

Ковалев Р.В., Федяева Г.А., Федяев В.Н.

Брянский государственный технический университет (Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВЗОВ

Розроблена комп'ютерна модель електромеханічної системи магістрального тепловоза на базі поєднання програмних комплексів MatLab і «Універсальний механізм»

Разработана компьютерная модель электромеханической системы магистрального тепловоза на базе совмещения программных комплексов MatLab и «Универсальный механизм».

Based on combination of program packages MatLab and Universal Mechanism a computer model of a diesel locomotive electromechanically system is developed.

Необходимость обновления парка российских тепловозов требует создания в кратчайшие сроки мощных магистральных машин. Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) совместно с Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом (ВНИКТИ МПС) ведется разработка новых тепловозов, как с асинхронными тяговыми двигателями (АТД), так и с двигателями постоянного тока (ДПТ). Выпущен опытный образец магистрального тепловоза 2ТЭ25К мощностью 2500 кВт с коллекторными двигателями, строится опытный образец тепловоза 2ТЭ25А с АТД.

Крайне сжатые сроки проектирования делают особенно актуальным использование для прогнозирования динамических свойств перспективных тепловозов современных методов компьютерного моделирования. Однако, исследование локомотива как единой сложной электромеханической системы в настоящее время затруднено тем, что широко применяемые для моделирования автоматизированного электропривода программные комплексы MatLab и OrCad не имеют инструментария, позволяющего анализировать динамику сложных механических объектов с большим числом степеней свободы. Поэтому разрабатываемые в них модели локомотивов используют упрощенное представление механической части тепловозов в виде 2÷6-массовых систем, что ведет в ряде случаев не только к снижению точности,

но и к полной утрате некоторых существенных явлений, таких, например, как перераспределение нагрузки по осям в режиме тяги.

Вместе с тем, программный комплекс (ПК) «Универсальный механизм» (UM), зарекомендовавший себя как надежный и эффективный инструмент анализа динамики железнодорожных экипажей, позволяет полностью

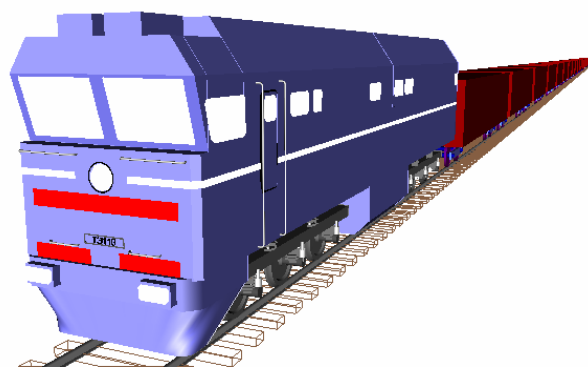


Рис. 1. Модель механической части тепловоза 2ТЭ116 с составом в ПК UM

автоматизировать построение уравнений движения локомотива как механической системы, что дает возможность использовать расчетные схемы с практически любой степенью детализации, и тем самым максимально приблизить модель к реальному объекту (рис. 1).

При этом тепловоз (и при необходимости состав) представляются в виде системы твердых тел (кузова, рам тележек, зубчатых колес редукторов, колесных пар, остовов тяго-

вых двигателей и т. д.), связанных друг с другом через элементы, обладающие упругими и диссипативными свойствами. Соединение такой модели с моделью электрической и управляющей подсистем открывает новые возможности для более полного анализа динамических свойств тепловозов.

В рамках развития ПК УМ на кафедре «Прикладная механика» Брянского государственного технического университета был разработан дополнительный модуль, обеспечивающий интеграцию моделей, созданных в MatLab/Simulink в модели ПК УМ. С использованием такой интеграции разработана модель двухсекционного 12-осного локомотива 2ТЭ116, на базе которого создан новый магистральный тепловоз 2ТЭ25К. Тепловоз имеет трехосные тележки с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей (рис. 2. а, б).

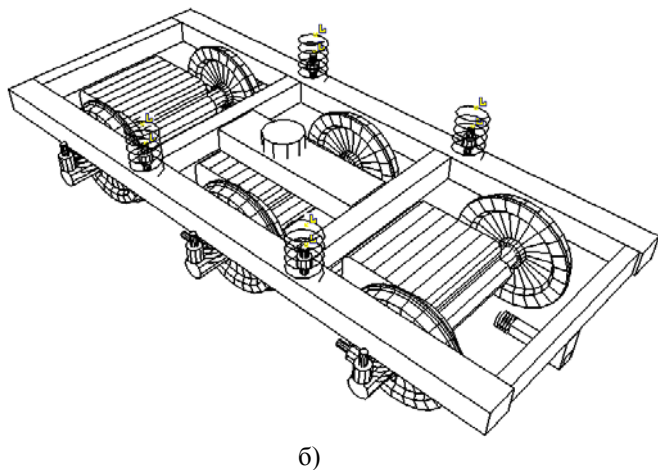


Рис. 2. Элементы модели механической части тепловоза 2ТЭ116 в ПК УМ:
а) колесно-моторный блок;
б) тележка.

Моделирование электрической и управляющей подсистем выполнено в среде MatLab 7.0 средствами основной библиотеки Simulink, так как при использовании прикладного пакета SimPowerSystems в некоторых случаях возможны осложнения при совмещении уравнений MatLab с ПК УМ. Для моделирования электрической части серийного тепловоза 2ТЭ116 при-

нята силовая схема с параллельным подключением тяговых двигателей последовательного возбуждения к одной выпрямительной установке (ВУ).

