

Г. А. Федяева

Моделирование магистрального тепловоза с асинхронным тяговым приводом

Российскими предприятиями разрабатываются новые тепловозы с асинхронными тяговыми двигателями. Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) совместно с Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом подвижного состава (ВНИКТИ) в 2006 г. выпущен опытный образец грузового магистрального шестиосного тепловоза 2ТЭ25А «Витязь» с индивидуальным регулированием осей (поосным регулированием). Каждый асинхронный двигатель получает питание от собственного автономного инвертора напряжения на полностью управляемых полупроводниковых элементах — биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT).

Для повышения надежности и тяговых качеств проектируемых тепловозов требуется совершенствование асинхронного тягового привода (АТП), динамические свойства которого определяющим образом зависят от системы управления приводом. В настоящее время ВНИКТИ на опытном тепловозе «Витязь» ведет разработку способов и алгоритмов управления АТП в различных режимах работы. При этом изменение алгоритмов функционирования микропроцессорной системы управления, а тем более изменение комплектации аппаратных средств требует тщательной проработки и немалых затрат. Эффективным инструментом исследования динамики проектируемых тяговых электроприводов и отработки способов и алгоритмов управления асинхронными двигателями с учетом специфики их работы в электромеханической системе тепловоза является компьютерное моделирование.

Создана электромеханическая модель тепловоза 2ТЭ25А с новой системой автоматического регулирования, прорабатываемой ВНИКТИ как один из перспективных вариантов. Тяговый привод моделируемого тепловоза являет-

ся сложной динамической системой, включающей (рис. 1) источник питания Д-СГ (дизель — синхронный генератор), неуправляемый выпрямитель В, промежуточное звено постоянного напряжения ПЗПТ (содержащее индуктивно-емкостный фильтр и цепь сброса энергии на тормозной резистор) и автономные инверторы напряжения АИН1 — АИН6 на транзисторах IGBT, питающие асинхронные тяговые двигатели АТД1 — АТД6. Электромагнитный момент двигателей передается механической передаче МП1 — МП6 и далее на нагрузку Н (локомотиву и поезду) через контакт колесо — рельс. Управление двигателями и дизель-генераторной установкой осуществляет микропроцессорная система управления СУ, обрабатывающая сигналы с датчиков. Общую систему АТП тепловоза укрупненно можно разбить на две подсистемы: электрическую, в которую входят СГ, В, ПЗПТ, АИН1 — АИН6, АТД1 — АТД6, СУ, и механическую, включающую МП1 — МП6 и Н.

В нашей стране и за рубежом используются специализированные программные комплексы (ПК) для моделирования электронных систем (OrCad, MatLab и др.) и сложных механических объектов (MSC.

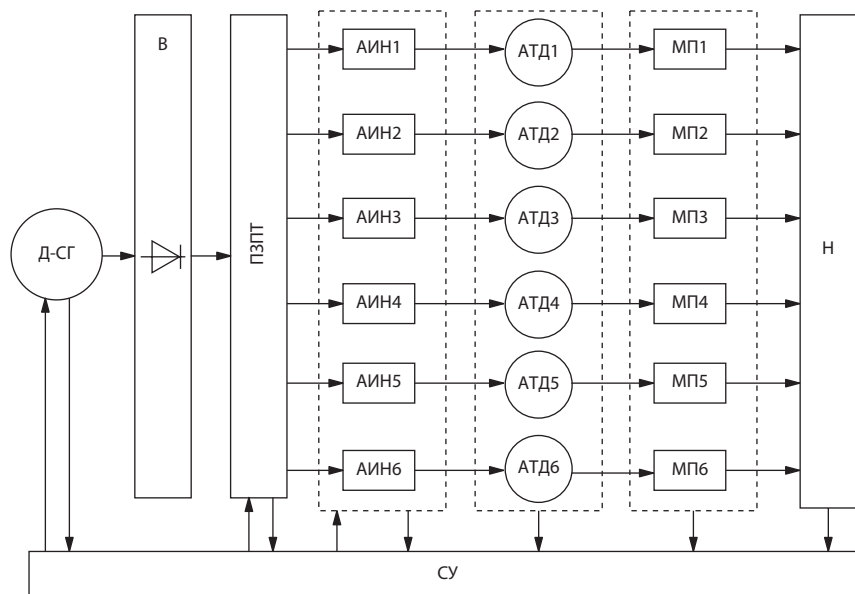


Рис. 1. Обобщенная структурная схема асинхронного тягового привода тепловоза

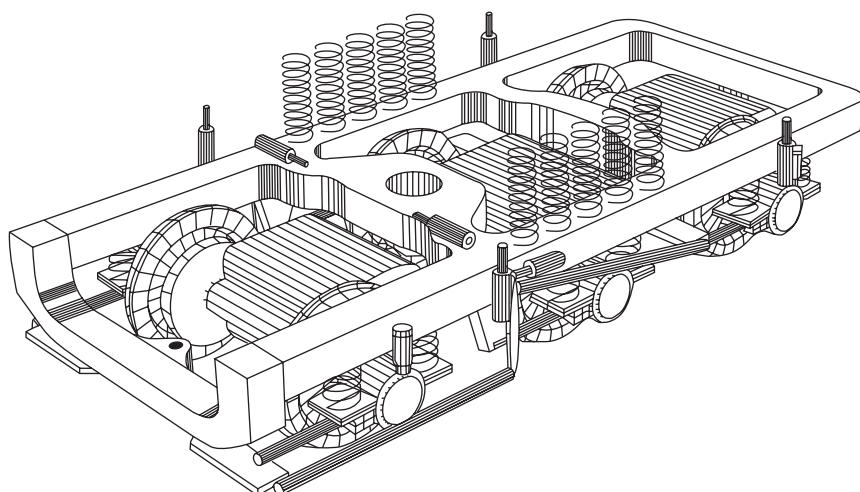


Рис. 2. Модель тележки тепловоза 2ТЭ25А в программе УМ

ADAMS, SimPack, «Универсальный механизм» (УМ) и др.). Но совместное рассмотрение электрических и механических процессов в тяговых передачах тепловозов производится, как правило, с упрощенным представлением механической части привода в виде 2—6-массовых систем [1, 2]. Это ведет к снижению точности моделирования или полной утрате ряда существенных явлений, обусловленных взаимодействием электрической и механической подсистем привода, например таких важных при анализе алгоритмов защиты от боксования, как перераспределение вертикальных динамических нагрузок по осям тепловоза в режиме тяги.

