

На правах рукописи



ТАРАСОВ Алексей Николаевич

**УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ТЕЛЕЖКИ ЛОКОМОТИВА В ПРЕДЕЛЬНЫХ
ПО СЦЕПЛЕНИЮ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ**

05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Брянск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет» (БГТУ) на кафедре «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Федяева Галина Анатольевна

Официальные оппоненты: **Пречисский Владимир Антонович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта», профессор;

Литовченко Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)», кафедра «Электропоезда и локомотивы», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Защита диссертации состоится «26» декабря 2018 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ (МИИТ) и на сайте www.miit.ru.

Автореферат разослан «___» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Гречишников Виктор Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном тяговом электроприводе (ТЭП) отечественных и зарубежных локомотивов широко внедряются двигатели переменного тока взамен традиционных коллекторных двигателей последовательного возбуждения. На мощных локомотивах с высоким использованием сил сцепления наибольшее распространение получил ТЭП с асинхронными тяговыми двигателями (АТД). В частности, АТД применены на отечественных серийно выпускаемых тепловозах 2ТЭ25А, электровозах 2ЭС10, ЭП20, опытном электровозе 2ЭВ120.

Наиболее полное использование потенциальных условий сцепления, а значит, и наибольшие тяговые и тормозные усилия можно получить при индивидуальном регулировании АТД каждой оси (поосном регулировании). Однако по условиям размещения и экономическим соображениям часто применяют параллельное подключение АТД тележки к одному инвертору (совместное регулирование). ТЭП с асинхронными двигателями (АД) ввиду ряда известных особенностей является весьма сложным объектом управления даже при индивидуальном регулировании осей, параллельное же подключение АТД к одному инвертору еще более усложняет систему. В современных условиях весьма актуально, наряду с внедрением импортных систем управления (СУ), создавать и совершенствовать с учетом мировых достижений собственные алгоритмы управления ТЭП, используя для их отработки, как уже имеющиеся образцы локомотивов, так и новые компьютерные технологии.

Для этих целей хорошо подходит четырехосный гибридный маневрово-вывозной тепловоз ТЭМ9Н с совместным регулированием АТД, разработанный в рамках пилотного проекта Людиновским тепловозостроительным заводом. На данном тепловозе применен комплекс технических решений в системе электропитания, снимающих ряд ограничений по управлению ТЭП по сравнению с обычным электроприводом тепловоза. Использование в системе электропитания аккумуляторной батареи с огромным энергозапасом (300 кВт*часов) и суперконденсаторов дает возможность отойти от традиционного для тепловозов ступенчатого (позиционного) изменения мощности дизеля на тягу и обрабатывать алгоритмы регулирования ТЭП с АД, применимые как для тепловозов, так и для электровозов нового поколения.

Цель диссертационной работы – повышение предельных по сцеплению усилий, реализуемых электроприводом локомотивов при совместном управлении асинхронными тяговыми двигателями тележки.

Задачи исследования

1. Анализ алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий и обоснование применения в тяговом электроприводе систем разрывного управления АТД.

2. Разработка функциональной схемы СУ, способа и алгоритмов управления ТЭП с совместным регулированием АД тележки на пределе сцепления.

3. Разработка математической и компьютерной модели СУ ТЭП с совместным управлением параллельно включённых АД тележки на пределе сцепления.

4. Разработка для механической подсистемы ТЭП гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н математических и компьютерных моделей и анализ на

их основе динамических процессов в ТЭП.

5. Создание электромеханической компьютерной модели ТЭП гибридного маневрово-вывозного тепловоза и исследование на основе численных экспериментов алгоритмов управления разгоном и электрическим торможением локомотива с совместным регулированием АД тележки в режиме реализации предельных усилий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны способ управления, функциональная схема и алгоритмы функционирования тягового электропривода локомотива с совместным управлением АД тележки на пределе сцепления;

- созданы математические и комплексные компьютерные модели тягового электропривода гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н с системой управления, реализующей предельные по сцеплению усилия при совместном управлении АД тележки;

- выполнен анализ работы ТЭП с совместным разрывным управлением АД тележки при изменении условий сцепления, показавший, что предложенные алгоритмы регулирования позволяют частично скомпенсировать неоптимальность конструкции механической подсистемы ТЭП и обеспечить реализацию потенциальных условий сцепления не менее чем на 90 %.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработанные модели и методики моделирования обеспечивают возможность анализа и отработки перспективных вариантов управления ТЭП с совместным регулированием АД тележки.

Расчитано перераспределение вертикальных нагрузок осей гибридного тепловоза ТЭМ9Н в режиме тяги и электрического торможения; предложена система управления АД локомотива с совместным регулированием АД тележки на пределе сцепления; определены особенности функционирования ТЭП с совместным управлением АД при реализации предельных усилий с использованием в СУ сигнала обратной связи по скорости АД различных осей тележки; исследована работа ТЭП при варьировании потенциального коэффициента сцепления в диапазоне 0,4 - 01 и разбросе параметров параллельно работающих АД до 15 %.

Результаты работы приняты Людиновским тепловозостроительным заводом (ЛТЗ) для использования при разработке и совершенствовании тепловозов нового поколения. Часть разработанных моделей и реализующие их программы внедрены в учебный процесс Брянского государственного технического университета (БГТУ).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы теории электропривода, теории электрических машин, теории электрической тяги, а также методы математического и компьютерного моделирования электрических и механических систем и современные промышленные программные комплексы (ПК): MatLab/Simulink и «Универсальный механизм» (UM). Электрическая подсистема ТЭП моделируется в ПК MatLab/Simulink, механическая часть с высокой степенью детализации моделируется в ПК UM, для совмещения электрической и механической подсистем в единую электромеханическую модель используется специальный интерфейс CoSimulation, разработанный на кафедре

«Прикладная механика» БГТУ.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается корректностью принятых допущений и разработанных на их основе моделей, а также удовлетворительным совпадением результатов, полученных при моделировании ТЭП ТЭМ9Н, с осциллограммами натуральных испытаний тепловоза ТЭМ9Н.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы и ее отдельные разделы были представлены на VI Международной (XVIII Всероссийской) и VII Международной (XIX Всероссийской) конференциях по автоматизированному электроприводу АЭП-2012 (Иваново, 2012 г.) и АЭП-2014 (Саранск, 2014 г.); VII и VIII Международных симпозиумах «Элтранс-2013» и «Элтранс-2015» (Санкт-Петербург, 2013 г., 2015 г.); XIV Научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (Москва, 2013 г.); X Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (Санкт-Петербург, 2015 г.); II и III Научно-технических семинарах Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте (Брянск, 2014 г., 2016 г.); Всероссийской научно-практической конференции Автоматизированный электропривод и автоматика (г. Липецк, 2014 г.); Научно-практическом семинаре «НИУ «МЭИ» Электропривод в транспорте (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 печатные работы, в том числе 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, получено три патента на изобретение и три на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 124 наименования, и приложения. Работа содержит 134 страницы основного текста, включая 60 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и дана краткая характеристика диссертационной работы.

В главе 1 на основе обзора технической литературы выполнен анализ алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий, обосновано применение в тяговом электроприводе систем разрывного управления АД, выбраны методы и поставлены задачи исследования.

