

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ТЕПЛОВЗОВ

Наведені методика і результати комп'ютерного моделювання динамічних режимів асинхронного тягового привода перспективних магістральних тепловозів з інвертором напруги при використанні тягових двигунів ДАТ305 і ДТА470

Представлены методика и результаты компьютерного моделирования динамических режимов асинхронного тягового привода перспективных магистральных тепловозов с инвертором напряжения при использовании тяговых двигателей ДАТ305 и ДТА470

The computer modeling method and results of dynamical modes in asynchronous traction drive on perspective trunk diesel locomotives with voltage inverters by using DAT305 and DTA470 traction engines are present

Разработка новых тепловозов с асинхронным тяговым приводом (АТП) требует сравнительного анализа различных схем силового канала и систем управления. При этом на динамические качества АТП существенно влияет не только тип схемы, но и параметры асинхронного тягового двигателя (АТД).

На новых тепловозах, разрабатываемых Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) совместно с Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом подвижного состава (ВНИКТИ МПС), используются асинхронные двигатели ДАТ305 (номинальные данные: мощность 305 кВт, частота вращения 32,8 рад/с, вращающий момент 9316 Н·м, ток фазы 327 А, фазное напряжение 390 В, частота тока статора 16,3 Гц, КПД 90 %) и ДТА470 (номинальные данные: мощность 470 кВт, частота вращения 60,7 рад/с, вращающий момент 7759 Н·м, ток фазы

352 А, фазное напряжение 550 В, частота тока статора 29,55 Гц, КПД 93 %).

Чтобы сравнить динамические качества АТП с одинаковым исполнением силового канала и системами управления, но различными типами двигателей, было выполнено компьютерное моделирование пуска и реостатного торможения тепловозов с двигателями ДАТ305 и ДТА470 при ухудшении условий сцепления. Разработанная математическая модель АТП включает уравнения силовой электрической, механической и управляющей подсистем привода, программирование выполнено в среде Delphi.

Для моделирования динамики тяговых приводов перспективных тепловозов принята силовая схема с автономным инвертором напряжения (АИН) на IGBT и индивидуальным регулированием осей (рис. 1), получившая наибольшее распространение в мировой практике.

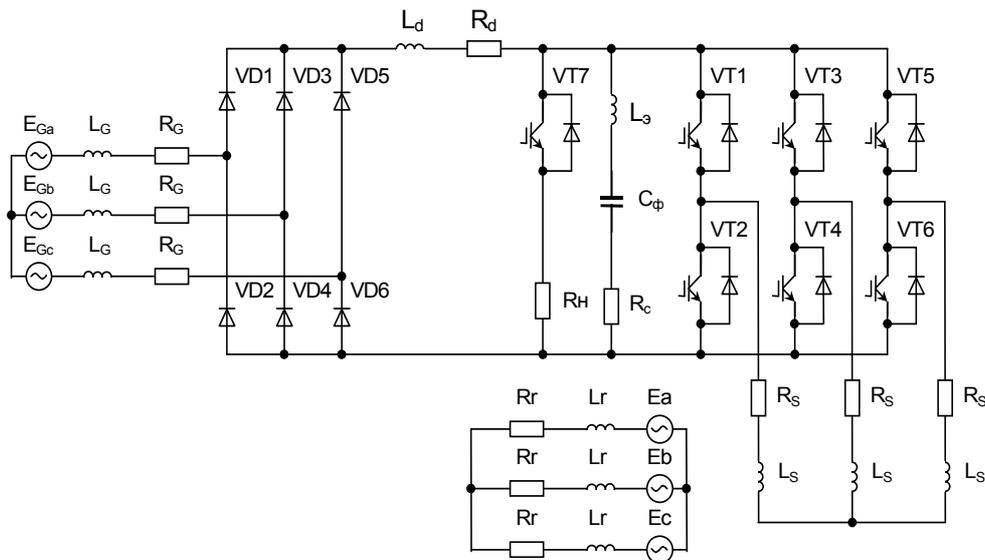


Рис. 1. Схема силовой электрической части АТП с АИН при представлении АТД на основе обобщенной машины

