

НА ГОЛ.
Н-Б.Ч.СТС
На правах рукописи

Шеломков Сергей Александрович

**МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТНЫМИ ПОТОКАМИ
В ЭЛЕКТРОТРАНСМИССИИ ПОЛНОПРИВОДНОЙ
МНОГООСНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ.**

Специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

сшз

Москва, 2007 г.

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Купреянов А.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Наумов В.Н.
кандидат технических наук, Соловьев В.И.
старший научный сотрудник

Ведущая организация: ФГУП НИЦИАМТ

Защита диссертации состоится «23» апреля 2007 г. в 14-30 на
заседании специализированного совета Д 212.141.07 в МГТУ им.

Н.Э. Баумана по адресу:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать
по указанному адресу.

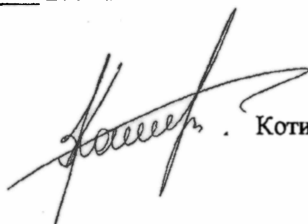
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Котиев Г.О.

НТЕ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1780630

Шеломков С.А. Метод управл

14.05.07

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экспериментальные, теоретические исследования и опыт эксплуатации показывают, что на динамику разгона, подвижность, топливную экономичность колесных машин значительное влияние оказывает схема подвода мощности к ведущим колесам. Особенно это важно для многоосных колесных машин (МКМ).

Улучшение указанных эксплуатационных свойств МКМ связывают с концепцией рационального распределения мощности по колесам в зависимости от условий движения. Для отдельных режимов эксплуатации в коммерческих автомобилях это решают противобуксовочные системы. Однако последнее время возрастает интерес к, так называемым, «гибким» трансмиссиям (электро- (ЭТ) и гидрообъемным (ГОТ)), так как механические не в полной мере удовлетворяют указанным требованиям, поскольку распределяется мощность по колесам в них неоптимальным образом, присутствует «циркуляция» мощности (в заблокированных), сложность конструкции не позволяет управлять каждым колесом индивидуально. Этих недостатков лишены ГОТ и ЭТ и позволяют реализовать практически любой способ распределения мощности по колесам. Однако практически у всех созданных в прошлом ЭТ и ГОТ эти положительные качества нивелировались двумя основными недостатками: невысоким КПД, особенно при частичных нагрузках, обусловленным несовершенством конструкций составных частей, и отсутствием специально разработанного способа управления трансмиссией. Поэтому, как показывает опыт, для «гибких» трансмиссий возникает задача разработки оптимального способа распределения мощности по колесам МКМ. Таких способов было предложено немало, но они были либо теоретическими (и их невозможно было реализовать), либо были созданы для устаревших на сегодняшний день конструкций ЭТ, с низким техническим уровнем. Для современных конструкций ЭТ полноприводных МКМ такие способы управления практически отсутствуют.

Похожие задачи – по управлению многоприводной ЭТ возникают и перед разработчиками электровозов и тепловозов, так как на них все чаще применяют двигатели переменного тока, в том числе и асинхронные.

Таким образом, существует и требует своего решения актуальная научная проблема создание метода управления ЭТ МКМ. Важнейшей научной задачей в этой проблеме является разработка метода управления ЭТ с асинхронными тяговыми электродвигателями (ТЭД), управляемыми по угловой скорости колес. Поскольку данный тип ЭТ с этим способом управления ТЭД, по мнению большинства исследователей, является одним из наиболее перспективных.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является обоснование и разработка метода управления ЭТ МКМ с асинхронными ТЭД по угловой скорости колес, позволяющего снизить мощность потерь в многоприводной

ЭТ и реализовать колесами максимально возможные по сцеплению тяговые силы.

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

1. Разработан метод управления ЭТ с асинхронными ТЭД, управляемыми по угловой скорости, отличающийся низкими потерями мощности в ЭТ МКМ и реализацией колесами максимально возможных по сцеплению тяговых сил;
2. Разработана математическая модель движения МКМ с ЭТ, с возможностью управления ЭТ различными разработанными способами, которая позволила обосновать разработанный способ управления ЭТ и является основой предлагаемого метода;
3. Разработана оригинальная модель взаимодействия колеса с опорной поверхностью;
4. Экспериментальная проверка адекватности разработанной модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью, работоспособности САУ ЭТ макета 12х12 и составных частей ЭТ.

Методы исследований. Исследования проводились с использованием численных методов моделирования движения МКМ с закрепленным рулем при различных способах управления ЭТ и внешних воздействиях. Экспериментальные исследования основывались на использовании макетного образца МКМ 12х12 с ЭТ, частных экспериментах в стендовых условиях ТЭД мотор-колеса макета и экспериментальной проверки адекватности модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью.

Объектом исследования является ЭТ МКМ с индивидуальным приводом асинхронных ТЭД, управляемых по угловой скорости.

Научная новизна. Новизна полученных результатов работы при решении вышеуказанной научной задачи заключается в том, что в ней:

1. Обоснован и разработан метод управления ЭТ МКМ с асинхронными ТЭД по угловой скорости колес, позволяющий снизить мощность потерь в многоприводной ЭТ и реализовать колесами максимально возможные по сцеплению тяговые силы;
2. Создана математическая модель движения МКМ с учетом потерь энергии в ЭТ, позволяющая моделировать различные типы ЭТ для выбора оптимального способа их управления;
3. Разработана оригинальная модель взаимодействия колеса с опорной поверхностью, для применения в модели движения МКМ с ЭТ.

Практическая ценность работы. На основе результатов выполненных исследований для практического использования при разработке способов управления ЭТ создан комплекс программ для ЭВМ. Использование комплекса позволяет имитировать плоское движение МКМ с ЭТ, управляемой по различным законам и способам, в различных дорожных условиях, и тем самым, позволяет значительно сократить сроки разработки САУ ЭТ.