В связи с этим при моделировании управляемой электромеханической системы АТП тепловоза 2ТЭ25А применена новая методика, разработанная в Брянском государственном техническом университете и основанная на совмещении программных комплексов MatLab и УМ. Для расчета динамики механической подсистемы тепловоза применен комплекс УМ [3], хорошо зарекомендовавший себя при анализе динамических качеств экипажной части локомотивов. Модель механической части тепловоза в УМ построена по методу подсистем (колесно-моторный блок, тележка, экипаж, путь, вагон). На тепловозе 2ТЭ25А применена новая тележка

конструкции ВНИКТИ МПС с мягким двухступенчатым рессорным подвешиванием, низко опущенным шкворнем и механизмом радиальной установки колесных пар. Модель этой тележки (рис. 2) входит в общую модель тепловоза. Исследовался также вариант применения на тепловозе 2ТЭ25А трехосной тележки с наклонными тягами. Используемые расчетные схемы механической части включают до 120 степеней свободы. Применение УМ позволяет, максимально приблизив модель к реальному объекту, уточнить расчет механической части тепловоза и наиболее полно выявить взаимодействие электрической и механической подсистем тягового электропривода в переходных режимах.

Для визуализации моделирования электрической части и анализа новых алгоритмов управления АТП был выбран программный комплекс MatLab/Simulink, широко применяемый в мировой практике для моделирования полупроводниковых систем электроприводов [4] и имеющий встроенные библиотеки наиболее современных систем управления, что весьма удобно для анализа перспективных вариантов АТП.

Так как динамические свойства асинхронных электроприводов определяются прежде всего способом управления двигателем, просле-

дим очень кратко эволюцию систем управления АТП тепловозов. Применение на локомотивах в качестве тяговых машин асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором стало возможным в 1970-е годы, благодаря развитию электроники и появлению элементной базы для создания систем управления АТД. Тогда же были разработаны первые образцы тепловозов с асинхронным приводом. На начальном этапе развития для управления АТП использовались преимущественно законы частотного регулирования типа закона М. П. Костенко ($U_1/f_1 = \text{const}$; где U_1 и f_1 — амплитуда и частота напряжения статора соответственно) с коррекцией по напряжению в области нижних частот.

Дальнейшее совершенствование силовой электронной техники (разработка силовых запираемых тиристоров (GTO), а затем IGBT) и создание микропроцессорных систем обусловили появление и развитие различных вариантов векторного управления асинхронным тяговым двигателем, успешно применяемых на современных локомотивах. Наибольшее распространение получили системы с поддержанием на заданном уровне вектора потока сцепления ротора ψ_r . Векторное управление в данном случае основано на принудительной ориентации тока статора по потоку сцепления ротора. Это достигается за счет пространственного разделения на взаимно перпендикулярные составляющие векторов тока и потока сцепления. Чтобы обеспечить такое разделение, необходимо при выполнении алгоритма регулирования преобразовать трехфазную систему координат в двухфазную, выполнить преобразование величин из неподвижной системы координат во вращающуюся, сравнить полученные сигналы с заданными, произвести коррекцию, а затем осуществить обратное координатное и двухфазно-трехфазное преобразование. В результате названных преобразований, а также с учетом необходимой развяз-

ки контуров регулирования удается получить независимые каналы управления моментом и скоростью, при которых система управления асинхронным приводом аналогична системе управления двигателем постоянного тока. В качестве силового преобразователя в рассмотренных системах векторного управления принято использовать автономные инверторы на базе широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Итак, при реализации векторного управления требуется, как минимум, прямое и обратное преобразование координат электропривода, применение регуляторов составляющих тока статора, формирование сигналов, компенсирующих внутренние перекрестные обратные связи объекта, организация того или иного вида ШИМ.

В последние годы во многих странах мира ведется разработка и исследование систем нового поколения, впервые предложенных в 1985 г. [5, 6] и получивших впоследствии название «система прямого управления моментом» (Direct Torque Control, сокращенно DTC). Такие системы используют разрывное управление асинхронными двигателями и могут обеспечить в тяжелых условиях эксплуатации тяговых приводов локомотивов наиболее высокие динамические характеристики. Поэтому данная система, рассматриваемая ВНИКТИ как один из перспек-

тивных вариантов для новых отечественных тепловозов, подробно анализируется в данной работе.

К отличительным особенностям DTC можно отнести [7] наличие в системе:

- релейных гистерезисных регуляторов магнитного потока статора и электромагнитного момента асинхронного двигателя;
- электронной модели двигателя для вычисления управляемых координат асинхронного двигателя (потокосцепления статора, электромагнитного момента, а также частоты вращения ротора для систем без датчика скорости);
- табличного (матричного) вычислителя оптимального вектора напряжения двигателя;
- идентификатора фазового сектора, в котором в текущий момент времени находится вектор потокосцепления статора двигателя.

В то же время в DTC не требуются необходимые при реализации традиционного векторного управления преобразователи координат, регуляторы составляющих тока статора и специальная организация того или иного вида ШИМ.