Расчет электрической схемы, в которую входят: источник питания (синхронный генератор), статический преобразователь (выпрямитель и инвертор), цепь реостатного торможения, фильтры выпрямителя и инвертора, асинхронный двигатель, выполняется на основе контурных топологических уравнений в матричной форме [1; 2]

$$\|B\| \|U_B\| = 0, \quad (1)$$

где $\|B\|$ – блочная топологическая матрица; $\|U_B\|$ – блочная матрица напряжений ветвей.

В случае изменения структуры силовой схемы (например, применении инвертора тока) изменяется только матрица $\|B\|$, а система контурных дифференциальных уравнений, сформированная на основе (1), остается неизменной

$$\frac{d\|I_{LK}\| \|L_K\|}{dt} = \|E_K\| - \|R_K\| \|I_{LK}\|, \quad (2)$$

где $\|I_{LK}\|$ – матрица контурных токов индуктивных контуров; $\|I_{LK}\|^{-1}$ – обращенная матрица контурных индуктивностей; $\|E_K\|$ – матрица суммарных контурных ЭДС; $\|R_K\|$ – матрица суммарных контурных сопротивлений.

При формировании матрицы суммарных контурных ЭДС учитываются напряжения на конденсаторах u_c , определяемые из уравнения

$$\frac{d\|u_c\|}{dt} = \left\| \frac{i_B}{c_B} \right\|, \quad (3)$$

где i_B – токи ветвей, содержащих конденсаторы; c_B – емкости конденсаторов соответствующих ветвей.

$$\|i_B\| = \|B\|^t \cdot \|I_K\|,$$

где t – знак транспонирования.

Работа полупроводниковых вентилях моделируется изменением матрицы сопротивлений ветвей по определенному закону в соответствии с алгоритмом управления.

Обмотки статора и ротора асинхронного двигателя являются ветвями силовой электрической схемы и учитываются при составлении топологической матрицы. При этом АД в данной схеме в зависимости от поставленных задач может рассчитываться либо классическими методами, базирующимися на представлении реального двигателя трехфазной «обобщенной

машиной» [3], либо с использованием метода проводимостей зубцовых контуров (ПЗК) [4].

На строящемся магистральном тепловозе 2ТЭ25А будет применено опорно-осевое подвешивание тяговых двигателей. Модель механической подсистемы тягового привода оси локомотива, составленная с использованием результатов работ [5; 6] (рис. 2), учитывает угловые колебания элементов передачи в продольной вертикальной плоскости по отношению к оси пути, определяющим образом влияющие на соответствующие колебания ротора и электромагнитный момент АД.

Тяговое усилие от колесных пар передается через контакт колесо-рельс на локомотив. Сила тяги каждого колеса определяется по сцепному весу и коэффициенту сцепления

$$F_k = (P_{cc} / 2) \cdot \Psi,$$

где F_k – сила тяги колеса; P_{cc} – сцепной вес; Ψ – коэффициент сцепления.

Коэффициент сцепления колеса и рельса рассчитывается по формуле

$$\Psi = K \Psi_0,$$

где Ψ_0 – потенциальный коэффициент сцепления; K – коэффициент сцепления в относительных единицах

$$K = \Psi / \Psi_0.$$

Значения Ψ_0 в зависимости от скорости движения локомотива задаются таблично с интерполяцией в промежуточных точках на основе сплайн-функции. Для моделирования влияния остальных факторов (например, наезд на масляное пятно, подсыпка песка) Ψ_0 можно варьировать.

