

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫМ МАНЕВРОВЫМ ТЕПЛОВОЗОМ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Представлені методика і результати комп'ютерного моделювання нестационарних режимів асинхронного тягового приводу перспективного маневрового тепловоза з автономним інвертором напруги і векторним управлінням.

Представлены методика и результаты компьютерного моделирования нестационарных режимов асинхронного тягового привода перспективного маневрового тепловоза с автономным инвертором напряжения и векторным управлением.

The computer modeling method and results of dynamical modes in asynchronous traction drive on perspective diesel locomotives with voltage inverters and vector control are present

Применение на тепловозах асинхронных тяговых двигателей (АТД) позволяет повысить реализуемые тяговые усилия. В рамках стратегии ОАО РЖД по созданию и эксплуатации локомотивов нового поколения на 2005-2008 годы намечены разработка и создание опытных образцов тепловозов с асинхронным тяговым приводом (АТП). Доля маневровых тепловозов составляет 30,6 % общего локомотивного парка России, поэтому проектирование новых маневровых тепловозов с высокой реализацией сил сцепления весьма актуально.

На опытном образце маневрового тепловоза ТЭМ21, разработанном Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) совместно с Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом подвижного состава (ВНИКТИ МПС), используются асинхронные двигатели ДАТ305, питаемые от автономного инвертора тока (АИТ). В перспективе планируется производить тепловозы с питанием АТД от автономного инвертора напряжения (АИН), обладающего более высокими динамическими свойствами. Исследование на стадии проектирования различных динамических режимов работы привода, особенно аварийных и нестационарных, которые могут сопровождаться повышенными нагрузками, как в электрической, так и в механической подсистемах привода, наиболее целесообразно вести на основе компьютерного моделирования. Для уточненного анализа нестационарных режимов, например таких распространенных как буксование, одноосной или двухосной модели тягового привода [1] недостаточно, необходима электромеханическая мо-

дель тепловоза с учетом особенностей конструкции ходовой части и перераспределения нагрузки по осям тепловоза в режиме тяги. Поэтому для расчета динамики механической подсистемы тепловоза использован программный комплекс (ПК) «Универсальный механизм» (УМ) [2]. Моделировалась механическая часть маневрового тепловоза ТЭМ21. На тепловозе применена двухосная тележка с двухступенчатым рессорным подвешиванием и наклонными тягами, модель которой (рис. 1) входит в общую модель тепловоза.

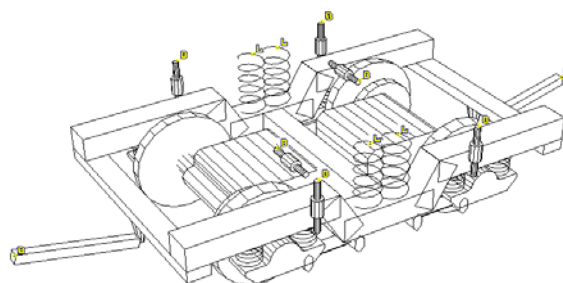


Рис. 1. Модель тележки тепловоза ТЭМ21 в УМ

Для моделирования режимов буксования и юза в четвертую версию ПК УМ заложены аппроксимации кривой сцепления по методу Д. К. Минова [3].

Моделирование электрической части выполнялось в двух вариантах: с использованием программы расчета электромеханических процессов в тяговых электроприводах локомотивов при нестационарных и аварийных режимах (ПРЭП) [4], разработанной в среде Delphi, и с применением ПК MatLab/Simulink, причем модели MatLab интегрируются в модели ПК УМ при помощи специального интерфейса.

Для обеспечения высоких динамических качеств в АТП применяются системы векторного управления. Существуют различные разновидности векторного управления, но в самом общем случае их можно разделить на системы с классическими алгоритмами управления (классические) и системы нового поколения, использующие методы разрывного управления.

Наибольшее распространение в современных электроприводах с классическим векторным управлением получили системы с поддержанием на заданном уровне вектора потокосцепления ротора Ψ_r . Векторное управление в данном случае основано на принудительной ориентации тока статора по потокосцеплению ротора. Это достигается за счет пространственного разделения на взаимно перпендикулярные составляющие векторов тока и потокосцепления. Чтобы обеспечить такое разделение необходимо при отработке 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 развязки контуров регулирования, удастся 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) (Pulse Width Modulation - PWM).