СУ ТЭП локомотивов формировались исторически в зависимости от применяемых тяговых электродвигателей, развития элементной базы СУ и теории электропривода. Соответственно изменялись и алгоритмы управления ТЭП в режиме реализации предельных тяговых усилий, но, несмотря на разнообразие конкретных решений, данные алгоритмы можно разделить по принципу функционирования на две большие группы: 1) алгоритмы защиты от буксования и юза; 2) алгоритмы реализации потенциального коэффициента сцепления.

Алгоритмы первой группы начинают функционировать только при попадании рабочей точки на падающий участок характеристики сцепления в зону буксования и всегда включают в себя два этапа: а) обнаружение буксования (или юза);

б) подавление избыточного проскальзывания (возвращение рабочей точки на восходящий участок). Алгоритмы второй группы встраиваются в систему регулирования скорости тяговых двигателей, обеспечивая при необходимости реализацию предельного коэффициента сцепления (рисунок 1).

Реализация ТЭП предельного коэффициента сцепления при совместном регулировании АД требует высокого быстродействия и пониженной чувствительности СУ к разбросу параметров, этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют системы разрывного управления АД.

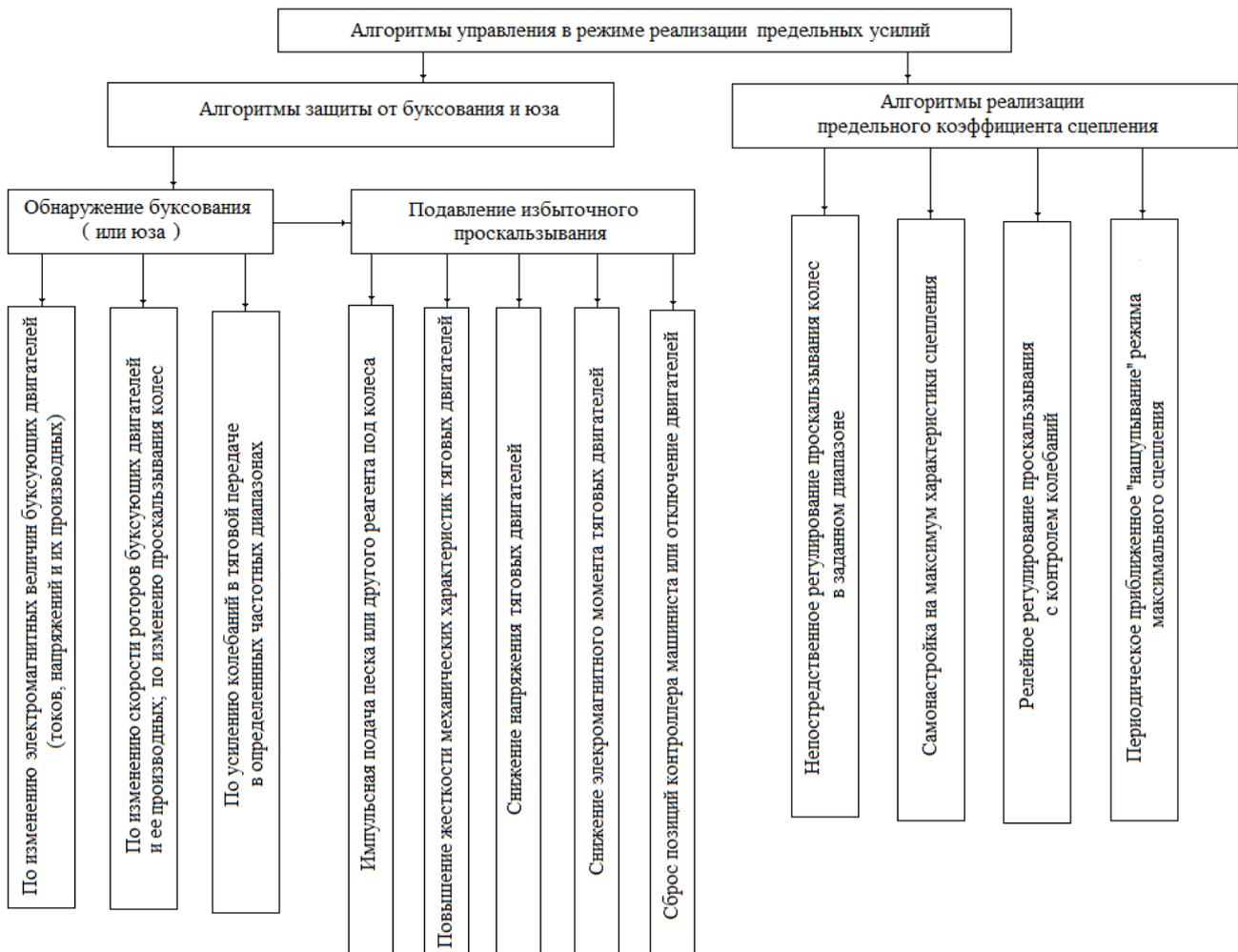


Рисунок 1 – Классификация алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий

Изучением ТЭП с АД как единой управляемой электромеханической системы занимались отечественные и зарубежные ученые: В.И. Андерс, Х.П. Бауэр, А.Т. Бурков, М. Бушер, Ю.И. Гусевский, А.А. Зарифьян, В.Л. Кодкин, П.Г. Колпахчян, Х.П. Котц, А.С. Курбасов, В.А. Кучумов, В.В. Литовченко, П.Ю. Петров, Е.М. Плохов, В.А. Пречисский, Г.А. Федяева, М. Флейшер, В.А. Шаров, Х.Ю. Шварц, В. Энгель и другие ученые.

Однако электропривод с совместным регулированием АД на пределе по сцеплению исследован недостаточно и требует дальнейшей проработки.

В главе 2 разработаны функциональная схема, способ и алгоритмы работы СУ ТЭП гибридного локомотива с совместным управлением АД тележки на пределе по сцеплению, а также математические и компьютерные модели электрической (сило-

вой и управляющей) подсистемы ТЭП.

В СУ ТЭП гибридного тепловоза ТЭМ9Н внедрены наиболее динамичные алгоритмы разрывного управления АД при регулировании потокосцепления статора, позволяющие реализовать и испытать различные варианты управления приводом на пределе по сцеплению колес с рельсами. Стратегия разрывного управления тягой имеет три основных преимущества: 1) достижение предельной физически возможной скорости изменения момента, что позволяет построить систему использования реального коэффициента сцепления; 2) минимизация частоты переключения приборов; 3) получение максимально возможной первой гармоники напряжения (соответственно, - величины потока, - в режиме однократной коммутации). Кроме того, обеспечивается стабильность работы тягового привода при колебаниях напряжения в промежуточном контуре преобразователя частоты (ПЧ) и изменении параметров объекта управления.

Функциональная схема четырехосного гибридного тепловоза (рис. 2) показана для двух двигателей первой тележки (АТД1, АТД2), подключенных параллельно к одному автономному инвертору напряжения (АИН), для двигателей второй тележки (АТД3, АТД4) схема аналогична. При пуске локомотива контроллером машиниста (КМ) для СУ ТЭП сначала задается максимальная сила тяги, поступающая в блок вычисления задания момента с учетом ограничений (БВЗМ) и фактически определяющая ограничение по моменту АД во внутреннем контуре регулирования момента. Далее при помощи КМ задается требуемая скорость локомотива, поступающая в блок вычисления задания скорости (БВЗС) и определяющая ограничение задания частоты вращения АД во внешнем контуре регулирования скорости. После этого появляется задание на момент на выходе регулятора частоты вращения АД, и локомотив начинает разгон, постепенно увеличивая силу тяги (до заданной максимальной величины, если позволяет сцепление) и пытается достичь установленной КМ скорости.