Коэффициент сцепления в относительных единицах K определяется в функции скорости проскальзывания колес, выраженной в процентах по отношению к скорости локомотива, на основе нелинейной характеристики сцепления, которая задается по точкам с интерполяцией промежуточных значений. Причем вид этой характеристики может варьироваться в зависимости от состояния рельсов [6], например, для сухих рельсов вводится характеристика с явно выраженным, а для влажных – с неявно выраженным максимумом.

На магистральных тепловозах с АТП могут быть установлены двигатели ДТА470 и ДАТ305. Для сравнения было выполнено компьютерное моделирование пуска и реостатного торможения одного и того же магистрального тепловоза с разными типами АД.

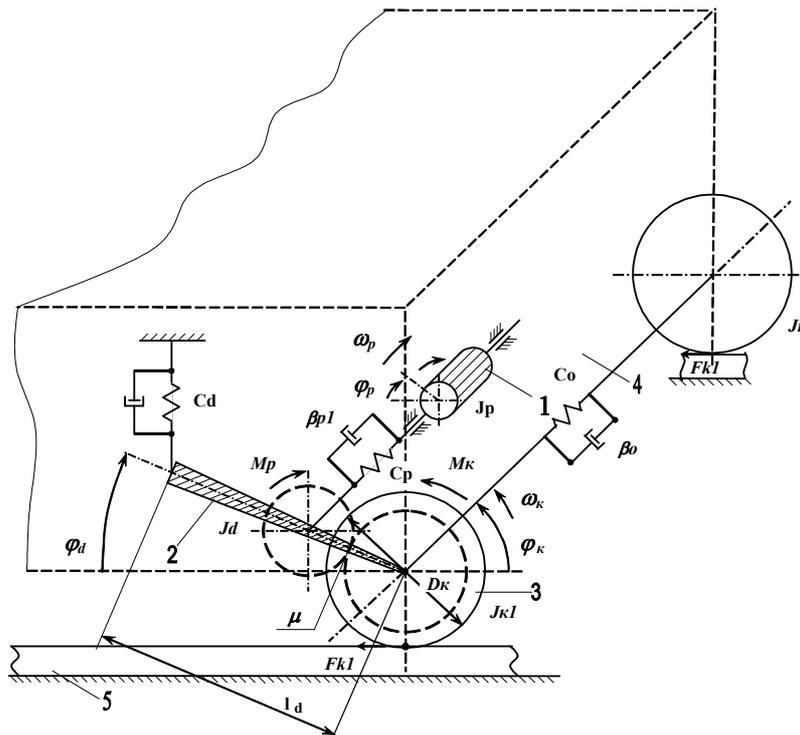


Рис. 2. Расчетная схема механической части АТП тепловоза ТЭМ21:
 1 – ротор АТД; 2 – остов АТД; 3 – колесная пара; 4 – локомотив и поезд; 5 – рельсовый путь

Система управления при моделировании также принята одинаковой. В процессе пуска до номинальной скорости и электрического торможения амплитуда напряжения, приложенного к обмотке статора, регулируется по закону

$$U_1 = U_0 + k_u f_1,$$

где U_1 – амплитуда напряжения статора; f_1 – частота напряжения статора; k_u – коэффициент пропорциональности; U_0 – начальное значение напряжения.

Частота напряжения статора АТД вычисляется по формуле

$$f_1 = f_{\text{л}} \pm f_2,$$

где $f_{\text{л}}$ – частота, соответствующая скорости локомотива, приведенной к ротору двигателя; f_2 – частота абсолютного скольжения двигателя.

Знак «+» относится к тяговому, знак «-» - к тормозному режиму работы АТП. При моделировании электрического торможения в процессе снижения частоты f_1 контролируется напряжение ветви реостатного торможения с транзистором VT7 и резистором Rн, включенной параллельно ветви конденсатора фильтра (см. рис. 1). Когда расчетное напряжение превышает заданное, открывается транзистор VT7 и происходит сброс энергии в реостат Rн.