В седьмой версии ПК MatLab библиотека прикладного пакета силовой электроники MatLab/Simulink/SimPowersystems содержит модель асинхронного электропривода с DTC (DTC Induction Motor Drive). Силовая часть преобразователя частоты выполняется аналогично другим системам (рис. 3)

и включает трехфазный мостовой выпрямитель, цепь сброса энергии (тормозной регулятор), соединенную параллельно с емкостным фильтром, и трехфазный инвертор АИН на IGBT. Далее подключен измерительный блок, содержащий датчики тока и напряжения, и затем асинхронный трехфазный двигатель. Определяющим звеном в системе управления является блок DTC (см. рис. 3), который выполняет формирование коммутационной функции ключей АИН специальным способом, являющимся отличительной особенностью системы прямого управления моментом.

Задачей системы DTC является быстрая отработка задания на электромагнитный момент двигателя. Момент асинхронного двигателя пропорционален произведению модулей векторов потокосцепления статора и ротора и значению синуса угла между этими векторами. Модуль потокосцепления ротора меняется медленно, так как постоянная времени ротора достаточно велика. Модуль потокосцепления статора можно поддерживать постоянным, воздействуя на пространственный вектор напряжения статора. При этом высокочастотное управление электромагнитным моментом двигателя осуществляется в основном путем изменения угла между потокосцеплениями статора и ротора. Это достигается за счет выбора вектора напряжения, вызывающего такое изменение по-

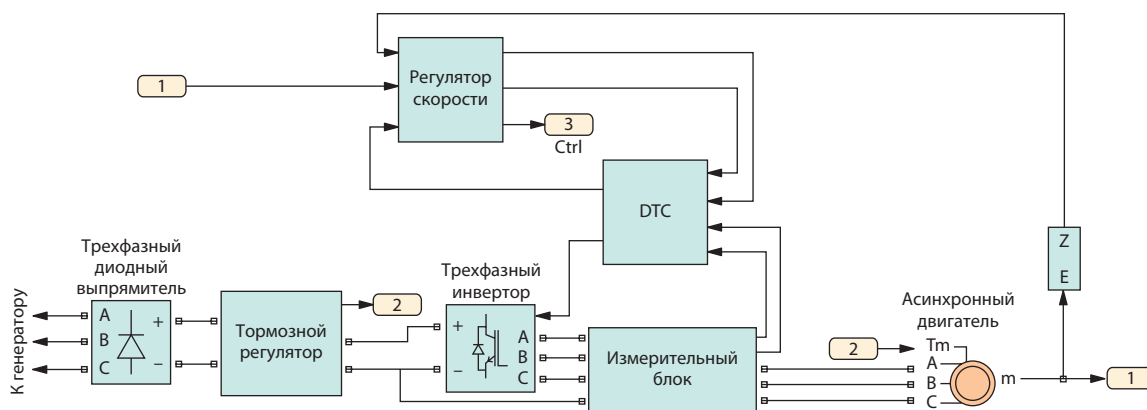


Рис. 3. Модель электрической части асинхронного тягового привода с системой прямого управления моментом DTC в программе MatLab/Simulink/SimPowersystems

ложения потокосцепления статора относительно потокосцепления ротора, которое обеспечивает необходимый знак приращения электромагнитного момента и одновременно — необходимый знак приращения модуля потокосцепления.

Основой любого DTC-алгоритма является таблица переключений силовых электронных ключей автономного инвертора. В нее заранее внесены те положения результирующего вектора напряжения АИН, которые он должен принимать на фазовой плоскости при той или иной совокупности управляющих воздействий. В каждом из шести секторов, на которые разбивается координатная плоскость, существует определенный набор векторов напряжения для всех возможных комбинаций требуемых знаков изменения модуля потокосцепления и момента двигателя [8]. Строками в таблице переключений являются выходные сигналы релейных регуляторов потокосцепления статора и электромагнитного момента, столбцами — номера секторов фазовой плоскости. На выходе таблицы получаются коммутационные функции, которые поступают непосредственно на драйверы силовых электронных модулей АИН. Это значит, что с помощью таблицы переключений на каждом интервале квантования по времени выби-

рается оптимальная комбинация включения ключей АИН, которая приводит к желаемому изменению момента и потокосцепления двигателя. Таким образом, в электроприводах с DTC ШИМ-управление осуществляется как функция заданных переменных электромагнитного состояния АТД. В результате, несмотря на то что векторные преобразования в системе DTC отсутствуют, а используются только релейные регуляторы, вращение вектора потокосцепления статора обеспечивается с требуемой частотой при поддержании на заданном уровне модуля вектора потокосцепления и момента двигателя.

Поскольку непосредственное измерение контролируемых параметров (момента и потокосцепления) связано с известными практическими трудностями (отсутствием достаточно простых и точных датчиков момента и потока), необходимо косвенное измерение этих величин (вычисление значений по модели). Модель-наблюдатель асинхронного двигателя можно реализовать согласно уравнениям в неподвижной системе координат $\alpha - \beta$, связанной со статором [7]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{\alpha} - i_{s\alpha} R_s, \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= U_{\beta} - i_{s\beta} R_s, \end{aligned} \quad (1)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}),$$

где $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ — потокосцепления обмоток статора; U_{α}, U_{β} — напряжения статора; $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ — токи статора; p_n — число пар полюсов двигателя; M — электромагнитный момент двигателя.