Для реализации предельных усилий задание на частоту вращения двигателя, приведенную к линейной скорости колеса ($V_{Дз}$), определяется в БВЗС путем интегрирования задания на линейное ускорение колеса (a_l или a_0), вычисляемое в блоке адаптации ускорения (БАУ) и жестко привязанное к линейному ускорению локомотива:

- в режиме тяги $a_l = a_l + \Delta a_{k1}$, $a_0 = a_l - \Delta a_{k2}$;

- в режиме электрического торможения $a_l = a_l - \Delta a_{k1}$, $a_0 = a_l + \Delta a_{k2}$,

где a_l - линейное ускорение локомотива; a_l и a_0 - задания на линейное ускорение колес; Δa_{k1} и Δa_{k2} - небольшие положительные величины, адаптируемые к массе состава и условиям движения.

Ускорение локомотива a_l , изменяющееся в процессе движения, вычисляется в БАУ по изменению оценочной скорости локомотива V_l (определяемой по измеренным частотам вращения роторов АД $\omega_1 - \omega_4$) за заданные промежутки времени Δt ($a_l = \Delta V_l / \Delta t$). Если на локомотиве установлен датчик линейной скорости (ДV), его сигнал показан пунктиром на рисунке 2, то для вычисления ускорения локомотива лучше использовать этот сигнал.

Переключение между значениями a_1 и a_0 осуществляется под контролем релейного регулятора скольжения колес (РСК) с адаптивным гистерезисным допуском. Для снижения фрикционных автоколебаний на вход РСК в режиме тяги подается абсолютная величина разности между частотой вращения двигателя первой (по ходу движения) оси тележки, приведенной к линейной скорости колеса (V_d), и скоростью локомотива (V_L). То есть, в режиме тяги используется абсолютная величина скольжения колес первой оси тележки (имеющей в режиме тяги меньшую вертикальную нагрузку, в режиме электрического торможения – второй оси тележки). Пока эта величина не превысит допустимый верхний порог РСК, БВЗС интегрирует величину a_1 , после превышения порога - величину a_0 . Обратное переключение с a_0 на a_1 происходит, когда скольжение колес станет меньше нижнего порога РСК.

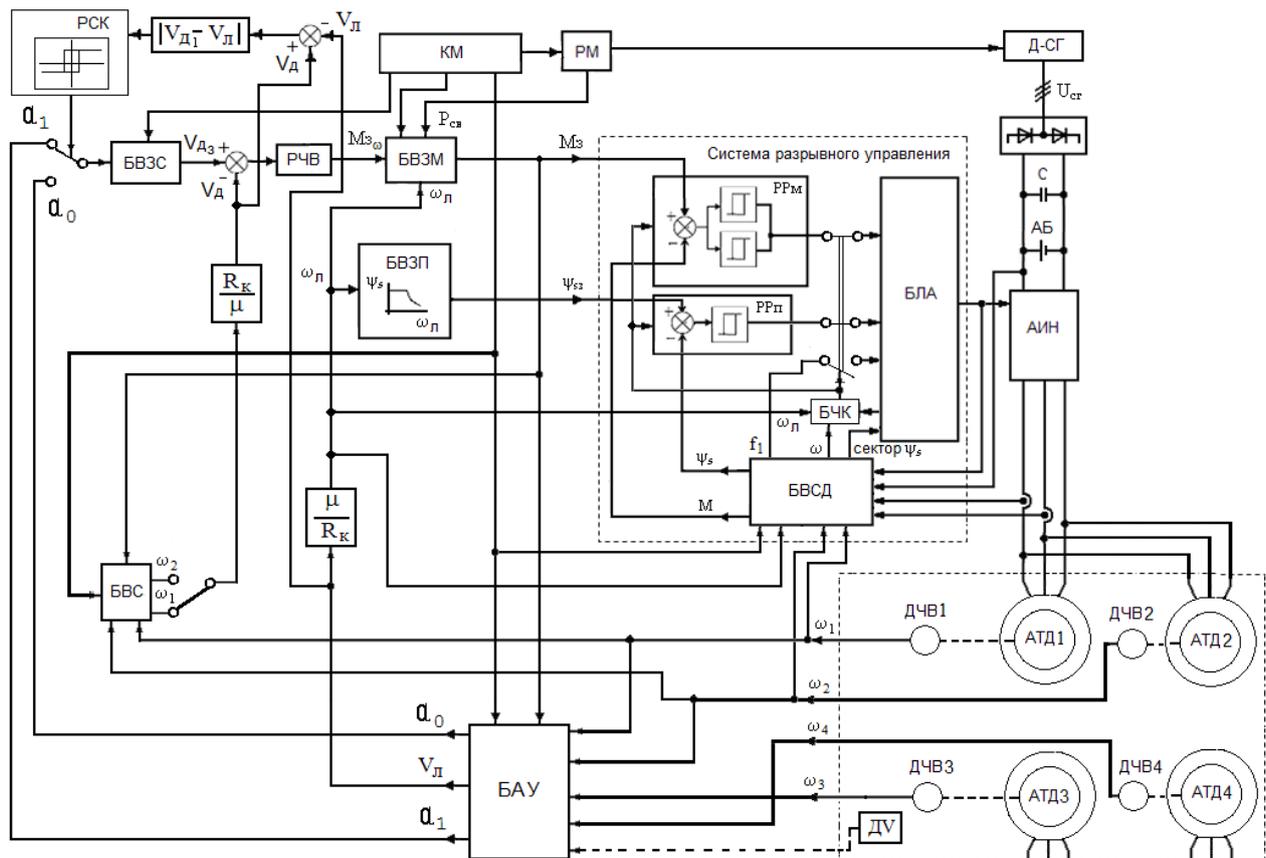


Рисунок 2 – Функциональная схема СУ ТЭП гибридного маневрового тепловоза, модифицированная с учетом регулирования скольжения колес

Задание на скорость $V_{дз}$, вычисленное БВЗС путем интегрирования a_1 или a_0 , сравнивается с измеряемой приведенной частотой V_d , и полученное рассогласование подается на регулятор частоты вращения (РЧВ), вычисляющий задание на момент ($M_{з\omega}$), которое затем ограничивается в БВЗМ на требуемом уровне ($M_з$). Рассматривались два варианта РЧВ: пропорциональный (П) и пропорционально-интегральный (ПИ). Полученное задание на момент $M_з$, а также задание на потокосцепление статора Ψ_s , определяемое в блоке вычисления задания потокосцепления (БВЗП) в зависимости от скорости локомотива, подаются в систему разрывного управления (РУ). Система РУ содержит релейные регуляторы момента (РРМ) и потокосцепления (РРП), блок вычисления состояния двигателя (БВСД), блок логического автомата (БЛА) и

блок частоты коммутаций (БЧК). При полном поле БЛА осуществляет выбор сигналов на переключение транзисторов АИН в зависимости от состояния релейных регуляторов и сектора координатной плоскости, в котором находится вектор потокосцепления статора. БЧК контролирует частоту коммутаций транзисторов АИН и подает сигналы на изменение ширины гистерезисных допусков релейных регуляторов или переход к однократной коммутации транзисторов на периоде (полноблочному режиму) при ослаблении поля. В режиме ослабления поля БЛА вырабатывает сигналы переключения транзисторов в зависимости от положения вектора потокосцепления и требуемой частоты напряжения статора f_s .