Реализация результатов работы. Диссертационная работа выполнена в Научно-производственном центре «Специальное машиностроение» (НПЦ СМ) и на кафедре СМ-10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В основу диссертации положены результаты исследований, полученные автором лично и в соавторстве при выполнении плановой научной тематики НПЦ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, в ходе выполнения Гособоронзаказа по договору с войсковыми частями 93603-Н и 73835 с 2002 г. по 2006 г. в качестве ответственного исполнителя и исполнителя отдельных этапов тем.

Разработанный способ управления ЭТ с асинхронными ТЭД реализован в макете 12х12 полной массой 90 т, созданного в НПЦ СМ.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались на:

- научных семинарах кафедры СМ10 «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003...2006 гг. (г. Москва);
- научно-технической конференции МГТУ секции «Транспортное машиностроение» проходившей в 2002 г. (г. Москва);
- 14-м симпозиуме: «Проблемы шин и резинокордных композитов» ФГУП «НИИ Шинной промышленности» в 2003 г. (г. Москва);
- VI международной научно-практической конференции ЮНЕСКО «Участие молодых ученых, инженеров и педагогов в разработке и реализации инновационных технологий» в 2003 г. (г. Москва);
- научном семинаре МГТУ МАДИ в 2004 г. (г. Москва);
- 47-й международной научно-технической конференции «Повышение конкурентоспособности автотранспортных средств» в 2004 г. (г. Минск);
- международной научно-технической конференции «Механика-Машиностроение» в 2005 г. (г. Минск);
- научном семинаре в ОАО «Инновационная фирма «НАМИ-Сервис»» в 2007 г. (г. Москва).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в семи статьях и изложено в пяти отчетах по НИР.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, результатов и выводов по работе, списка использованных источников (наименования) и приложения. Работа изложена на 269 листах машинописного текста, в том числе 161 рисунок, 19 таблиц и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертации, определена цель работы, приведено краткое содержание выполненных исследований и отражены основные положения, которые выносятся на защиты.

В первой главе изложены состояние вопроса и обоснование решаемой научной задачи. Исследованы подходы к выбору схем привода автомобилей, в том числе и специальных МКМ. Проведен анализ результатов созданию ЭТ МКМ. Рассмотрены основные преимущества и недостатки известных моделей колеса, применяемых при моделировании плоского движения МКМ с различными типами трансмиссий. Отмечается, что исследования, вошедшие

в диссертацию, опираются на научные разработки Д.А. Антонова, Б.Н. Белосова, А.Б. Дика, А.А. Купреянова, Г.А. Смирнова, Ю.В. Пирковского и других, труды научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана, академии БТВ, 21 НИИИ МО РФ и ФГУП ГНЦ «НАМИ».

Необходимо отметить работы в этой области П.В. Аксенова, А.С. Литвинова, В.Н. Наумова, В.Ф. Платонова, В.И. Соловьева, Е.А. Чудакова, С.Б. Шухмана, А.И. Яковлева и др.

На основании анализа существующих работ, посвященных схемам привода автомобилей, ЭТ МКМ и моделей колеса, было сделано заключение, что внутренние потери мощности ЭТ при движении по твердым дорогам рациональнее учитывать не по изменению скорости движения, а по изменению мощности затрачиваемой на движение; одни из наиболее перспективных на сегодня ЭТ с асинхронными ТЭД, предусматривающими управление колесами по угловой скорости; для специальных МКМ с ЭТ необходима разработка специальных способов управления этими трансмиссиями, только в этом случае возможно использование всех преимуществ ЭТ, а этих способов управления, для таких ЭТ, пока создано не было; для обоснования способа управления ЭТ необходимо разработать математическую модель МКМ и модель взаимодействия колеса с опорной поверхностью. В связи с вышеизложенным были поставлены цель и задачи, сформулированные выше.

Вторая глава посвящена описанию предложенного автором способа управления ЭТ, методу его создания и математической модели плоского движения МКМ с ЭТ по опорной поверхности с описанием процессов в пятне контакта колеса и учетом его упруго-демпфирующих характеристик. Для модели плоского движения МКМ приняты следующие основные допущения:

1. Опорная поверхность - твердая и ровная (подъем или косогор);
2. Колебаниями корпуса МКМ и центра колеса пренебрегаем;
3. Нормальная нагрузка колеса зависит только от наклона опорной поверхности и перераспределении веса МКМ при движении с ускорением;
4. Плоскость вращения колеса - вертикальная;
5. Не учитывается зависимость фрикционных свойств материалов шины и опорной поверхности от температуры при нестационарном качении.

Расчетная схема модели и уравнения движения МКМ в неподвижной системе координат (СК) представлены ниже (рис. 1 и уравнения 1-6):

$$M_a \cdot \ddot{x}_{O_1} = \left(\sum_{i=1}^{12} R_{xi} \right) \cdot \cos \theta + \left(\sum_{i=1}^{12} R_{yi} \right) \cdot \sin \theta - F_{ax} - P_{wx} \quad (1)$$

$$M_a \cdot \ddot{y}_{O_1} = - \left(\sum_{i=1}^{12} R_{xi} \right) \cdot \sin \theta + \left(\sum_{i=1}^{12} R_{yi} \right) \cdot \cos \theta + F_{ay} - P_{wy} \quad (2)$$

$$J_{O_{mc}} \cdot \ddot{\theta} = M_{\Sigma Q_1} \quad (3)$$

$$M_{\Sigma Q_1} = (R_{x1n} + \dots + R_{x6n}) \cdot \frac{B}{2} - (R_{x1s} + \dots + R_{x6s}) \cdot \frac{B}{2} - \\ - (R_{y1n} + R_{y1s}) \cdot L_{1-6} - (R_{y2n} + R_{y2s}) \cdot L_{2-6} - (R_{y3n} + R_{y3s}) \cdot L_{3-6} - (R_{y4n} + R_{y4s}) \cdot L_{4-6}$$

$$-(R_{y5n} + R_{y5x}) \cdot L_{5-6} + ((F_{ax} + P_{wx}) \cdot \sin \theta - (F_{ay} - P_{wy}) \cdot \cos \theta) \cdot L_{0-6} \quad (4)$$

$$J_{\eta} \cdot \ddot{\varphi}_{\eta} + C_{\kappa\varphi} \cdot (\varphi_{\eta} - \varphi_{\kappa_i}) + K_{\kappa\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_{\eta} - \dot{\varphi}_{\kappa_i}) = M_{\eta} \quad (5)$$

$$J_{\kappa_i} \cdot \ddot{\varphi}_{\kappa_i} - C_{\kappa\varphi} \cdot (\varphi_{\eta} - \varphi_{\kappa_i}) - K_{\kappa\varphi} \cdot (\dot{\varphi}_{\eta} - \dot{\varphi}_{\kappa_i}) + R_{\kappa_i} \cdot r_{\kappa_i} + M_{f_i} = 0 \quad (6)$$