Так как сопротивление статора изменяется в функции температуры, модель для повышения точности целесообразно сделать адаптивной. Наблюдаемыми (с применением датчиков) входными сигналами в системах DTC являются фазные токи двигателя, фазные напряжения на выходе АИН, а также частота вращения ротора двигателя, используемая для регулирования скорости электроприводов (в модели, представленной на рис. 3, регулирование скорости осуществляется блоком «Регулятор скорости»). В системах DTC без датчика скорости (бездатчиковых системах) информация о частоте вращения ротора двигателя относится к числу вычисляемых координат, но это требует усложнения модели-наблюдателя (1) и несколько снижает точность регулирования скорости. После получения информации о текущем состоянии проекций потокосцеплений на оси α и β необходимо определить, в каком секторе находится вектор ψ_s . Сделать это можно с применением логического автомата.

Для совмещения с УМ модель электрической подсистемы перспективного магистрального тепловоза с DTC была разработана с использованием элементов основной библиотеки MatLab/Simulink (ключей, интеграторов, пропорциональных звеньев, таблиц задания функций, релейных и логических элементов и т. д.) на основе математических уравнений АТД в неподвижной системе координат [7, 9], уравнений модели-наблюдателя (1) и алгоритма функционирования системы управления, разработанного на основе предложенной функциональной схемы АТП

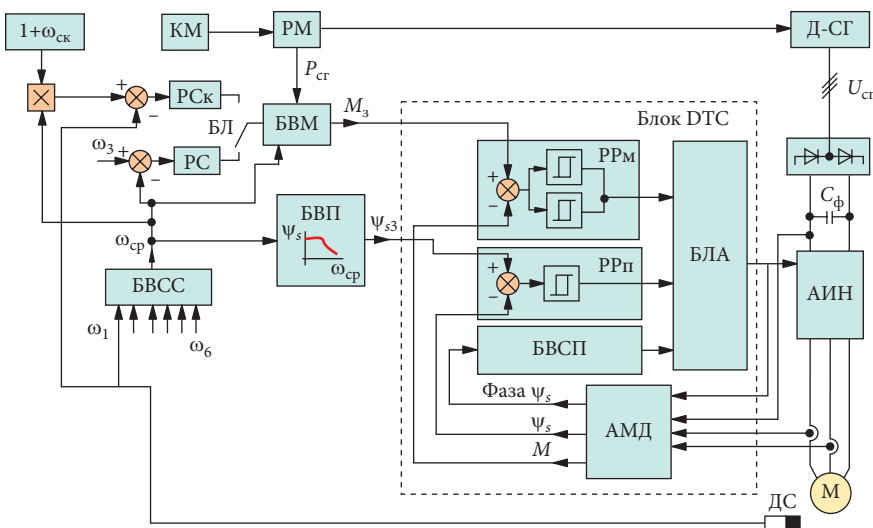


Рис. 4. Функциональная схема асинхронного тягового привода магистрального тепловоза с DTC

(рис. 4, структура ДТС подробно показана для первой оси).

Входным сигналом для системы управления является свободная мощность на тягу $P_{св}$ (см. рис. 4), которая на каждой позиции контроллера машиниста КМ вычисляется регулятором мощности РМ дизеля установки Д-СГ и поступает в блок вычисления задаваемой величины момента БВМ. Заданный момент M_3 получается путем деления свободной мощности на число осей тепловоза и среднюю частоту вращения $\omega_{ср}$ роторов АД, рассчитываемую в блоке вычисления средней скорости БВСС (при наличии датчика скорости тепловоза делить следует на скорость локомотива, приведенную к валу ротора ω_n). Скорость ротора каждого АД измеряется датчиком скорости ДС. При пуске блок БВМ ограничивает значение момента на требуемом уровне (пуск при постоянном моменте), задается также темп нарастания момента. После выхода на полную для данной позиции контроллера мощность дизеля тяговый двигатель, работая при постоянной мощности, автоматически переходит в режим ослабления поля. Для определения требуемого для АД потокосцепления сигнал $\omega_{ср}$ (ω_n) подается в блок вычисления задания потокосцепления БВП, представляющий собой электронную таблицу зависимости потокосцепления статора ψ_s от $\omega_{ср}$ (ω_n) для данной позиции КМ. На участках без ограничения скорости работает только контур момента (с защитой от боксования), и тепловоз разгоняется до установившейся скорости, при которой тяговый момент равен моменту сопротивления движению.

Если для определенного перегона требуется ограничить скорость на заданном значении ω_3 , то по сигналу машиниста блоком логики БЛ подключается контур регулирования скорости, и сигнал с выхода регулятора скорости РС становится входным для внутреннего контура момента. В этом случае БВМ огра-

ничивает задаваемый момент, если он становится больше значения, вычисляемого по мощности дизеля. Сформированные задаваемые значения момента M_3 и потокосцепления $\psi_{сз}$ подаются в блок ДТС, в котором они сравниваются с фактическими значениями момента и потокосцепления (M и ψ_s), вычисленными адаптивной моделью двигателя АД. По сигналам рассогласования в блоках релейного регулирования момента РРм и потока РРп, представляющих собой трехпозиционное и двухпозиционное реле соответственно, производится регулирование в скользящем режиме момента и потока двигателя.

В блоке-наблюдателе АД осуществляется вычисление потока статора (модуля и фазы вектора ψ_s) и момента по введенной в него информации: токам двух фаз статора АД, напряжению промежуточного звена и положению ключей автономного инвертора напряжения АИН. Таким образом, модель-наблюдатель осуществляет организацию обратных связей по регулируемым переменным в системе автоматического регулирования. По значению фазы вектора ψ_s блок вычисления сектора потока (БВСП) определяет, в каком из секторов находится вектор ψ_s .

Далее сигналы с РРм, РРп и БВСП поступают в модуль быстроедействующего логического автомата АБЛ, представляющего собой электронную таблицу и переключающего ключи автономного инвертора в зависимости от оптимизации вектора выходного напряжения АИН по предельным отклонениям момента и потока статора. Таким образом, организация ШИМ-управления осуществляется как функция заданных переменных электромагнитного состояния АД. Частота коммутации ключей зависит от величины гистерезисного допуска релейных регуляторов момента и потокосцепления. Напряжение источника питания $U_{ср}$ можно менять в зависимости от позиции КМ.