Контроль состояния АД и определение текущих вычисляемых переменных машины по модели осуществляется в блоке, условно названном БВСД. Для этого на вход данного блока подается текущее напряжение промежуточного контура и матрица состояния ключей АИН для определения мгновенного значения фазных напряжений; токи двух фаз АИН, потребляемые двумя двигателями тележки (АТД1, АТД2 для первой тележки), скорости роторов АД тележки (ω_1 и ω_2), по которым определяется средняя скорость ротора (ω) для модели АД. Модель АД, общая для двух двигателей тележки (усредненная), построена в неподвижных осях α - β по уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\alpha} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\alpha} + U_\alpha, \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\beta} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\beta} + U_\beta, \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\alpha} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\alpha} - p_n \omega \psi_{r\beta}, \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\beta} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\beta} + p_n \omega \psi_{r\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_\mu}{\sigma L_s L_r} (\psi_{s\beta} \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \psi_{r\beta}), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_α , U_β - напряжения статора; $\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_s L_r}$ - коэффициент рассеяния; L_μ - приведенная взаимная индуктивность обмоток статора и ротора усредненной модели; L_s - собственная индуктивность обмотки статора усредненной модели; L_r - приведенная собственная индуктивность обмотки ротора усредненной модели; R_s , R_r - активное сопротивление обмотки статора и приведенное сопротивление обмотки ротора усредненной модели; $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$ - потокосцепления обмоток статора усредненной модели; $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ - потокосцепления обмоток ротора усредненной модели; ω - средняя скорость роторов двигателей тележки; p_n - число пар полюсов двигателя; M - электромагнитный момент усредненной модели.

Модуль и положение вектора модельного потокосцепления статора (и ротора) вычисляются по проекциям потокосцеплений ($\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$ и $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$), найденным по модели (1). Токи статора усредненной двухфазной модели ($I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$) двигателя тележки по осям α и β определяются через найденные потокосцепления из системы алгебраических уравнений. По ним вычисляется модуль и положение вектора модельного тока статора. Таким образом, управление построено на модельных величинах, вычис-

ляемых на основе модели (1), в которую подставляются фактические напряжения, средняя скорость роторов и усредненные параметры АТД.

Контроль состояния машины и оценка достоверности модели (1) производится с использованием фактических значений тока статора. Датчики тока (2 на пару параллельных моторов) применяются для того, чтобы видеть отличие основной наблюдаемой координаты - вектора среднего тока двигателей тележки от модельного тока. Если модельный ток не там, где ожидалось - значит и потокосцепление не там, значит и момент не тот, и нужно оценить, где потокосцепление на самом деле и каков момент, внести коррективы. То есть, на практике модель непрерывно подстраивается под реалии, на тепловозе ТЭМ9Н корректируются несколько параметров модели машины. Однако даже при коррекции единственного параметра, - сопротивления статора, - система уже стабильна, но имеется некоторое отличие реального среднего момента от запланированного значения.

С целью анализа работы электропривода целесообразно использовать математическое и компьютерное моделирование. Для исследования динамических электро-механических процессов была составлена модель ТЭП в основной библиотеке MatLab/Simulink на базе уравнений электрической части (подсистемы) и упрощенных уравнений механической части ТЭП ТЭМ9Н. Для сокращения времени расчета динамики ТЭП при дальнейшем соединении электрической подсистемы MatLab/Simulink с детализированной моделью механической части тепловоза, выполненной в программном комплексе UM, моделирование работы статического преобразователя было выполнено с использованием коммутационных функций. Оценка достоверности результатов моделирования производилась путем сравнения расчетных осциллограмм с экспериментальными данными, полученными при испытаниях тепловоза ТЭМ9Н.

В модель были подставлены параметры асинхронного двигателя АД917УХЛ1, установленного на ТЭМ9Н, моделирование производилось при тех же значениях напряжения в промежуточном контуре, скорости локомотива и задания на момент, что и в эксперименте. Ширина релейных гистерезисных допусков электромагнитного момента АТД и потокосцепления была подобрана такой же, как на экспериментальных осциллограммах, чтобы обеспечить примерно одинаковую частоту коммутаций в эксперименте и расчете. Результаты моделирования показывают удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных, расхождение не превышает 7 %, если отбросить отдельные мгновенные пиковые значения тока и момента.

В главе 3 разработаны модели механической части (МЧ) ТЭП, позволяющие анализировать динамику работы совместно регулируемых АТД в различных условиях сцепления. Скорости роторов параллельно включенных двигателей тележки могут отличаться по многим причинам: неодинаковые параметры двигателей, разность диаметров бандажей колесных пар, различие вертикальных нагрузок колес первой и второй осей, вызванное работой двигателей, различие условий сцепления колес первой и второй осей, колебания в механической передаче, обусловленные многочисленными внешними факторами. Достаточно полно учесть процессы в механической части ТЭП при регулировании на пределе по сцеплению позволяет модель МЧ с вы-

сокой степенью детализации, выполненная в УМ, однако предварительно удобнее рассмотреть наиболее существенные явления на упрощенной модели.

При упрощенном моделировании механической части целесообразно выделить основные формы крутильных колебаний в продольной вертикальной плоскости по отношению к оси пути, определяющим образом влияющие не только на механические процессы при срыве сцепления, но и на электромагнитные процессы в тяговых двигателях. С этой целью составлена расчетная схема механической передачи оси тепловоза ТЭМ9Н с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей и упругим зубчатым колесом редуктора (рисунок 2).

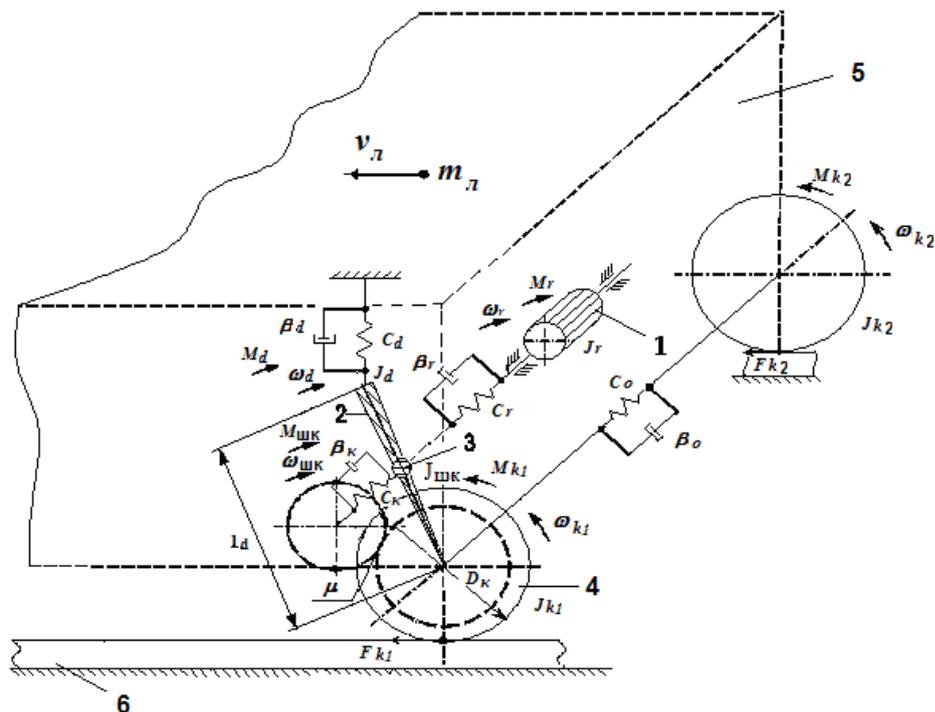


Рисунок 3 – Расчетная схема механической подсистемы ТЭП оси тепловоза ТЭМ9Н:

1 – ротор двигателя; 2 – корпус двигателя; 3 – шестерня и венец зубчатого колеса редуктора; 4 – колесная пара; 5 – локомотив и поезд; 6 – рельсовый путь

В расчетную схему включен один колесно-моторный блок тележки, в который входят: ротор с моментом инерции J_r относительно собственной оси; корпус с моментом инерции J_d относительно оси колесной пары; суммарная масса шестерни и венца упругого зубчатого колеса с общим моментом инерции $J_{шк}$ относительно оси шестерни; колесная пара с моментами инерции колес J_{k1} и J_{k2} относительно собственной оси и локомотив (и поезд) массой m_l , приходящейся на одну ось. Тяговые усилия колес F_{k1} и F_{k2} передаются на локомотив через контакт «колесо-рельс». Упругодиссипативные свойства вала ротора, подвески остова двигателя, упругого зубчатого колеса и оси колесной пары учитываются введением соответствующих жесткостей и коэффициентов демпфирования: C_r , C_k , C_o , C_d – угловые жесткости вала ротора, упругих элементов зубчатого колеса, оси колесной пары и жесткость подвески двигателя; β_d , β_k – коэффициенты эквивалентного вязкого трения подвески двигателя и упругих элементов зубчатого колеса, β_r , β_o – коэффициенты демпфирования вала ротора и оси колесной пары соответственно.

Расчетной схеме (рисунок 3) соответствует система уравнений (2), полученная на

основе принципа Даламбера с учетом эффекта планетарного механизма тяговой передачи.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 J_r \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_r - \beta_r [\omega_r - (\mu + 1) \omega_d - \mu \omega_{k1}] ; \\
 J_d \frac{d\omega_d}{dt} = M_r (\mu + 1) + \beta_r (\mu + 1) [\omega_r - (\mu + 1) \omega_d - \mu \omega_{k1}] - M_d - \beta_d l_d^2 \omega_d - M ; \\
 J_{шк} \frac{d\omega_{шк}}{dt} = M_r + \beta_r [\omega_r - (\mu + 1) \omega_d - \omega_{шк}] - M_{шк} - \beta_k (\omega_{шк} - \mu \omega_{k1}) ; \\
 J_{k1} \frac{d\omega_{k1}}{dt} = M_{шк} \mu + \beta_k \cdot \mu [\omega_{шк} - \mu \omega_{k1}] - M_{ok} - \beta_{ok} (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k1} ; \\
 J_{k2} \frac{d\omega_{k2}}{dt} = M_o + \beta_o (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k2} ; \\
 m_{л} \frac{dv_{л}}{dt} = F_{k1} + F_{k2} - F_c ; \\
 \frac{dM_r}{dt} = C_r [\omega_r - (\mu + 1) \omega_d - \mu \omega_{шк}] ; \\
 \frac{dM_d}{dt} = C_d l_d^2 \omega_d ; \\
 \frac{dM_{шк}}{dt} = C_k (\omega_{шк} - \mu \omega_{k1}) ; \\
 \frac{dM_o}{dt} = C_o (\omega_{k1} - \omega_{k2}) ; \\
 F_{k1} = N_{k1} \psi_0 k_1 ; \\
 F_{k2} = N_{k2} \psi_0 k_2 ; \\
 M_{k1} = F_{k1} D_{k1} / 2 ; \\
 M_{k2} = F_{k2} D_{k2} / 2 ,
 \end{array} \right. \quad (2)$$

где M – электромагнитный момент АД; M_r , $M_{шк}$, M_d , M_o – моменты упругих сил на валу ротора, в упругих элементах зубчатого колеса, в подвеске корпуса и на оси колесной пары соответственно; μ – передаточное число редуктора; ω_r , $\omega_{шк}$, ω_{k1} , ω_{k2} – угловые скорости ротора, шестерни редуктора совместно с приведенной к ней массой венца зубчатого колеса, первого и второго колес относительно собственных осей соответственно; ω_d – угловая скорость корпуса относительно оси колесной пары; $v_{л}$ – линейная скорость локомотива (и поезда); l_d – база подвески двигателя; D_k – диаметр колеса; F_c – сила сопротивления движению поезда; N_{k1} , N_{k2} – силы вертикального нажатия колес на рельсы; M_{k1} , M_{k2} – тяговые моменты первого и второго колес соответственно; ψ_0 – потенциальный коэффициент сцепления; k_1 , k_2 – коэффициенты сцепления первого и второго колес с рельсом в относительных единицах.

Коэффициент сцепления в относительных единицах i -го колеса оси ($i=1, 2$) $k_i = \psi_i / \psi_0$ (где ψ_i – коэффициент сцепления в абсолютных единицах) определяется в зависимости скорости проскальзывания i -го колеса на основе нелинейной характеристики сцепления. Линейная скорость i -го колеса v_{ki} , определяется через угловую скорость как $v_{ki} = D_{ki} \omega_{ki} / 2$. Для создания упрощенной модели 4-осного тепловоза ТЭМ9Н в одну систему уравнений объединяются уравнения моделей механической части че-

тырех осей, а силы тяги F_{ki} всех 8-и колес суммируются и включаются в уравнение поступательного движения общей массы локомотива и поезда (по такому же принципу можно смоделировать ТЭП одной тележки). Значения ψ_0 в зависимости от скорости движения локомотива при моделировании задаются таблично на основе экспериментальных данных с интерполяцией в промежуточных точках. При моделировании влияния остальных факторов (например, наезд на масляное пятно, подсыпка песка, случайный разброс значений) ψ_0 можно варьировать.

Для более полного учета динамических процессов в механической подсистеме ТЭП разработана модель экипажной части ТЭМ9Н в ПК UM. Динамическая модель тепловоза имеет 66 степеней свободы. Кузов моделируется твердым телом с 6 степенями свободы, и по 30 степеней свободы имеют тела, образующие каждую из тележек. К модели тепловоза для имитации состава с целью правильного отображения перераспределения вертикальных нагрузок присоединены модели 10-и вагонов. Модель выполнена с высокой степенью детализации и позволяет учесть такие факторы, как особенности конструкции ходовой части, перераспределение вертикальных нагрузок осей локомотива в режиме тяги и торможения, профиль колес и рельсов, неровности пути и др., которые не учитываются в упрощенной модели.

В главе 4 разработаны комплексные электромеханические модели ТЭП гибридного маневрово-вывозного ТЭМ9Н с реализацией предельных тяговых и тормозных усилий при совместном управлении АТД. Модели выполнены, как с упрощенной механической подсистемой, - в MatLab/Simulink, так и с детализированной, - на основе совмещения ПК MatLab/Simulink и UM при помощи специального интерфейса CoSimulation (рисунок 4). Модель механической подсистемы, созданная в ПК UM, включается в модель электрической подсистемы, разработанной в MatLab/Simulink, в виде стандартного блока, - S-функции. Для иллюстрации изменения распределения вертикальных нагрузок осей, вызванного работой тяговых двигателей, на рисунке 5 приведены результаты моделирования перераспределения вертикальных нагрузок в режиме тяги (рисунок 5, слева) и электрического торможения (рисунок 5, справа).