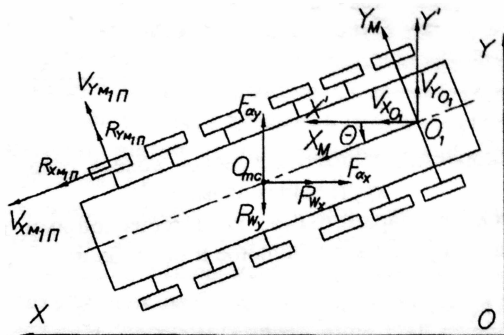


Рис 1. Расчетная схема модели движения МКМ

где x_{O1}, y_{O1} - координаты т. O_1 в неподвижной СК; θ - угол поворота МКМ относительно неподвижной СК; M_a - масса МКМ; J_{O1TC} - момент инерции МКМ вокруг вертикальной оси относительно т. O_1 ; R_{Xmi}, R_{Ymi} (R_{Ymi}, R_{Ymi}) - проекции реакций в пятне контакта i -го колеса, на ось X_m (Y_m) подвижной СК; F_{ax}, F_{ay} - составляющие силы веса действующие на МКМ при движении по косоугору; P_{wx}, P_{wy} - сила аэродинамического сопротивления движению МКМ; B - колея МКМ; $L_{1-6}, \dots, L_{5-6}$ - расстояния между осями 1 и 6, ..., 5 и 6 МКМ; L_{0-6} - расстояние между центром масс МКМ и осью 6; J_{κ_i} - момент инерции сектора шины i -го колеса взаимодействующей с опорной поверхностью (см. рис. 2 б); φ_{κ_i} - угловая координата J_{κ_i} ; J_{η} - момент инерции ротора i -го ТЭД, редуктора, ступицы колеса и оставшейся части шины; φ_{η} - угловая координата J_{η} ; $C_{\kappa\varphi}$ - крутильная жесткость шины; $K_{\kappa\varphi}$ - крутильное демпфирование шины; R_{κ_i} - реакция в контакте колеса с опорной поверхностью; M_{η} - крутящий момент i -го ТЭД; M_{fi} - момент сопротивления качению i -го колеса; r_{κ_i} - радиус качения в свободном режиме i -го колеса.

Модель качения эластичного колеса, нагруженного со стороны МКМ одновременно нормальной нагрузкой P_{zi} , тяговым моментом M_{κ_i} и боковой силой P_{yi} взята из апробированной методики А.Б. Дика (рис. 2 а). В ней заложены, действующие со стороны опорной поверхности на колесо, нормальная R_{zi} , продольная R_{Xmi} и боковая R_{Ymi} реакции, а также момент сопротивления качению M_{fi} . Влиянием стабилизирующих моментов пренебрегаем.

Где $R_{\Sigma i}$ - суммарная реакция в пятне контакта; V_i - линейная скорость центра колеса спроецированный на опорную поверхность; $V_{\omega i}$ - линейная скорость центра колеса, при свободном качении без увода с угловой скоростью ω ; V_{Si} - линейная скорость проскальзывания колеса; δ_i - угол увода колеса; β_{Si} - угол между векторами V_{Si} и V_{Xmi} ; β_{Ri} - угол между векторами R_{Xmi} и $R_{\Sigma i}$.

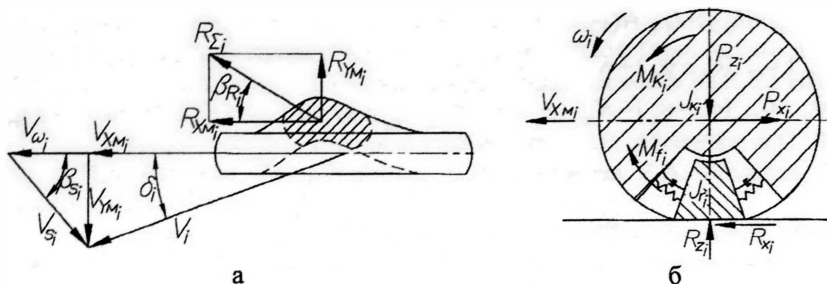


Рис. 2. Силы и скорости катящегося с уводом колеса, разделенного на два крутильных элемента.

Кинематическими параметрами, характеризующими режим качения колеса и его реакции, приняты продольное и боковое проскальзывания колеса:

$$S_{x_i} = \cos \delta_i - \frac{V_{x_{M_i}}}{\omega_{k_i} \cdot r_{k_{c_i}}} \quad (7)$$

$$S_{y_i} = \sin \delta_i \quad (8)$$

$$S_i = \sqrt{S_{x_i}^2 + S_{y_i}^2} \quad (9)$$

$$\beta_{s_i} = \arctg \left(\frac{S_{y_i}}{S_{x_i}} \right) \quad (10)$$

Это позволяет рассчитать $R_{X_{M_i}}$ и $R_{Y_{M_i}}$ с помощью обобщенной «f-S» диаграммы, предложенной Диком, представляющей собой пространственное объединение $\varphi_x(S)$ и $\varphi_y(S)$ диаграмм через R_{S_i} , следующим образом:

$$R_{S_i} = R_{z_i} \cdot f(S_i, \beta_{s_i}) \quad (11)$$

Диком показано, что не использование значений $S_{крх}$ и $S_{кру}$ для заданной «f-S» диаграммы дает незначительную ошибку. Построения этих зависимостей по его методике дало значения $S_{крх} = 0.03 \dots 0.05$ для льда ($\varphi_{л\max} = 0.1$). Что расходится с данными большинства исследователей, по их данным $S_{крх}$ для шин не бывает меньше 0.10, а обычно 0.15 ... 0.25. В данной работе такая ошибка была признана недопустимой и автором предложено корректировка методики Дика - использование экспериментальных значений $S_{крх}$ и $S_{кру}$.