Для защиты от боксования выполняется стабилизация скольжения колес, сигнал регулятора скольжения РСк подключается к БВМ и определяет заданное значение момента (для вычисления скольжения лучше всего использовать сигнал линейной скорости локомотива ω_n). Но так как точное измерение скорости локомотива связано с определенными трудностями, моделировались также варианты, использующие сигнал средней $\omega_{ср}$ (см. рис. 4) и минимальной скорости вращения колес (и те же варианты для скорости роторов двигателей).

Адекватность моделирования электромеханической системы АТП с ДТС подтверждается удовлетворительным совпадением результатов, полученных при совмещении комплексов УМ–MatLab и в ПК MatLab/Simulink/SimPowersystems на уточненных и упрощенных электромеханических моделях, а также с осциллограммами, приведенными в литературе [7].

При интеграции модели электрической части, выполненной средствами MatLab/Simulink, в ПК УМ уравнения MatLab динамически включаются в систему уравнений УМ. При этом электромагнитные моменты АД, вычисляемые по уравнениям MatLab, прикладываются к роторам двигателей в УМ, а скорости роторов двигателей относительно статоров, скорости проскальзывания колес и другие переменные состояния механической подсистемы, требуемые для моделирования электрической, определяются средствами УМ и включаются в уравнения MatLab.

Для оценки динамических и тяговых качеств было выполнено моделирование перспективного магистрального тепловоза 2ТЭ25А с системой прямого управления моментом асинхронных тяговых двигателей ДТА470 при различных скоростях движения, профилях и состоянии пути, условиях сцепления. Моделировалось также трехфазное короткое замыкание (КЗ) в инверторе АИН.

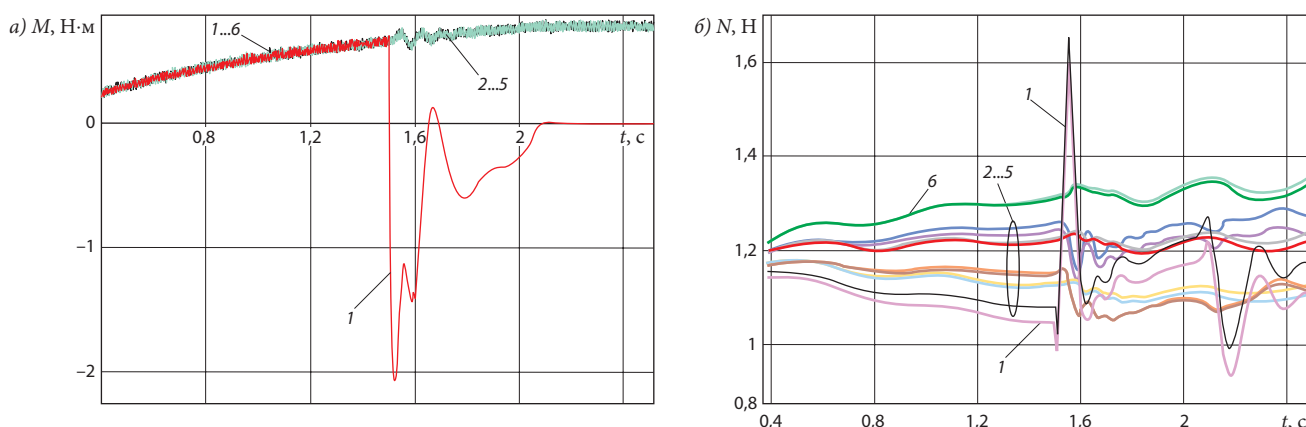


Рис. 5. Результаты моделирования сквозного КЗ в инверторе первой оси тепловоза 2ТЭ25А при движении в кривой. Скорость тепловоза в момент аварии 10 км/ч:
 а — электромагнитные моменты асинхронных двигателей (M) осей 1–6 (поз. 1–6 соответственно); б — вертикальные нагрузки (N) на колеса осей 1–6 (поз. 1–6); t — время

Электромеханическая модель тепловоза позволяет наблюдать явления, которые на упрощенных моделях зафиксировать невозможно. При сквозном КЗ в АИН, сопровождаемом тормозным ударным электромагнитным моментом АД (рис. 5), модель дает возможность зафиксировать не только нагрузки в основных элементах передачи, но и изменение вертикальных нагрузок осей, вызванное ударным моментом. Первая ось, на двигателе которой возник ударный момент, догружается. Это в определенном диапазоне скорости препятствует срыву сцепления и торможению ротора (и связанной с ним колесной пары), что, в свою очередь, способствует возрастанию ударного электромагнитного момента. При расчете в программном комплексе

УМ с учетом изменения вертикальных нагрузок максимальный тормозной момент при КЗ в АИН возрастает на 3–5%, а сам максимум (4,1 номинального значения момента) смещается и наблюдается при скорости локомотива 28 км/ч вместо 24 км/ч для одноосной модели [2].

Примером анализа работы привода в штатном режиме могут служить приведенные на рис. 6–8 результаты моделирования разгона секции магистрального тепловоза 2ТЭ25А с ДТС в нормальных условиях сцепления до максимальной скорости (120 км/ч) на 15-й позиции контроллера машиниста (при моделировании в промежуточном звене поддерживается напряжение 1890 В, предусмотренное техническим проектом). Разгон до выхода

на полную мощность производится при постоянном моменте АД (7800 Н·м), далее двигатель переходит в режим ослабления поля, и электромагнитный момент автоматически снижается. Годограф вектора потокосцепления статора позволяет судить о глубине ослабления поля. Форма фазного тока и напряжения при различных скоростях локомотива (см. рис. 7, 8) определяется коммутированием ключей инвертора под контролем ДТС. Результаты моделирования (см. рис. 6–8) приведены для первой оси тепловоза.