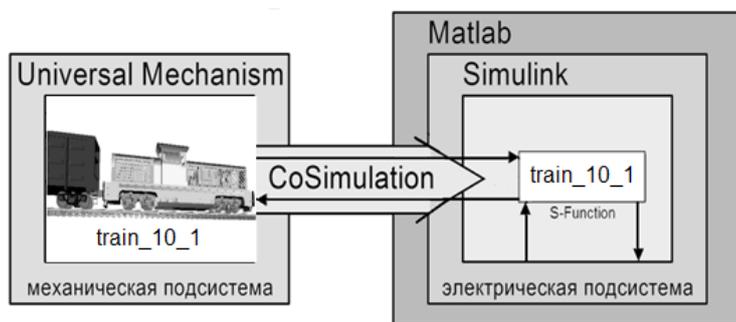


Рисунок – 4. Принцип совмещения MatLab/Simulink и UM

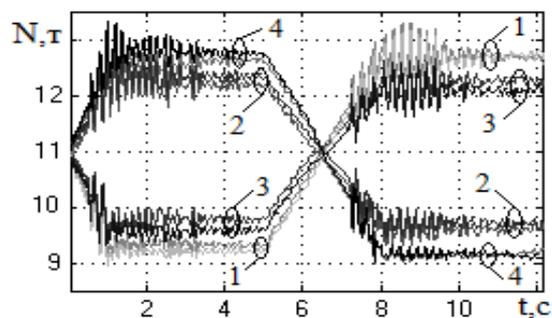


Рисунок – 5. Результаты моделирования перераспределения вертикальных нагрузок колес 1- 4-й осей локомотива

Задание на максимальный момент (ограничение по моменту) в данном эксперименте равно в режиме тяги 5400 Н·м и -5400 в режиме торможения. Из графиков видно, что в режиме тяги оси локомотива 1 и 3 (первые оси тележек) разгружаются, а

оси 2 и 4 (вторые в тележках) – нагружаются; в режиме торможения – наоборот. В пилотном варианте ТЭМ9Н не предусмотрены наклонные тяги в конструкции тележек или специальные догрузатели, позволяющие выравнять вертикальные нагрузки осей (и колес) локомотива, поэтому оси тележек, вращаемые параллельно подключенными к АИН двигателями, по нагрузкам существенно различаются, – до 10,8 Т при реализации потенциального коэффициента сцепления 0,4. Если в СУ ТЭП выводить на предел по сцеплению ось с большей вертикальной нагрузкой, например, вторую ось в режиме тяги (рисунок б), то будет превышен предел сцепления для АТД1 и его рабочая точка сместится в зону буксования.

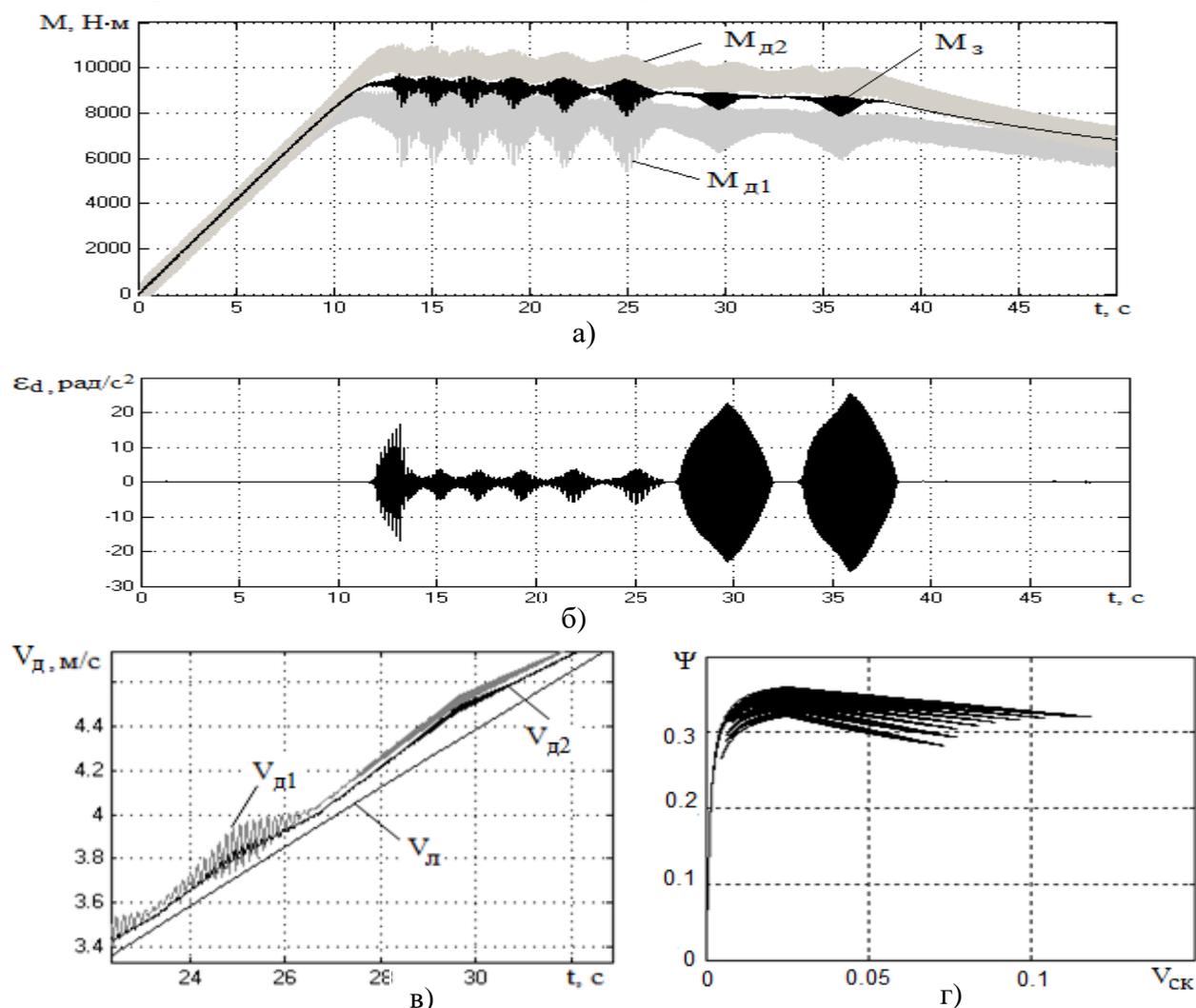


Рисунок – 6. Результаты моделирования реализации предельных тяговых усилий при разгоне гибридного теплового локомотива с составом 2000 Т при регулировании ТЭП тележки по скорости АТД2: а – электромагнитные моменты двигателей первой ($M_{д1}$) и второй ($M_{д2}$) осей и задание на электромагнитный момент (M_3); б – виброускорение корпуса АТД1; в – скорости роторов первого ($V_{д1}$) и второго ($V_{д2}$) двигателей, приведенные к линейной скорости колеса, и скорость локомотива (V_l); г – коэффициент сцепления, реализуемый колесом первой оси

Работая по текущей естественной характеристике, ротор АТД1 увеличивает скорость $V_{тк1}$ (рисунок бв), попадая в зону буксования (рисунок бг), электромагнитный момент $M_{д1}$ при этом резко снижается (рисунок ба), обороты АД1 и соответственно $V_{тк1}$ падают, сцепление восстанавливается, электромагнитный момент $M_{д1}$

вновь нарастает, и далее процесс повторяется, возникают нежелательные фрикционные автоколебания, которые могут привести к повышенному износу и поломкам. При достаточной крутизне падающего участка характеристики сцепления возможно возникновение релаксационных автоколебаний колес с частотой 5,25 Гц, а также квазигармонических автоколебаний с частотой 14,9 Гц и квазигармонических колебаний с узлом на оси колесной пары, имеющих резонансный максимум на частоте 81,9 Гц.