В качестве примера на рис. 3, 4 приведены результаты моделирования пуска и реостатного торможения АТП с двигателем ДАТ305 и ДТА470 при существенном ухудшении условия сцепления (Ψ_0 снижается до 0,01). В данном случае при моделировании использована характеристика сцепления с явно выраженным максимумом. Торможение ДАТ305 начинается в момент времени $t = 5,5\text{c}$.

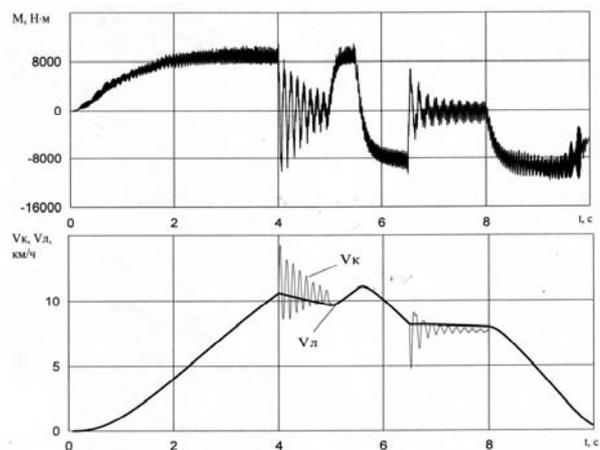


Рис. 3. Результаты моделирования пуска и электрического торможения АТП тепловоза с двигателями ДАТ305 при снижении потенциального коэффициента сцепления Ψ_0 до 0,01 в интервалы времени $4\text{c} \leq t \leq 5\text{c}$ и $6,5\text{c} \leq t \leq 8\text{c}$

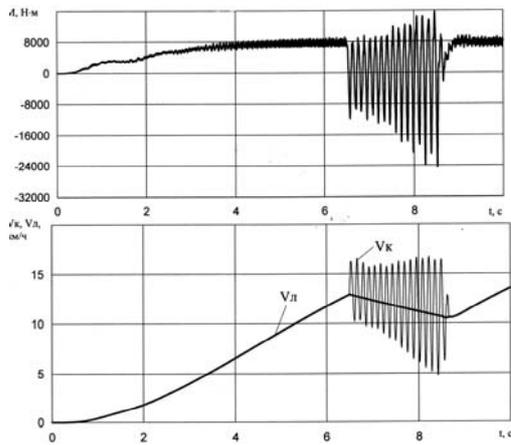


Рис. 4. Результаты моделирования пуска АТП тепловоза с двигателями ДТА470 при снижении потенциального коэффициента сцепления Ψ_0 до 0,01 в интервал времени $6,5с \leq t \leq 8с$

На приведенных и последующих графиках M – электромагнитный момент двигателя; $V_{л}$ – скорость локомотива; $V_{к}$ – скорость колеса с моментом инерции $Jk1$.

Как видно из графиков, в АТП с двигателем ДТА470 в случае применения скалярного управления в начале пуска наблюдаются колебания электромагнитного момента, а при существенном ухудшении условий сцепления происходит усиление фрикционных автоколебаний.

Улучшить динамику АТП позволяет применение векторного управления и, в частности, системы прямого управления моментом (Direct Torque Control – DTC) [7] (рис. 5, 6), впервые реализованной фирмой ABB.