Иллюстрацией дальнейшего развития систем векторного управления может служить современная разработка с использованием методов разрывного управления, впервые реализованная фирмой АВВ, и получившая в мировой практике название системы «прямого управления моментом» (Direct Torque Control - DTC). Такое управление является разновидностью векторного управления, т.к. тоже использует информацию о векторе (модуле и угле) потока. Данные системы в силу ряда характерных особенностей [5] наиболее предпочтительны в тяговых электроприводах. Структуры прямого управления моментом также позволяют получать качественные динамические и статические показатели, но в отличие от классических схем векторного управления, не требуют преобразований во вращающуюся систему

координат, а используют релейный принцип формирования управляющих сигналов. В качестве силового преобразователя в DTC обычно применяются автономные инверторы напряжения с пространственно-векторной модуляцией (Space Vector Modulation - SVM). В модели перспективного маневрового тепловоза использована система DTC.

Принцип DTC поясним на основе математической модели асинхронного двигателя (АД) в неподвижных координатных осях α - β [5]:

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

где $\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_s L_r}$ – коэффициент рассеяния двигателя;

L_μ – приведенная взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; L_s – собственная индуктивность обмотки статора; L_r – приведенная собственная индуктивность обмотки ротора; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно; $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ – потокосцепления обмоток статора; $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – потокосцепления обмоток ротора; U_α, U_β – напряжения статора; ω – скорость ротора; p_n – число пар полюсов двигателя; M – электромагнитный момент двигателя.

Момент АД пропорционален мнимой части произведения векторов потокосцепления статора и ротора, или, что одно и то же, пропорционален произведению их модулей и значению синуса угла между ними. Модуль потокосцепления ротора меняется медленно, так как постоянная времени ротора достаточно велика. Модуль потокосцепления статора, если рассматривать небольшой отрезок времени, можно принять постоянным. Поэтому управление электромагнитным моментом двигателя осуществляется в основном путем изменения угла между потокосцеплениями. Это достигается за счет выбора вектора напряжения, вызывающего такое изменение положения потокосцепления статора относительно потокосцепления ротора,

которое обеспечивает необходимый знак приращения электромагнитного момента и одновременно – необходимый знак приращения модуля потокосцепления. 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 [5]. 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 модуля вектора потокосцепления на заданном уровне.

Поскольку непосредственное измерение момента и потокосцеплений связано с известными практическими трудностями (отсутствие достаточно простых и точных датчиков момента и потока), то необходимо косвенное измерение этих величин (вычисление значений по модели). Модель асинхронного двигателя можно реализовать согласно уравнениям [6]

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{\alpha} - i_{s\alpha}R_s, \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= U_{\beta} - i_{s\beta}R_s, \\ M &= \frac{3}{2}p_n(\psi_{s\alpha}i_{s\beta} - \psi_{s\beta}i_{s\alpha}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – токи статора.

Так как сопротивление статора изменяется в функции температуры, модель для повышения точности целесообразно сделать адаптивной.

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 разными способами: с применением логического автомата, FUZZY – логики, нейронной сети [5].

Вариант принятой для моделирования структурной схемы АТП тепловоза с системой прямого управления моментом представлен на рис. 2. Используется индивидуальное регулирование осей, схема DTC приведена для одной оси.

Входным сигналом для системы управления является свободная мощность на тягу $P_{св}$, которая на каждой позиции контроллера машиниста КМ вычисляется регулятором мощности РМ дизеля дизель-генераторной установки Д-СГ и поступает в блок вычисления задания момента БВМ. Заданный момент M_3 получается путем деления свободной мощности на число осей тепловоза и среднюю частоту вращения $\omega_{ср}$ роторов АД, вычисляемой в блоке вычисления

средней скорости БВСС (при наличии датчика скорости тепловоза следует делить на скорость локомотива, приведенную к валу ротора ω_l). При пуске 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 двигателя, работая при постоянстве мощности, автоматически переходит в режим ослабления поля. Для этого сигнал $\omega_{ср}$ (ω_l) подается в блок вычисления задания потокосцепления БВП, представляющий собой электронную таблицу зависимости потокосцепления статора ψ_s от $\omega_{ср}$ для данной позиции КМ, при этом можно задать поток с учетом минимизации потерь. На участках без ограничения скорости работает только контур момента (с защитой от буксования) и тепловоз разгоняется до установившейся скорости, при которой тяговый момент равен моменту сопротивления движению.