При управлении по скорости двигателя разгруженной оси тележки качество регулирования улучшается (рисунок 7), но неравномерность токовой нагрузки двигателей, не превышающая 30 %, сохраняется.

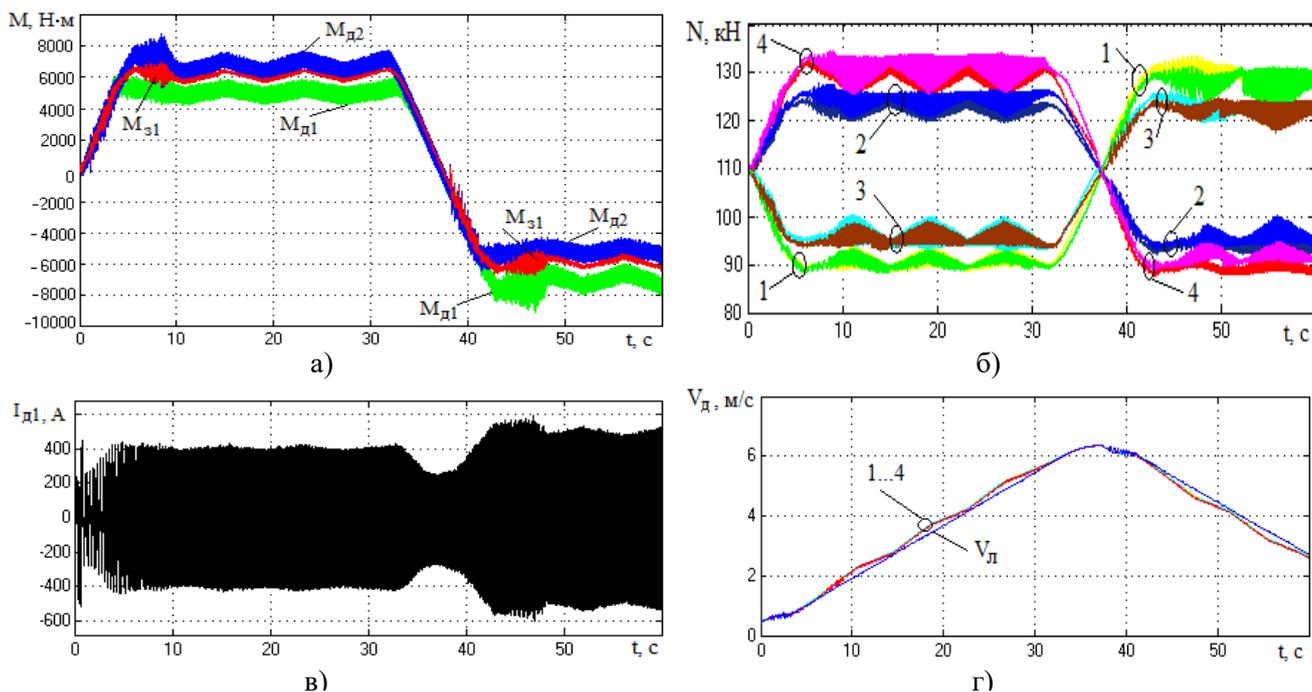


Рисунок 7 – Результаты моделирования реализации предельных тяговых усилий при разгоне и торможении гибридного тепловоза с составом 1000 Т ($\psi_0=0,25$) при регулировании ТЭП тележек по скорости АД1, АД3 (в режиме тяги) и АД2, АД4 (в режиме торможения): а – электромагнитные моменты двигателей первой ($M_{д1}$) и второй ($M_{д2}$) осей и задание на электромагнитный момент ($M_{с1}$); б – вертикальные нагрузки колес (1...4 – 1-й...4-й осей соответственно); в – ток АД первой оси; г – приведённые к линейной скорости колеса скорости роторов (1...4 – АД1...АД4 соответственно) и скорость локомотива (V_l)

Возникающая неравномерность нагрузок АД осей тележек повышает использование сцепного веса, но может увеличить разброс параметров АД, вызывая неравномерный нагрев параллельно подключенных к инвертору двигателей тележки. На основе моделирования была исследована работа ТЭП в различных режимах движения при варьировании потенциального коэффициента сцепления ψ_0 в диапазоне от 0,4 до 0,1, моделировался разброс активных сопротивлений обмоток статора и ротора параллельно работающих АД до 15 %. Основной упор делался на работу ТЭП в первой зоне регулирования (без ослабления поля), где возможна реализация максимально допустимых по условиям сцепления электромагнитных моментов. Установлено, что при правильном определении усредненных параметров модели двигателя СУ ТЭП гибридного маневрового тепловоза ТЭМ9Н,

модифицированная с учетом предложенных алгоритмов, функционирует стабильно, плавно выводит ТЭП локомотива на предел по сцеплению и обеспечивает использование потенциальных условий сцепления не менее чем на 90 % в режиме реализации предельных усилий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнена классификация алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий и обосновано применение системы разрывного управления при совместном регулировании АТД.

2. Предложен способ управления ТЭП с реализацией предельных усилий асинхронными тяговыми двигателями тележки, подключенными параллельно к одному инвертору.

3. Разработана функциональная схема и алгоритмы работы СУ ТЭП гибридного маневрового тепловоза с совместным регулированием асинхронных двигателей тележки на пределе по сцеплению колес с рельсами.

4. Разработаны математические и компьютерные модели электрической подсистемы ТЭП с совместным разрывным регулированием АТД тележки в режиме реализации предельных усилий.

5. Разработаны математические и компьютерные модели механической части (подсистемы) ТЭП гибридного маневрового тепловоза ТЭМ9Н с опорно-осевым подвешиванием АТД и упругим зубчатым колесом редуктора, выполненные с различной степенью детализации в ПК MatLab/Simulink и «Универсальный механизм».

6. Созданы комплексные электромеханические компьютерные модели ТЭП ТЭМ9Н на основе совмещения ПК MatLab/Simulink и «Универсальный механизм» с применением интерфейса CoSimulation.

7. На основе моделирования установлено, что при регулировании ТЭП ТЭМ9Н на пределе по сцеплению и достаточной крутизне падающего участка характеристики сцепления возможно возникновение релаксационных автоколебаний колес с частотой 5,25 Гц, а также квазигармонических автоколебаний с частотой 14,9 Гц и квазигармонических колебаний с узлом на оси колесной пары, имеющих резонансный максимум на частоте 81,9 Гц.

8. Для предотвращения релаксационных автоколебаний ТЭП при реализации предельных усилий следует выводить на предел по сцеплению асинхронный тяговый двигатель оси с меньшей вертикальной нагрузкой: АТД первой оси тележки в режиме тяги и АТД второй оси в режиме торможения.