Также модель Дика была уточнена с помощью коррекции максимальных коэффициентов сцепления в продольном и боковом направлениях по методике Д.А. Антонова и с помощью зависимости $\lambda = f(R_z, p_w)$, предложенной В.А. Петрушовым. При этом учитывается линейная скорость МКМ, прослойка воды на дороге, изменение нормальной нагрузки, отклонение давления воздуха в шине, износ протектора, изменение характеристик шины от ее температуры.

Разделение колеса на два крутильных элемента было предложено А.А. Купреяновым (рис. 2 б). Это преследует цель заложить в модель податли-

вость шины на кручение и учесть упруго-демпфирующие характеристики колеса в окружном направлении. Это позволяет учесть взаимосвязи силовых и кинематических параметров колеса не только в диапазоне низких частот, как в работе Дика, но и в области высоких (до 40 Гц), что важно при учете переходных процессов обусловленных переменным крутящим моментом или переменным углом увода, как показано А.А. Полунгяном и А.А. Купреяновым. Такие режимы имеют место при работе противобуксовочных систем и т.д.

Крутящий момент ТЭД вычисляется согласно различным схемам ЭТ рассмотренным в данной работе, с помощью модели электродвигателя с преобразователем частоты, взятой из электротехнической литературы (работы Ключева В.И. и Осипова О.И.).

В модель заложено несколько способов управления ЭТ МКМ, в том числе и разработанный автором. Согласно исследованиям, выполненным в НИЦ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, наиболее приемлемым является вариант с регулированием по угловым скоростям колес, так как их контроль реализуется простым и надежным способом, а управление ТЭД по частоте вращения на сегодняшний день один из наиболее отработанных и надежных. В предложенном способе водитель управляет МКМ с помощью педали угловой скорости эквивалентного колеса УСЭК (аналог педали «газа»), рулевого колеса и задатчика положения полюса поворота. УСЭК - угловая скорость колеса идеальной геометрии находящегося по середине базы на середине колеи МКМ и его плоскость вращения совпадает с вектором скорости данной точки (т.е. колесо катится по траектории движения МКМ и его плоскость вращения касательная к ней). В движении колеса могут оказаться в разных условиях по сцеплению, и для реализации каждым из них максимальной тяговой силы требуется задать им различное проскальзывание, что водителю сделать невозможно. В способе управления водитель педалью УСЭК задает линейную скорость МКМ (произведением УСЭК на статический радиус колеса).

При криволинейном движении угловые скорости колес корректируются САУ с учетом кривизны их траекторий по углу поворота рулевого колеса и положения полюса поворота, что значительно уменьшает возможность «циркуляции» мощности в этом случае.

САУ облегчает водителю управление МКМ в различных дорожных условиях. Это реализовано, в том числе, и введением 5 зависимостей УСЭК от угла отклонения педали (аналог многоступенчатой трансмиссии).

«Циркуляция» мощности в ЭТ может иметь место и при прямолинейном движении, что часто встречается на практике в МКМ и приводит к значительному расходу топлива, износу шин и неравномерности тяговых сил по колесам. Для исключения этого в способе управления ЭТ предусмотрено:

1. С заданной точностью при прямолинейном движении угловые скорости всех колес задаются САУ равными.

2. При переходе ТЭД в тормозной режим, отключать этот ТЭД от питания. При этом угловая скорость этого колеса будет отличаться от скоростей

остальных колес, из-за отличия радиуса качения в свободном режиме.

3. В зависимости от значений кинематических параметров колеса ему задается большее значение угловой скорости, что переводит колесо в ведущий режим и выравнивает продольные реакции по всем колесам МКМ.

4. Новое значение угловой скорости поддерживается в течение определенного времени, а потом САУ производит контроль ряда условий и при необходимости устанавливается новое значение угловой скорости колеса.

Кроме того, разработанный способ непрерывно ограничивает величину проскальзывания колес для реализации ими максимальной силы тяги. В способе управления это заложено тремя альтернативными вариантами:

1. По контролю отношения линейного ускорения корпуса МКМ к угловому ускорению каждого колеса: $a_x/\varepsilon_i < K_{\text{ак}}$. В случае выполнения условия уменьшается угловая скорость этого колеса, пока отношение a_x/ε_i не станет $\geq K_{\text{ак}}$. Этот способ позволяет определить момент начала перехода колеса в буксование, он используется в современных ПБС. Его можно назвать способом регулирования проскальзывания колес по прогнозу возможного буксования.

2. По контролю проскальзывания каждого колеса: $S_i > S_{\text{пред}}$, и в случае выполнения уменьшает угловую скорость колеса, пока проскальзывание не станет меньше $S_{\text{пред}}$. Это условие является ограничением угловой скорости колеса по заданному проскальзыванию и позволяет индивидуально регулировать проскальзывание в оптимальных пределах, это способ регулирования непосредственно проскальзывания колес.

3. По крутящему моменту. САУ контролирует проскальзывание каждого колеса на предмет выполнения условия: $S_i > S_{\text{пред}}$. В случае выполнения значение крутящего момента колеса принимает за предельное. Далее САУ поддерживает крутящий момент колеса не больше этого предельного значения, определенное время. Это ограничение угловой скорости колеса по заданному проскальзыванию с помощью крутящего момента на ТЭД, что позволяет индивидуально регулировать крутящий момент каждого колеса, не допуская превышения предела по сцеплению. Это способ регулирования непосредственно крутящих моментов колес.