Тяговый привод локомотивов должен обладать высокими динамическими свойствами и стабильно работать при ухудшении условий сцепления между колесом и рельсом, подавляя боксование в услови-

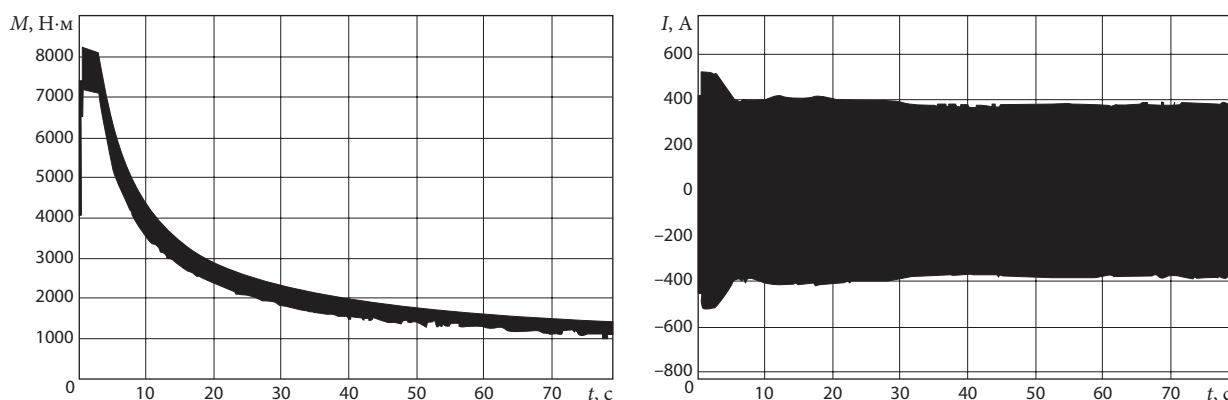


Рис. 6. Моделирование разгона до скорости 120 км/ч секции магистрального тепловоза с ДТС в нормальных условиях сцепления:
 M — электромагнитный момент асинхронного тягового двигателя; I — ток фазы А двигателя

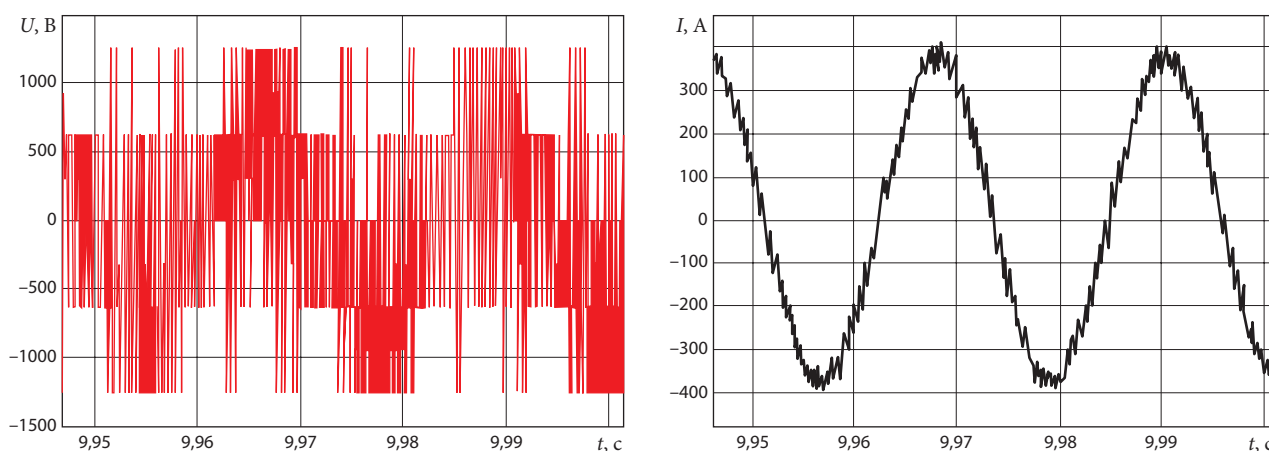


Рис. 7. Расчетные переменные состояния АТД при скорости 40 км/ч:
 U — напряжение фазы А; I — ток фазы А; t — время

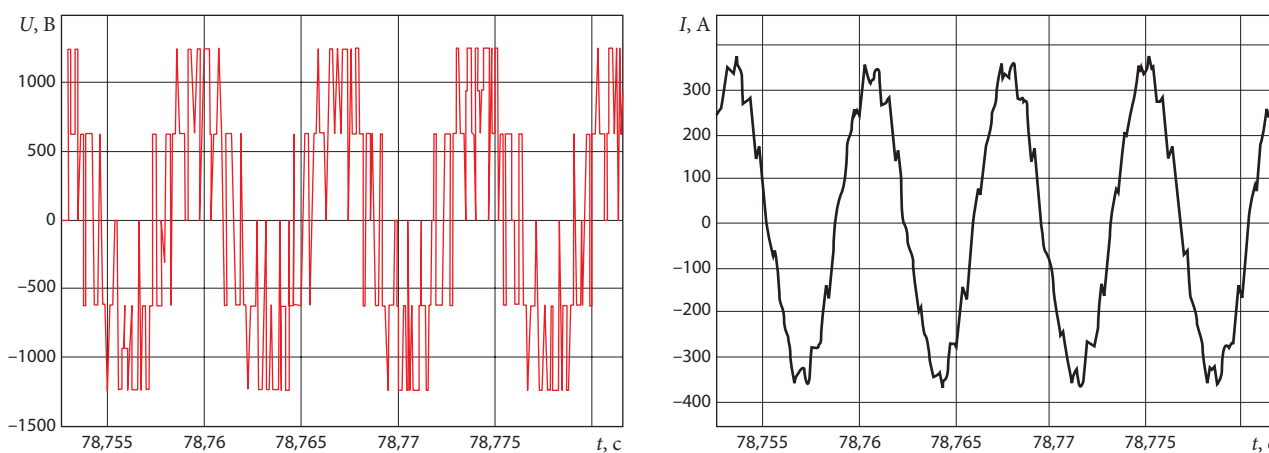


Рис. 8. Расчетные переменные состояния АТД при скорости 120 км/ч:
 обозначение позиций, как на рис. 7

