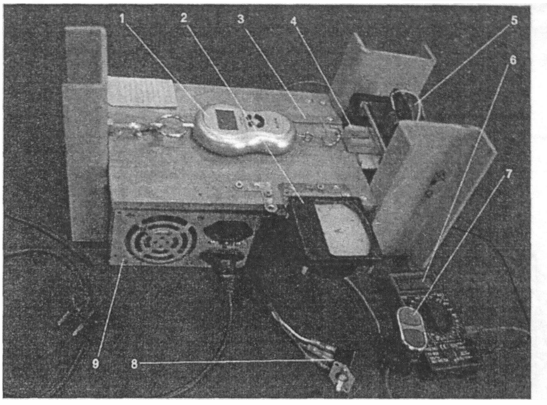


Рис. 14. Общий вид экспериментальной установки: 1 – электронные весы WeiHeng; 2 – вольтметр M4200; 3 – миллиметровая шкала; 4 – пластина-ротор; 5 – катушка статора; 6 - цифровой мультиметр DT-832; 7 – выключатель установки; 8 – выключатель блока питания; 9 – блок питания

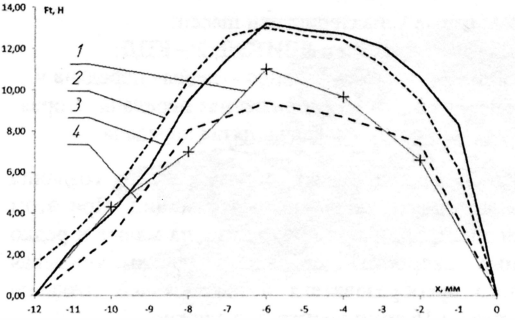


Рис. 15. Статическая механическая характеристика ЛВИТЭД: 1 - по результатам эксперимента; 2 - полученная с помощью программы FEMM; 3 – по расчётам в разработанной модели; 4 - полученная с помощью программы Elcut

Полученный результат даёт возможность использовать разработанную модель для проектного расчёта геометрических параметров ЛВИТЭД с ГМРК.

В главе 5 изложен метод проектирования ЛВИТЭД для ГМРК. Метод состоит из последовательного выполнения следующих действий:

1. Получение предварительных размеров и параметров ЛВИТЭД с помощью предлагаемого программного комплекса.

2. Исследование проектируемого двигателя с помощью программы МКЭ. Получение кривых намагничивания. Подстановка результатов в разработанную имитационную модель.

3. Получение скоростных механических характеристик, выбор рациональных законов управления ЛВИТЭД. Оценка динамических

возможностей ГМРК с помощью имитационной математической модели. Определение конструктивных особенностей ГМРК с ЛВИТЭД.

Далее в данной главе приведены примеры проектирования тягового электропривода для гусеничной машины весом 60 кг и 16 тонн. На рис. 16 представлено сравнение динамических факторов, полученных с помощью математической модели для 16 тонного шасси с ЛВИТЭД и близкой ему по массе БМП-2.

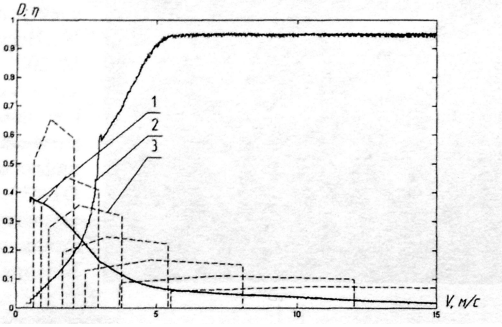


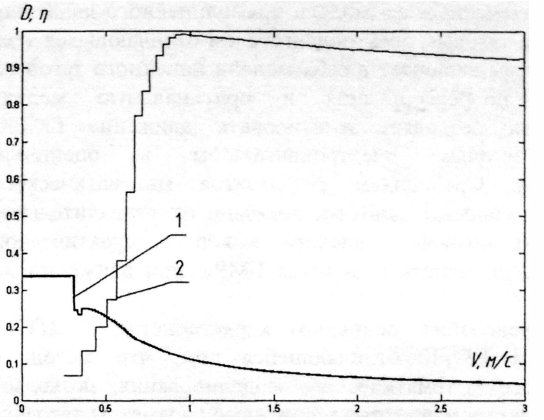
Рис 16. Скоростные характеристики шасси:
1 - динамический фактор шасси с ЛВИТЭД; 2 – КПД;
3 – динамический фактор БМП-2 соответственно - первая передача в пониженном диапазоне, первая передача, вторая пониженная передача, вторая передача, третья передача, четвёртая передача, пятая передача

Из представленных графиков можно судить о возможности создания шасси с ЛВИТЭД, способного выполнять транспортные функции. При этом диапазон низкой эффективности электропривода приходится на малые и редко используемые эксплуатационные скорости движения. Однако учитывая большой вес ЛВИТЭД, силового преобразователя и накопителей создание ГМРК с ЛВИТЭД в весовой категории 16 тонн достаточно сложно.