Во всех трех вариантах реализуется ограничение проскальзывания колес и поддержания тяговых сил максимально возможными по сцеплению. Фактически этим реализуется ограничение подводимых к колесам мощностей (моментов), в первых двух вариантах косвенно, а третьем напрямую. Выбор из них наиболее рационального варианта для конкретной ЭТ может быть сделан с учетом особенностей эксплуатации МКМ и результатов моделирования этих способов с помощью выше описанной модели. Первые два варианта ограничения проскальзывания колес были реализованы в ЭТ макета 12х12, так как их реализация возможна при регулировании ТЭД мотор-колес по угловой скорости вращения. Третий вариант требует векторного управления ТЭД, что позволяет управлять угловой скоростью и крутящим моментом. Однако этот способ пока не достаточно отработан и надежен для использо-

вания его в ЭТ МКМ, но в будущем ситуация может измениться. Поэтому наличие этого способа ограничения проскальзывания, по мнению автора, вполне оправдано.

Используя модель плоского движения МКМ, можно для ЭТ, управляемой различными способами, оценить мощности потерь в ТЭД, механических приводах между ними и колесами и в самих катящихся колесах и на основе этих мощностей потерь судить о целесообразности применения того или иного способа управления. Для расчета мощности потерь в зависимости от внешнего сопротивления модель плоского движения МКМ была упрощена, так как объем вычислений возрастал, а потребность в моделировании процессов в пятне контакта отсутствовала. Полученная модель позволила рассчитать M_{π} и R_{X_i} , аналогично модели Смирнова Г.А. (рис. 3 а). Отличие ее в том, что в расчетах полностью имитировался предложенный способ управления ЭТ: с последовательным отключением ТЭД колес с отрицательными M_{π} (рис. 3 б), а затем задание им большего значения угловой скорости.

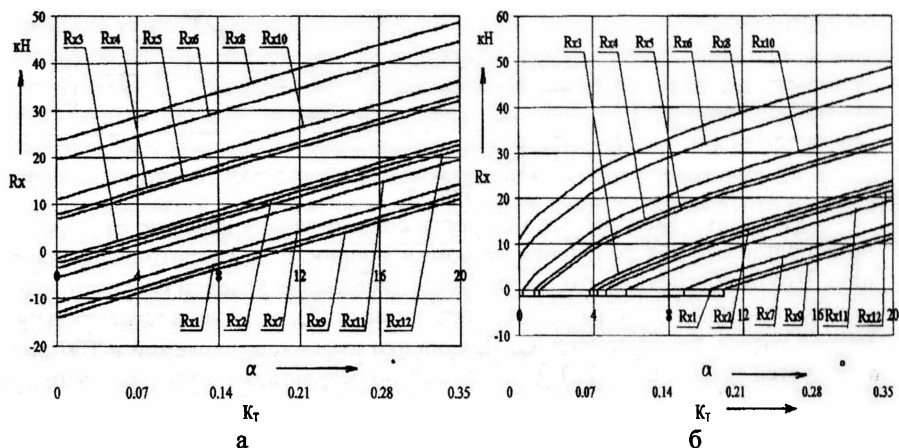


Рис. 3. Продольные реакции колес

Рассчитанные значения R_{X_i} для случая управления ЭТ по принципу равенства угловых скоростей колес представлены на рис. 3 а. Как видно из графиков, отрицательные реакции на колесах, т.е. «циркуляция» мощности сохраняются до значительных значений внешнего сопротивления. Причина этого, как показано Ю.В. Пирковским, Г.А. Смирновым и др. – отличие в радиусах качения колес в ведомом режиме, из-за различных размеров колес (допуск на размер, износ), нормальных нагрузок, давления воздуха в шинах, их движением по различным траекториям в поворотах, а также кинематического несоответствия в любой трансмиссии (особенно у МКМ).

Макет 12х12 был оборудован шинами 1600х600-685 В-178 чьи статические радиусы в процессе эксплуатации принимали различные значения, отличаясь от номинального 730 мм на $-4,1...+1\%$ (до -15%). Согласно ГОСТ

17394-79 «Шины широкопрофильные с регулируемым давлением» допуск на статический радиус этих шин 730 ± 12 мм (730 мм $\pm 1,6$ %). В процессе испытаний были проведены неоднократные замеры статических радиусов, результаты которых приведены в приложении и были заложены в расчет.

Для сравнения различных вариантов управления ЭТ рассчитывались мощности потерь участка: «ТЭД-редуктор-колесо» (рис. 4). Где $N_{эл}$ - электрическая мощность потребляемая ТЭД (или вырабатываемая им в режиме рекуперации); $N_{пот\ ТЭД}$ - мощность потерь в ТЭД; $N_{ТЭД}$ - механическая мощность ТЭД; $M_{ТЭД}$ - крутящий момент ТЭД; $\omega_{ТЭД}$ - угловая скорость ТЭД; $N_{пот\ ред}$ - мощность потерь в редукторе; N_K - мощность на выходе редуктора; M_K - крутящий момент на выходе редуктора; ω_K - угловая скорость выходного вала редуктора; N_{fk} - мощность сопротивления качению шины, где:

$$N_{fk} = M_a \cdot g \cdot f \cdot r_{kc} \cdot \omega_K + \lambda_p \cdot \omega_K \cdot R_x^2 \quad (12)$$

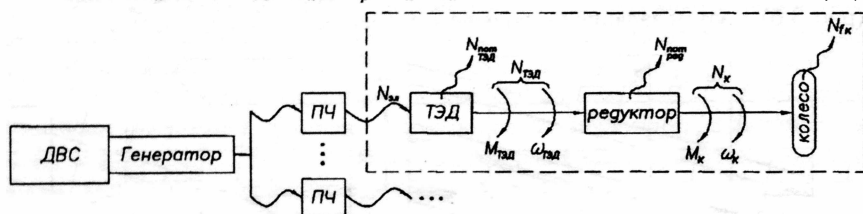


Рис. 4

Указанную зависимость мощности сопротивления качению от R_x можно использовать для получения экономии мощности на сопротивление качению. Чтобы обеспечить это предлагается увеличение угловой скорости ведомого колеса на постоянный (а) или переменный (б), от кинематических параметров колеса, коэффициент K_ω . Для оценки мощности, теряемой в ТЭД, используется график его КПД, полученный по результатам стендовых испытаний.