ях, когда инерционность связанных с ротором механических масс из-за нарушения сцепления может снизиться на несколько порядков, поэтому очень важна отработка алгоритмов защиты от боксования.

В схеме асинхронного тягового привода с ДТС (см. рис. 4) реализован алгоритм защиты от боксования на основе стабилизации скольжения колес. С целью подавления избыточного проскальзывания сигнал регулятора скольжения (РСк) при срабатывании защиты от боксования подключается блоком логики БЛ к БВМ для формирования M_3 , обеспечивающего заданный уровень скольжения $\omega_{ск}$. Данный алгоритм исследован на основе моделирования. Варьировались скорость движения локомотива, профиль и состояние

пути, тип и параметры регулятора, а также способ определения проскальзывания. Для иллюстрации работы АТП при возникновении боксования приведены результаты моделирования наезда тепловоза в процессе разгона на масляное пятно длиной 3 м. Моделирование осуществлялось ступенчатым снижением потенциального коэффициента сцепления с 0,33 до 0,1 (рис. 9). При увеличении проскальзывания выше заданного предела срабатывает защита от боксования, и регулятор скольжения, подключаемый к БВМ, снижает задаваемое значение момента. Система обрабатывает это задание, уменьшая момент двигателя, соответственно снижается ток АТД и прекращается боксование. Установлено, что лучшие динамические качества системы обе-

спечиваются при использовании пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора скольжения. Моделирование показывает, что высокое быстродействие и устойчивость системы ДТС позволяют для различных профилей и состояний пути реализовать использование потенциальных условий сцепления при регулировании всех осей локомотива на уровне свыше 93%. Параметры ПИ-регулятора скольжения подобраны при моделировании исходя из условия скорейшего затухания колебаний при подавлении проскальзывания колес.

Кроме того, система с регулированием скольжения дает возможность реализовать наиболее интенсивный вариант разгона тепловоза — разгон под контролем регулятора скольжения, который

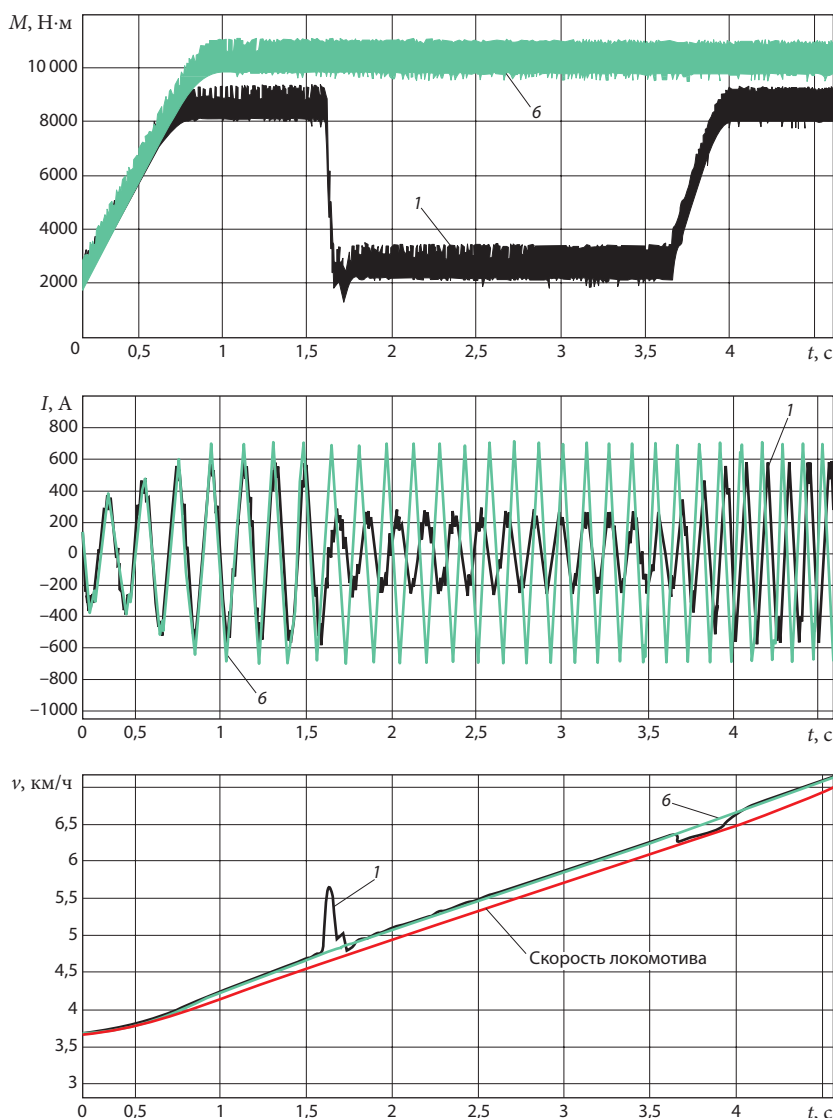


Рис. 9. Результаты моделирования разгона секции перспективного магистрального тепловоза с составом массой 2000 т при регулировании скольжения колес на уровне 2,5 % и наезде на масляное пятно длиной 3 м:
 M — электромагнитный момент АД; I — ток фазы А тягового двигателя; v — скорость правого колеса (1 — первая ось; 6 — шестая ось)