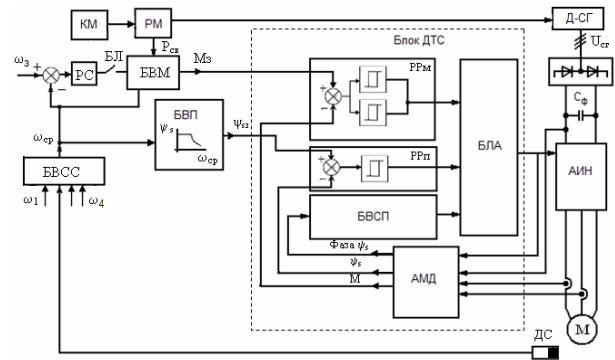


Рис. 2. Структурная схема АТП тепловоза

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 ограничивает задание на момент, если оно становится больше предела по сцеплению или по мощности дизеля. Сформированные задания на момент (M_3) и потокосцепление (ψ_{s3}) подаются в блок DTC, в котором они сравниваются с фактическими значениями момента и потокосцепления (M и ψ_s), вычисленными адаптивной моделью двигателя АМД. 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 АД осуществляется вычисление потока статора (модуля и фазы вектора ψ_s) и момента по введенной в него информации: токам двух фаз статора АД, напряжению цепи постоянного тока и положению ключей АИН; может производиться также вычисление скорости АД и частоты выходного тока АИН. Таким образом, модель АД осуществляет организацию обратных связей по регулируемым переменным в системе автоматического регулирования. По значению фазы вектора ψ_s блок определения сектора потока БВСП определяет, в каком из секторов находится вектор ψ_s .

Далее сигналы с РРМ, РРп и БВСП поступают в модуль быстродействующего логического автомата БЛА, переключающего ключи автономного инвертора в зависимости от оптимизации вектора выходного напряжения АИН по предельным отклонениям момента и потока статора. Частота коммутации ключей зависит от величины гистерезисного допуска релейных регуляторов момента и потокосцепления. Для защиты от буксования выполняется стабилизация скольжения колес, сигнал пропорционально-интегрального регулятора скольжения (РСк) подключается в БВМ при срабатывании защиты от буксования для формирования M_3 (при вычислении скольжения используется сигнал линейной скорости локомотива). Модель позволяет также выполнить пуск тепловоза под контролем регулятора скольжения с максимально возможной при данных условиях сцепления силой тяги.

Адекватность моделирования подтверждается удовлетворительным совпадением результатов, полученных в различных программных комплексах (UM-ПРЭП, UM-MatLab, MatLab/Simulink/SimPowerSystems) на уточненных и упрощенных электромеханических моделях.

Маневровый тепловоз обычно работает с низкими скоростями, но часто при максимальных тяговых нагрузках. Поэтому целесообразным является моделирование режима, когда до выхода на максимальную мощность разгон на 8-й позиции контроллера машиниста осуществляется под контролем РСк (с предельным по условиям сцепления M_3), далее происходит переход к вычислению M_3 делением свободной мощности на скорость и по мере разгона автоматически реализуется режим ослабления поля. В качестве примера на рис. 3, 4 приведены результаты моделирования в UM-MatLab разгона маневрового тепловоза с составом 2000 т на 8-й позиции контроллера машиниста при использовании тяговых двигателей ДАТ305. По-

тенциальный коэффициент сцепления (рис. 3) в ПК UM ступенчато снижается с 0,33 до 0,1 в интервал времени $9 \leq t \leq 14$ с. Графики электромагнитного момента (М) и линейной скорости на ободе правого колеса (V_k) приведены для третьей оси четырехосного тепловоза; V_l – скорость тепловоза, t - время.