Таким образом, используя в основе равенство угловых скоростей колес можно реализовать семь различных способов управления ЭТ:

1. Торможением ТЭД противовключением;
2. Торможением ТЭД на тормозных резисторах;
3. Торможением ТЭД с рекуперацией электрической энергии;
4. Отключением ТЭД колес с отрицательными продольными реакциями;
5. Увеличением угловой скорости ведомого колеса на вариант а);
6. Увеличением угловой скорости ведомого колеса вариант б);
7. «Идеальный» режим управления.

«Идеальным» режимом был принят вариант, когда все продольные реакции колес равны (что может быть реализовано, например, при одинаковых статических радиусах), т.е. полностью исключалась «циркуляция» мощности. Реализовать это на практике не возможно, но он будет полезен для сравнения с ним по эффективности всех остальных режимов. КПД участка трансмис-

сии: «ТЭД-редуктор-колесо» рассчитывалась через сумму электрических мощностей, подведенных от силовой установки к ТЭД, и мощности, необходимой на движение МКМ:

$$\eta_{уч-тр} = \frac{N_{двиг}}{N_{эл}} \quad (13)$$

В третьей главе приведены результаты расчетов по математической модели из второй главы.

Плоское движение МКМ: Максимально интенсивный разгон на подъеме в 8° по льду ($\phi_{\text{хmax}}=0.2$) представлен на рис. 5 и 6 (графики для одного колеса). Где 1 - без ограничения угловых скоростей колес, 2 - при регулировании угловых скоростей по проскальзыванию, 3 - при регулировании по отношению ускорений, 4 - при регулировании по крутящему моменту. Максимально интенсивный разгон на подъеме на «миксте» (справа лед $\phi_{\text{хmax}}=0.1$, слева асфальт $\phi_{\text{хmax}}=0.7$) представлен на рис. 7 и 8. Где 1 - без ограничения угловых скоростей колес, 2 - с ограничением для максимально возможного разгона и хорошей устойчивости, 3 - с ограничением для лучшей устойчивости, 4 - вариант равенства крутящих моментов по всем колесам.

Результаты расчета потерь мощности на участке ЭТ: «ТЭД-редуктор-колесо», при управлении различными способами, скорость МКМ 12 м/с приведены на рис. 9. Как видно, предложенные способы управления ЭТ позволяют сэкономить заметную часть мощности силовой установки, что позволит улучшить экономичность МКМ. Особенно это будет заметно при движении по дорогам с усовершенствованным покрытием, а ведь именно в этих условиях от МКМ требуют максимальной экономичности. Кроме этого колесами МКМ реализуются максимально возможные по сцеплению продольные силы, что обеспечивает наилучший разгон, при незначительном влиянии на курсовую устойчивость. При необходимости это воздействие можно еще более снизить, незначительно проиграв в динамике разгона.