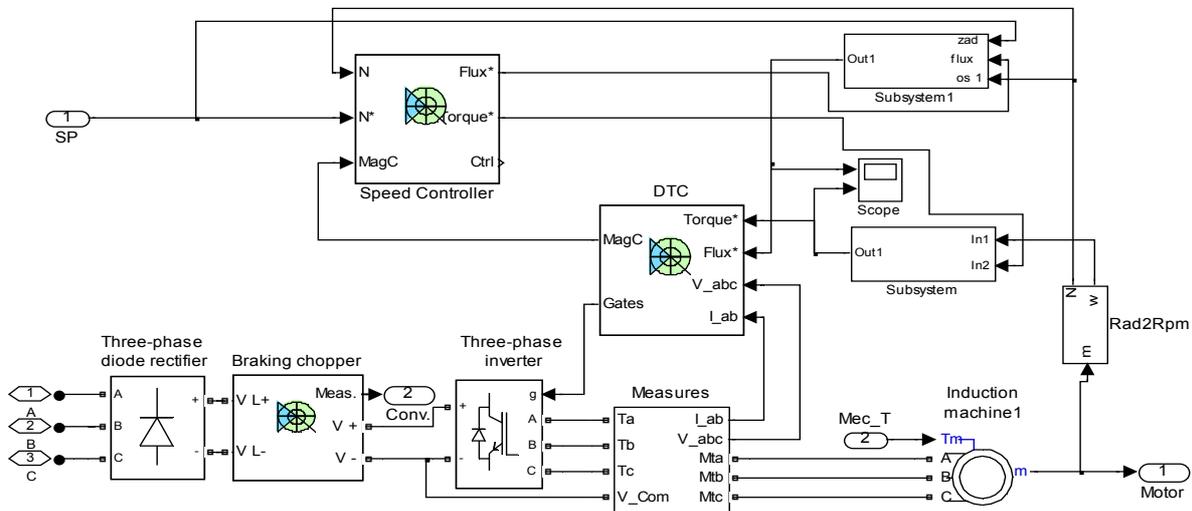


Рис. 5. Фрагмент модели системы прямого управления моментом АТД в MatLab

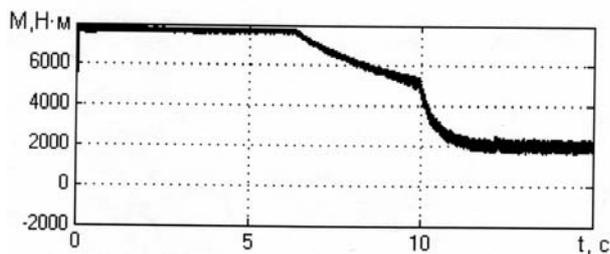


Рис. 6. Результаты моделирования в MatLab пуска и разгона АТП с двигателем ДТА470 при использовании DTC

Выводы

1. Жесткость естественных характеристик асинхронных тяговых двигателей ДАТ305 и ДТА470, даже при очень существенном ухуд-

шении условий сцепления ($\Psi_0 = 0,01$), оказывается достаточной для предотвращения разностного буксования, но возникают автоколебания. Затухание колебаний происходит в том случае, если демпфирующая способность электромеханической системы АТП (двигателя и механической передачи) преобладает над усилением колебаний на падающем участке характеристики сцепления.

2. Асинхронный двигатель ДТА470, имеющий большие, чем ДАТ305, переходные постоянные времени обмоток, обладает меньшей демпфирующей способностью при возникновении фрикционных автоколебаний.

3. Применение системы прямого управления моментом позволяет улучшить динамические качества привода с двигателем ДТА470.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михальченко Г. С. Моделирование переходных режимов в асинхронном тяговом приводе локомотивов / Г. С. Михальченко, Г. А. Федяева, А. И. Власов // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 4. – С. 42–47.
2. Михальченко Г. С. Взаимовлияние динамических процессов в электрической и механической подсистемах тягового электропривода тепловозов при переходных режимах / Г. С. Михальченко, Г. А. Федяева, В. Н. Федяев // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 12. – С. 28–32.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
4. Иванов-Смоленский А. В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский, Ю. В. Абрамкин, А. И. Власов и др.; Под ред. А. В. Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
5. Бирюков И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.
6. В. Engel. Регулирование тяги с высоким использованием сил сцепления // Железные дороги мира. – 1999. – № 2. – С. 39–45.
7. Козярук А. Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков // Санкт-Петербургская электротехническая компания. 2004. – 128 с.

Поступила в редколлегию 11.08.2006.