9. Определен характер изменения вертикальных нагрузок осей гибридного локомотива, вызванного работой АТД в режимах тяги и электрического торможения. При реализации потенциального коэффициента сцепления 0,4, разница вертикальных нагрузок первой и второй осей тележек составляет в среднем 10,8 Т, что приводит к неравномерности токовых нагрузок двигателей до 30 %.

10. При разбросе сопротивлений параллельно работающих АТД в диапазоне до 15 % и правильном определении среднего для двух АТД значения каждого параметра

(правильности параметров усредненной модели) система сохраняет работоспособность и устойчивость.

11. Предложенные алгоритмы регулирования тягового электропривода позволяют частично скомпенсировать неравномерность распределения вертикальных нагрузок осей, вызываемую работой АТД, и обеспечить использование потенциальных условий сцепления не менее чем на 90 % в режиме реализации предельных усилий при изменении потенциального коэффициента сцепления в диапазоне от 0,4 до 0,1.

12. С применением основных элементов моделей, разработанных для гибридного тепловоза, можно на стадии проектирования производить проверку различных алгоритмов реализации тяговым электроприводом локомотивов с совместным регулированием АТД тележки предельных усилий.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Тарасов, А.Н. Математическая модель механической подсистемы тяговой электропередачи маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Г.С. Михальченко, Н.Н. Сидорова // Вест. Брянского гос. техн. ун-та. - 2013. - № 4.- С. 139-142.

2. Тарасов, А.Н. Управление тягой и торможением гибридного маневрового тепловоза с асинхронными тяговыми двигателями / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Р.В. Ковалев, Т.В. Смородова // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 87-91.

3. Тарасов, А.Н. Динамические процессы при совместном регулировании асинхронных тяговых двигателей тележки тепловоза / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Р.В. Ковалев, Г.С. Михальченко // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 4. – С. – 129-132.

4. Тарасов, А.Н. Управление тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза с асинхронными двигателями в режиме реализации предельных усилий / Ю.М. Иньков, Г.А.Федяева, А.Н. Тарасов // Электротехника.- 2016. - № 9. - С. 38-43.

5. Тарасов, А.Н. Совершенствование системы управления тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза / Г.А. Федяева, Ю.М. Иньков, А.Н. Тарасов, Д.В. Конохов // Электроника и электрооборудование транспорта.- 2017. - № 1. - С. 30 - 36.

6. Тарасов, А.Н. Энергоэффективное двухзонное регулирование электропривода с прямым управлением моментом асинхронных двигателей / Г.А. Федяева, Ю.М. Иньков, Д.В. Конохов, А.Н. Тарасов// Электроника и электрооборудование транспорта.- 2018. - № 1. - С. 31 – 36.

Документы на объекты интеллектуальной собственности

7. Система регулирования асинхронного тягового электропривода локомотива на пределе по сцеплению колес с рельсами. Патент РФ на полезную модель RU 161280/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Опубл. 20.04.2016.- Бюл. № 11.

8. Система энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя с прямым управлением моментом. Патент РФ на полезную модель RU 159422/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 10.02.2016.- Бюл. № 5.

9. Энергоэффективный способ управления асинхронными тяговыми двигателями, подключенными параллельно к одному инвертору. Патент РФ на изобретение RU2586944/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Ковалев Р.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 10.06.2016. - бюл. № 16.

10. Энергосберегающая система управления асинхронными тяговыми двигателями, подключенными параллельно к одному инвертору. Патент РФ на полезную модель RU163263/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Ковалев Р.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 10.07.2016. - бюл. № 19.

11. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя в системе прямого управления моментом. Патент РФ на изобретение RU 2587162/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.06.2016.- бюл. № 17.

12. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного электропривода с гибким ограничением мощности. Патент РФ на изобретение RU 2605458/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.12.2016.- бюл. № 35.

Публикации в прочих изданиях

13. Тарасов, А.Н. Моделирование тяговых электроприводов в программных комплексах MatLab и «Универсальный механизм» / Д.В. Кочевин, С.Ю. Матюшков, А.Н. Тарасов, Г.А. Федяева, Д.С. Шаховский // Труды VI Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново: ИГЭУ, 2012.- С.676-681.

14. Тарасов, А.Н. Моделирование динамики асинхронного тягового электропривода гибридного локомотива / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов // Тезисы VII Международного симпозиума «Элтранс-2013». - С-Пб.: ПГУПС.- 2013.- С. 85.

15. Тарасов, А.Н. Прогнозирование динамических процессов в тяговом электроприводе маневрового тепловоза ТЭМ9Н / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов // Безопасность движения поездов: Труды XIV научно-практической конференции. - М: МИИТ, 2013. – Ч.1, С. 61.

16. Тарасов, А.Н. Моделирование динамики электромеханической системы маневрового тепловоза ТЭМ9Н / А.Н. Тарасов, Р.В. Ковалев, Г.А. Федяева // II Научно-технический семинар Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте. - Брянск.- 2014.- С. 51-52.

17. Тарасов, Н.А. Система управления асинхронным тяговым электроприводом / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов // Труды VII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (г. Саранск, 7-10 октября 2014 г.). – Саранск: МГУ им. Н.П. Огарёва, 2014.- С. 315-319.

18. Тарасов, А.Н. Моделирование динамики электромеханотронной системы тягового электропривода тепловоза ТЭМ9Н / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Т.В. Смородова // Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции Автоматизированный электропривод и автоматика. 1-4 июля 2014 г.– Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета. - 2014. – С. 11-12.

19. Тарасов, А.Н. Моделирование асинхронного тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза / Г.А. Федяева, В.А. Хвостов, А.Н. Тарасов, Т.В. Смородова // Тезисы докладов 75 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Д.: ДИИТ, 2015.- С. 8-9.

20. Тарасов, А.Н. Снижение динамических нагрузок в электромеханотронной системе гибридного маневрового тепловоза средствами управления / А.Н. Тарасов, Р.В. Ковалев, Г.А. Федяева, Н.А. Федяев // «Проблемы механики современных машин»: Материалы VI Международной конференции. – Улан-Удэ: Из-во ВСГУТУ, 2015. - Т 3.- С. 223-227.

21. Тарасов, А.Н. Энергосберегающие алгоритмы управления тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Д.В. Конохов, Т.В. Смородова // Тезисы докладов VIII Международного симпозиума «Элтранс-2015». - С-Пб.: ПГУПС. - 2015.- С. 78.

22. Тарасов, А.Н. Снижение динамической наруженности асинхронного тягового электропривода маневрового локомотива / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Д.В. Конохов, В.Н. Бойко // Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». – С-Пб: Изд-во ПГУПС, 2015. – С. 95-96.

23. Тарасов, А.Н. Моделирование асинхронного тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза в режиме реализации предельных тяговых усилий / А.Н. Тарасов // III Научно-технический семинар Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте. - Брянск. - 2016. - с. 87 - 89.

24. Тарасов, А.Н. Моделирование тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Д.В. Конохов, В.Н. Малахов // Докл. науч.-техн. семинара Электропривод в транспорте. – Э 545 М.: МЭИ, 2017. – С. 36-48.

Тарасов Алексей Николаевич

УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ТЕЛЕЖКИ ЛОКОМОТИВА В ПРЕДЕЛЬНЫХ
ПО СЦЕПЛЕНИЮ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать __. __.2018 Заказ № _____ Формат 60X90/16
Усл. печ. л. – 1 Тираж 80 экз.

УПЦ ГИ РУТ (МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, дом 9, стр.9.