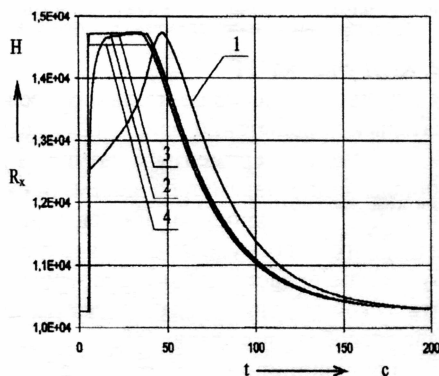


Рис. 5. Продольные реакции колеса

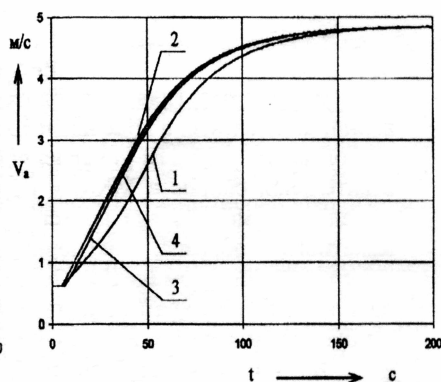


Рис. 6. Линейная скорость МКМ

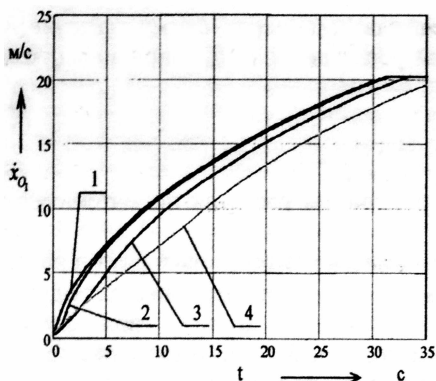


Рис. 7. Проекция линейной скорости
МКМ на ось x

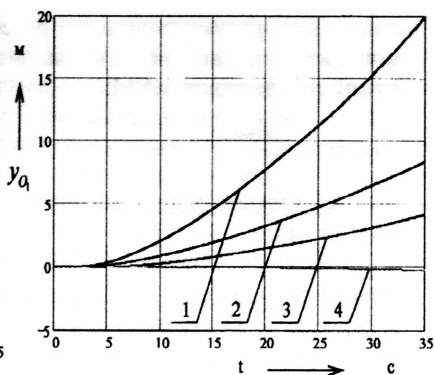


Рис. 8. Снос МКМ по оси y

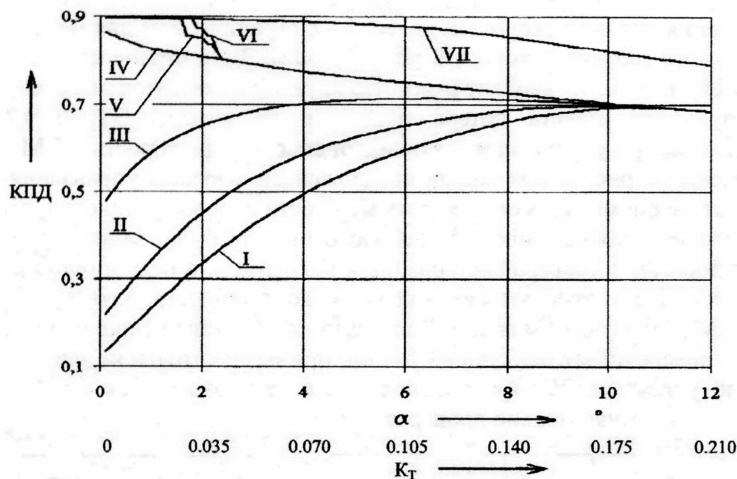
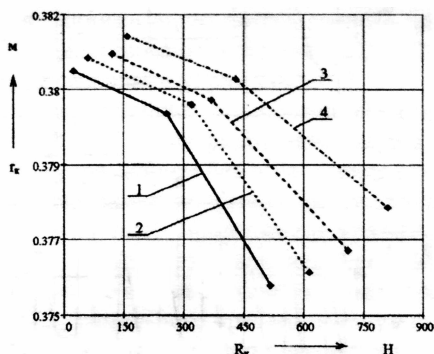


Рис. 9. КПД участка ЭТ

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований, полученных в ходе исследовательских испытаний макета 12×12 с ЭТ и всеколесным рулевым управлением, а также эксперименты с датчиком действительной скорости МКМ и по определению параметров математической модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью. Дается описание макетного образца, экспериментального оборудования, контрольно-измерительного комплекса. По результатам представленных экспериментов дается оценка адекватности математической модели и подтверждается положения предложенного во второй главе способов управления ЭТ.

Были проведены эксперименты для принципиальной проверки адекватности модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью. Получены ре-

зультаты на стенде с беговыми барабанами (автомобиль УАЗ-3741 с шинами 8,40-15) при стационарных (рис. 10 и 11) и нестационарных режимах (рис. 12) в которых подтверждено следящее изменение радиуса качения вслед за изменением продольной реакции. Экспериментальная зависимость $\lambda=f(V)$ не имеет аналогов и можно утверждать, что она получена впервые.



1 – при 40 км/ч; 2 – при 50 км/ч;
3 – 60 км/ч; 4 – при 70 км/ч.

Рис. 10

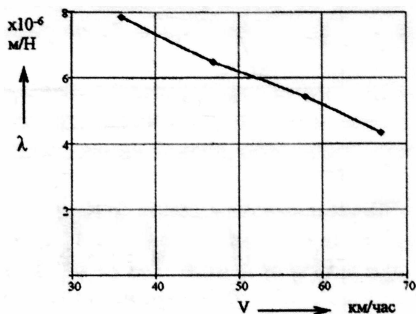
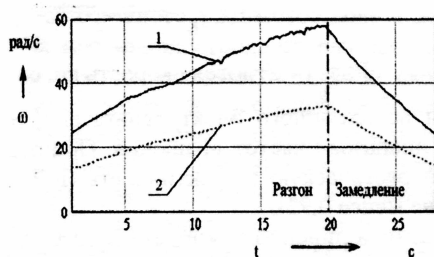
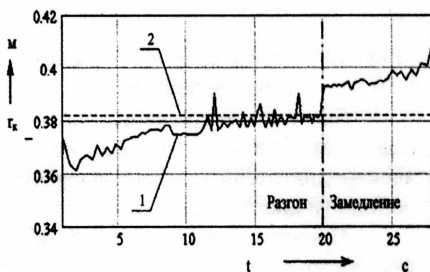


Рис. 11



а. Угловые скорости вращения колеса (1) и барабана (2)



б. Радиус качения колеса: r_{k1} – 1, r_{k2} – 2

Рис. 12

На местности были получены зависимости изменения угловых скоростей ведущих колес автомобиля УАЗ (рис. 13). Похожие данные были получены расчетным путем по предложенной в работе модели взаимодействия колеса с опорной поверхностью, для механической трансмиссии аналогичного автомобиля с дифференциалом в узловой точке (рис. 14).

Анализ полученных экспериментальных и расчетных данных позволяет говорить о наличии автоколебаний в трансмиссии за счет буксования колес; амплитуда колебаний угловой скорости больше на буксующем колесе, а амплитуда моментов больше на небуксующем колесе; частота и амплитуда колебаний угловой скорости колес зависит от фрикционных свойств опорной поверхности. Как видно из рисунков 13 и 14 амплитуды и частоты характер-

ных колебаний близки друг другу.

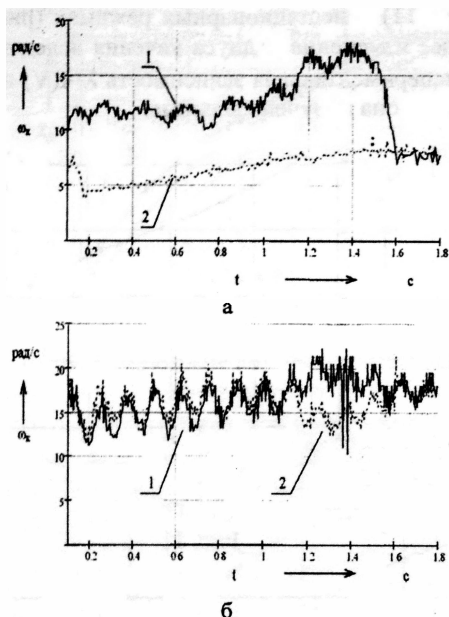


Рис. 13 Угловая скорость правого колеса (1), левого (2)

Были подтверждены параметры асинхронного электродвигателя, используемого в мотор-колесе, во всем диапазоне частот вращения. При этом электродвигатель показал высокую энергетическую эффективность (КПД в основном диапазоне частот вращения не менее 0,92).

Проверена работоспособность датчика линейной скорости МКМ, примененного в САУ макета 12х12, его погрешность измерения не более 3 %.