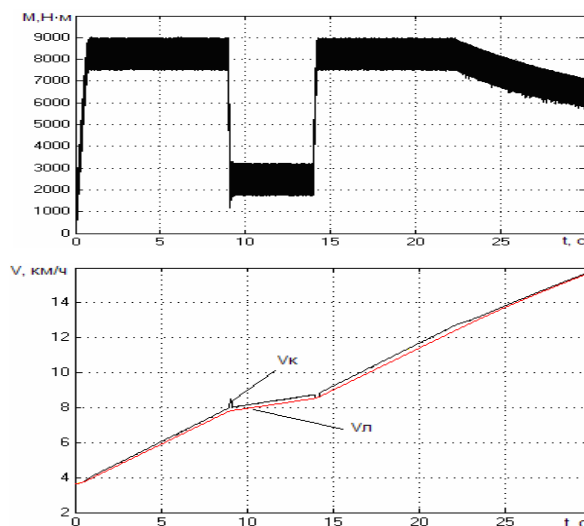


Рис. 3. Результаты моделирования разгона тепловоза при ухудшении условий сцепления

При ухудшении условий сцепления РСк автоматически снижает задание на момент так, чтобы сохранить скольжение на заданном уровне (2,2 %). При пуске под контролем РСк реализуется максимально возможная сила тяги каждой оси (и тепловоза в целом), но при хороших условиях сцепления из-за неравномерного распределения вертикальных нагрузок двигателя наиболее нагруженных осей оказываются перегруженными по току (рис. 4). Графики электромагнитного момента (М) и тока (I) приведены для первой (1) и четвертой (4) осей.

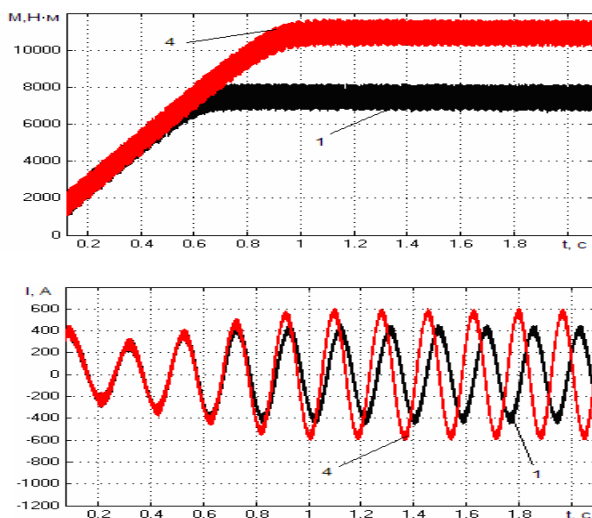


Рис. 4. Результаты моделирования разгона тепловоза

Выводы. 1. Разработана электромеханическая модель перспективного маневрового тепловоза с векторным управлением АТП, позволяющая рассчитывать динамические нагрузки в электрической и механической подсистемах при нестационарных режимах.

2. Система векторного управления с регулятором скольжения позволяет при различных профилях и состоянии пути реализовать использование потенциальных условий сцепления на уровне свыше 90 %, но при пуске в хороших условиях сцепления и реализации максимальных тяговых усилий наблюдаются перегрузки по току АТД 2-й и 4-й осей до 25...30 %.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федяева Г.А., Федяев В.Н. Математическое моделирование электромеханических процессов в

асинхронном тяговом приводе тепловоза ТЭМ21 // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – № 6. – С. 39–45.

2. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел. – Брянск: БГТУ, 1997. – 156 с.
3. Минов Д. К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. – М.: Транспорт, 1965. – 267 с.
4. Федяева Г. А., Федяев В. Н. Программный комплекс для расчета электромеханических процессов в тяговых электроприводах локомотивов при нестационарных и аварийных режимах // Вест. Брянского техн. ун-та. Изд-во БГТУ, 2004. – № 2. – С. 117–123.
5. Козярук А. Е., Рудаков В. В., Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов, Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004. – 128 с.

Поступила в редколлегию 27.04.2007.