позволяет получить до выхода на полную мощность предельные тяговые усилия. На рис. 9 представлен именно такой способ разгона магистрального тепловоза. До выхода на полную мощность реализуется максимально возможный по условиям сцепления момент АД и сила тяги каждой оси (и тепловоза в целом). Но при хороших условиях сцепления из-за неравномерного распределения вертикальных нагрузок двигателя наиболее нагруженных осей (третьей и шестой) оказываются существенно

перегруженными по току. Графики электромагнитного момента, тока и скорости (см. рис. 9) приведены для первой и шестой осей тепловоза (для сравнения укажем, что номинальный электромагнитный момент M_n двигателя ДТА470 равен 7759 Н·м, амплитуда номинального тока $I_{n \text{ ампл}} = 496$ А). Перегрузки по току двигателей третьей и шестой осей тепловоза 2ТЭ25А со штатными тележками при работе на максимуме кривой сцепления каждой оси (скольжение колес — 2,5% скорости локомотива) доходят при по-

тенциальном коэффициенте сцепления 0,33 до 32%. В общем случае при пуске на пределе по сцеплению под контролем РСк перегрузка тем больше, чем выше потенциальный коэффициент сцепления в процессе разгона. Снизить неравномерность нагрузки двигателей можно выравниванием вертикальных нагрузок осей путем применения на магистральном тепловозе тележек с наклонными тягами либо догружающих устройств. Применение тележек с наклонными тягами позволяет при разгоне с максимально возможной по условиям сцепления силой тяги снизить перегрузки по току двигателей третьей и шестой осей на 15–20%.

Выводы

На основе нового методологического подхода к моделированию АТП тепловозов, базирующегося на совмещении программных комплексов MatLab и УМ, выполнен анализ динамических и тяговых качеств магистрального тепловоза 2ТЭ25А с наиболее перспективным и наименее изученным способом управления приводом — системой прямого управления моментом АД. Данный способ отрабатывается ВНИКТИ как один из вариантов, предусмотренных техническим проектом для последующего внедрения.

Моделирование выполнено в диапазоне скорости локомотива 1–120 км/ч при нормальных и ухудшенных условиях сцепления. Установлено, что использование ДТС и предложенных алгоритмов функционирования системы в составе АТП тепловоза обеспечивает при проектном напряжении в промежуточном звене 1890 В постоянно-го тока устойчивую работу привода тепловоза 2ТЭ25А с асинхронными двигателями ДТА470 во всем диапазоне скорости локомотива в режимах полного и ослабленного поля при различных условиях сцепления.

Определено, что алгоритм защиты от боксования с ПИ-регулятором скольжения колес в сочетании с индивидуальным регулированием осей позволяет реализовать для различных профилей и состояния пути использование потенциальных условий сцепления на уровне выше 93% благодаря быстрдействию системы DTC, а также ее устойчивости к возмущениям и неточности информации о постоянных времени и коэффициентах усиления.

В ходе исследований произведен анализ процесса разгона тепловозов 2ТЭ25А со штатными тележками до выхода на полную мощность дизеля под контролем регулятора скольжения колес и с реализацией каждой осью предельных тяговых усилий. При разгоне в хороших условиях сцепления наблюдаются перегрузки двигателей тем большие, чем лучше условия сцепления. Так, при потенциальном коэффициенте сцепления 0,45 перегрузки по току двигателей 3-й и 6-й осей магистрального тепловоза 2ТЭ25А достигают 55–60%.

Несмотря на это, данный вариант разгона целесообразно включить в алгоритм управления наряду с обычным вариантом пуска (при заданном моменте двигателя), так как он дает возможность наиболее быстро разогнать состав, но указанные токовые перегрузки необходимо учесть при выборе IGBT либо предусмотреть применение на локомотиве догружающих устройств или тележек с наклонными тягами.

Полученные результаты переданы ВНИКТИ для использования при отработке алгоритмов управления АТП тепловоза 2ТЭ25А



Рис. 10. Тепловоз 2ТЭ25А («Витязь») с асинхронным тяговым приводом

(рис. 10). Разработанная методика моделирования, позволяющая оценить динамические нагрузки в наиболее тяжелых режимах работы и выработать конкретные рекомендации, открывает широкие перспективы для анализа новых способов и алгоритмов управления АТП тепловозов с учетом взаимодействия и взаимовлияния электрической и механической подсистем привода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 05-01-00756.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регулирование тяги с высоким использованием сил сцепления // Железные дороги мира. 1999. № 2. С. 39—45.
2. Федяева Г.А. Моделирование асинхронного тягового привода перспективного тепловоза с системой прямого управления моментом // Мир транспорта. 2006. № 4. С. 10—15.
3. Погорелов Д.Ю. Компьютерное моделирование динамики технических

систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» // Вест. комп. и информац. технол. 2005. № 4. С. 27—34.

4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. MatLab 6.0. СПб.: Корона принт, 2001. 320 с.

5. Takahashi L., Noguchi T. A new quick response and high efficiency strategy of induction motor. IAS, 1985.

6. Takahashi L., Noguchi T. A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor // IEEE. Transactions on Industry Applications, 1986. Vol. IA-22. № 5. Sep/Oct. P. 820—827.

7. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока / Под ред. А.Г. Народицкого. СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2005. 100 с.

8. Nauck V. Examination of Dead-Time Elimination Strategies using the Error Voltage Phasor Theory. Republique Francaise. Toulouse: EPE 2003.

9. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Academia, 2006. 265 с.