На рис. 17 представлен динамический фактор шасси мобильного робота массой 60 кг с ЛВИТЭД. По графику можно судить, что на ровной асфальтовой дороге (коэффициент сопротивления прямолинейному движению менее 0,1) мобильный робот с рассчитанной тяговой ЛВИТЭД сможет развить скорость до 3 м/с, что является достаточным для шасси подобного класса. Также он способен двигаться в тяжёлых условиях (коэффициент сопротивления прямолинейному движению до 0,3).

Диапазон неравномерной и низкоэффективной работы ЛВИТЭД приходится на редко используемые малые скорости (менее 0,5 м/с).

Место размещения ЛВИТЭД на шасси мобильного робота показано на рис. 18. Вариант конструкции ЛВИТЭД для данного шасси показан на рис. 19.



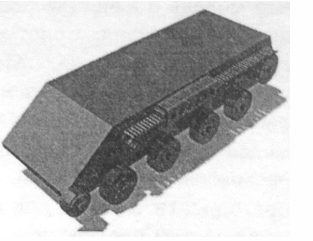


Рис 18. Общий вид мобильного робота с ЛВИТЭД

Рис 17. Скоростные характеристики шасси:
1 - динамический фактор шасси с ЛВИТЭД;
2 – КПД

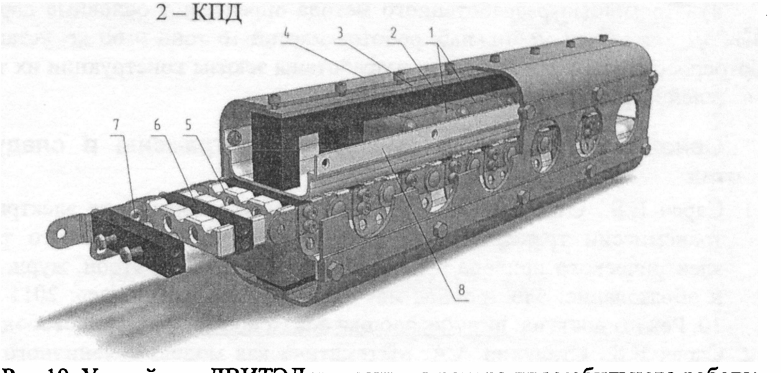


Рис 19. Устройство ЛВИТЭД и гусеницы-ротора для мобильного робота:
1 – обмотки фаз; 2 – статор; 3 – прокладка; 4 – корпус ЛВИТЭД;
5 – подушка трака с грунтозацепами; 6 – магнитопровод трака (ротор); 7 – заклёпка, шарнир трака; 8 – износостойкий пыльник

Основные результаты и выводы по работе.

1) По известным математическим зависимостям получена имитационная модель ЛВИТЭД для ГМРК учитывающая электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы, протекающие в двигателе. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными даёт расхождение не более 27%, что делает её пригодной для проектного расчёта тягового электропривода ГМРК.

2) Разработана новая математическая модель прямолинейного движения ГМРК оснащённого линейным тяговым электродвигателем отличающаяся тем, что модель в качестве подсистем включает в себя модели линейного тягового электродвигателя, системы подрессоривания и оригинальную модель гусеничного обвода. Модель позволяет имитировать движение ГМРК, оснащённого линейным тяговым электродвигателем и оценивать работоспособность двигателя. Сравнением результатов математического моделирования с экспериментальными данными доказано их незначительное расхождение (до 16%), что позволяет сделать вывод о практической пригодности модели для оценки динамики корпуса ГМРК при движении по неровностям местности.

3) Создан метод определения основных характеристик ЛВИТЭД совмещённого с движителем ГМРК отличающейся тем, что метод, с использованием имитационного математического моделирования, позволяет определять геометрические, электромагнитные и тепловые параметры тягового двигателя исходя из геометрических размеров движителя ГМРК на стадии проектирования.

4) С помощью разработанного метода определены основные параметры ЛВИТЭД для шасси мобильных роботов массой 16 тонн и 60 кг, установлена работоспособность таких шасси и разработаны эскизы конструкции их тяговых двигателей и траков гусеничного движителя.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах

1. Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Особенности моделирования электрической трансмиссии транспортного средства на примере линейного тягового электрического привода [Электронный ресурс]// Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание», 2011 выпуск 10. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/113356.html, свободный.
2. Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Математическая модель гусеничного обвода [Электронный ресурс]// Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание», 2011 выпуск 11. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/113356.html, свободный.
3. Стадухин А.А. Тяговый линейный электродвигатель быстроходного гусеничного шасси // Известия Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технические машины и комплексы / Под ред. Ю.В. Гуляева (Москва – Н. Новгород). 2006. Т. 19 – С. 202-207.
4. Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Применение линейного электродвигателя в качестве альтернативного тягового привода гусеничного шасси // Оборонная техника. / Под ред. В.В. Зеленцова. – 2007. - №3-4 – С. 74-77.