Приложение содержит подробное описание способа управления ЭТ МКМ, разработанного автором работы, который изложен во второй главе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Обоснован и разработан метод управления ЭТ МКМ с асинхронными ТЭД по угловой скорости колес, позволяющий снизить мощность потерь в многоприводной ЭТ и реализовать колесами максимально возможные по сцеплению тяговые силы.
2. Разработана математическая модель движения МКМ с ЭТ, с возможностью управления ЭТ различными разработанными способами, которая позволила обосновать разработанный способ управления ЭТ и является основой предлагаемого метода.
3. Разработана оригинальная модель взаимодействия колеса с опорной поверхностью.

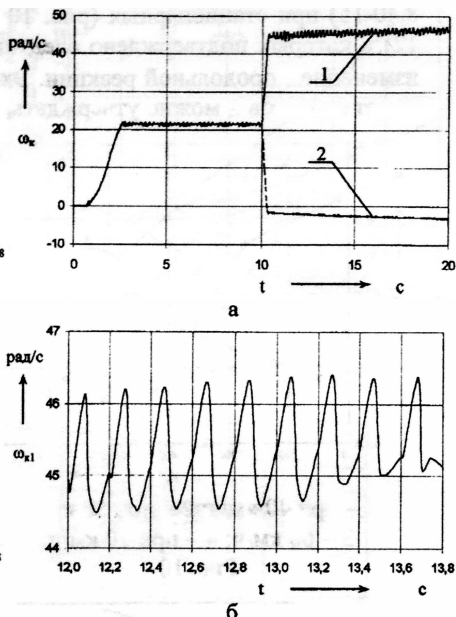


Рис. 14 Угловая скорость колес

4. Разработана программа расчета на ЭВМ различных способов управления ЭТ, позволяющую выбрать оптимальный для конкретного МКМ.
5. Установлено, что разработанный способ управления ЭТ обеспечивает:
 - а. отсутствие «циркуляции» мощности в ЭТ МКМ;
 - б. приближение к равенству продольных сил тяги по колесам МКМ;
 - в. минимизацию потерь энергии в ЭТ - при движении МКМ по усовершенствованной дороге КПД ЭТ наилучший в сравнении с другими способами управления;
 - г. эффективное ограничение проскальзывания колес по максимуму сцепления тремя различными вариантами, что позволяет, по сравнению с управлением без ограничения проскальзывания колеса, обеспечить при максимально интенсивном разгоне:
 - на льду: поддержание продольных реакций колес максимальными – выигрыш в значениях реакций до 18%; лучшую динамику – на подъеме в 8° выигрыш во времени разгона до 13 сек; выигрыш в угле максимального преодолеваемого подъема: 11° против 9,4°.
 - на «миксте» при закреплённом руле: выигрыш во времени разгона МКМ до 5 сек; уменьшение бокового сноса МКМ в 4,75 раза (с 20 до 4,2 м); уменьшение разворота МКМ в 4 раза.
6. В работе экспериментально получены следующие результаты: параметры асинхронного ТЭД мотор-колеса подтверждены во всем диапазоне частот вращения; электродвигатель показал высокую энергетическую эффективность; датчик действительной скорости работоспособен и его погрешность измерения составила не более 3 %; установлено что эксперимент на стенде с беговыми барабанами позволяет получить результаты для шин с различными упругими характеристиками и конструкционными параметрами как на стенде, так и на местности, и тем самым качественно подтвердил используемую модель качения колеса.
7. Экспериментально установлена зависимость коэффициента тангенциальной эластичности колеса от линейной скорости автомобиля.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Алгоритм управления мотор-колесами АТС / Б.Н. Белоусов, А.А. Купреянов, С.А. Шеломков и др. // Автомобильная промышленность. -2003. - № 4. - С. 15-17.
2. Экспериментальная оценка изменения кинематических параметров движения автомобиля при частичном и полном буксовании колес / А.А. Купреянов, С.А. Шеломков и др. // 14-й симпозиум: Проблемы шин и резинокордных композитов ФГУП НИИ Шинной промышленности. - М., 2003. - С. 21-25.
3. Купреянов А.А., Попов С.Д., Шеломков С.А. Алгоритм управления электротрансмиссией многоосного полноприводного шасси // Ученые труды молодых

- ученых, инженеров и педагогов в разработке и реализации инновационных технологий.: IV Международная научно-практическая конференция ЮНЕСКО. - М. - 2003. - С. 138-142.
4. Белоусов Б.Н., Купреянов А.А., Шеломков С.А. Метод управления электротрансмиссией с двигателями переменного тока многоосного полноприводного шасси // Повышение конкурентоспособности автотранспортных средств: Сб. науч. тр. НИРУП «Белавтотракторостроение». - Минск, 2004. - С. 257-262.
 5. Купреянов А.А., Попов С.Д., Шеломков С.А. Алгоритм управления электротрансмиссией многоосного полноприводного шасси // Секция Транспортное машиностроение.: Материалы научно-технической конференции. - М., 2005. - С. 3-8.
 6. Купреянов А.А., Шаруев Д.А., Шеломков С.А. Разработка методов управления мощными потоками в трансмиссиях ТС с учетом особенностей контактного взаимодействия и трибологических свойств системы: «эластичное колесо – опорная поверхность» // Трибология и надежность. - СПб., 2005. - С. 9-22.
 7. К вопросу о снижении мощности потерь в электротрансмиссии и при качении колес / А.А. Купреянов, С.А. Шеломков // Автомобильная промышленность. - 2006. - №5. - С. 17-18.
 8. Обоснование создания перспективных многоосных специальных колесных шасси с использованием электротрансмиссии. Отчет по теме «Бальзамин» / НППЦ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы С.Д. Попов. ГР № 3430270, 4539802, Инв. №8, 11/НППЦ СМ. - М., 2003. - 314 с.
 9. Системные исследования модернизационного потенциала В и ВТ РВСН в обоснование концепции поэтапной модернизации их основных систем и элементов. Отчет по теме «Претендент» / НППЦ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы С.Д. Попов. ГР №5003207, 6017106, 6239905, Инв.№25, 34, 35/НППЦ СМ. - М., 2005. - 506 с.

Подписано к печати 5.03.2007.

Заказ 126 . Объем 1,0 п. л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.