При моделировании источника питания использованы зависимости выпрямленного напряжения тягового генератора от выпрямленного тока $U_d(I_d)$ (внешние характеристики) для каждой позиции контроллера машиниста. В комплексе MatLab это выполнено при помощи ключа Multiport Switch и блоков табличного задания функций Look Up Table ($N1 \div N15$) (рис. 3). Причем, благодаря тому, что при трансляции уравнения MatLab включаются в систему уравнений ПК УМ с соблюдением определенных правил, обеспечивающих возможность корректировки параметров, можно, изменяя настройки блоков Step ($S1 \div S15$), управляющих ключом, менять режимы движения локомотива (время движения на каждой позиции контроллера машиниста) непосредственно в среде ПК УМ.

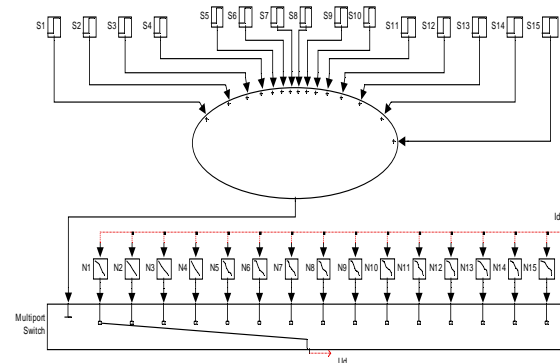
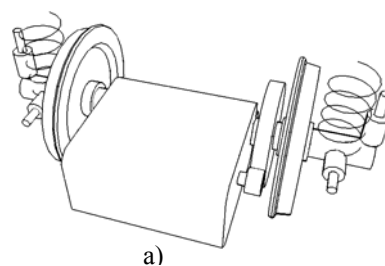


Рис. 3. Фрагмент модели электрической подсистемы тепловоза в MatLab, выполняющий переключения позиций контроллера машиниста

Влияние переходных процессов в цепях системы автоматического регулирования (САР) напряжения тягового генератора на мгновенное значение его выходного выпрямленного на-

пряжения U , подводимого к тяговым двигателям, учитывается уравнением [2]

$$T_I \frac{dU}{dt} + U = U_d(I_d),$$

где T_I – постоянная времени цепи генератора.

Инерционность изменения мощности дизеля при изменении позиции контроллера машиниста можно описать аналогично введением инерционного звена.

При моделировании двигателя последовательного возбуждения желательнее для уточнения модели в нормальных, и особенно в аварийных и нестационарных режимах, учесть влияние вихревых токов, наводимых в магнитопроводе при изменении потока двигателя. Для моделирования тягового двигателя с учетом вихревых токов используются различные методы [3, 4]. В данной работе применен упрощенный подход [5, 6], при котором реальный контур вихревых токов заменяют фиктивным (с числом витков W_0 и сопротивлением R_0), расположенным по продольной оси β обобщенной машины (рис. 5), и связанным с потоком Φ по данной оси коэффициентом связи, равным единице. При этом в фиктивном контуре течет ток I_0 , обмотки якоря и возбуждения двигателя обтекаются одним и тем же током I_α (ослабление поля в данном случае не учитывается). В

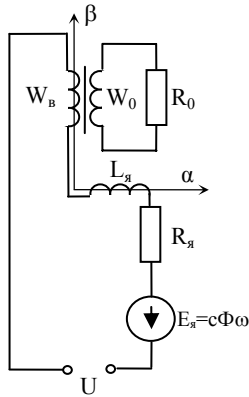


Рис. 4. Схема моделирования ДПТ

цепь якоря входят суммарная индуктивность L_α и суммарное сопротивление R_α , включающие индуктивности и сопротивления обмоток якоря, дополнительных полюсов и компенсационной соответственно; собственная индуктивность обмотки возбуждения L_β ; сопротивление обмотки возбуждения R_β и противо-ЭДС двигателя E_β . Система уравнений двигателя в осях α, β (рис. 4) имеет вид

$$\frac{dI_\alpha}{dt} (L_\alpha + L_\beta(I_\mu)) + \frac{dI'_0}{dt} L_\mu = U - I_\alpha (R_\alpha + R_\beta) - c \cdot \Phi(I_\mu) \cdot \omega \quad (1)$$

$$\frac{dI_\alpha}{dt} L_\mu + \frac{dI'_0}{dt} L_\mu = -I'_0 \cdot R'_0$$

где $I_\mu = I_\alpha + I'_0$ – ток намагничивания; $I'_0 = I_0 \frac{W_0}{W_\beta}$ –

вихревой ток, приведенный к обмотке возбуждения; W_β – число витков обмотки возбуждения; W_0 – число витков обмотки возбуждения;

$R'_0 = \frac{W_\beta^2}{W_0^2} R_0$ – приведенное сопротивление

контура вихревых токов; $L_\beta(I_\mu)$ – индуктивность обмотки возбуждения, рассчитываемая на основе кривой намагничивания;

$L_\mu = L_\beta(I_\mu) - L_\sigma$ – приведенная взаимная индуктивность обмотки возбуждения и контура вихревых токов;

L_σ – индуктивность рассеяния главных полюсов; $\Phi(I_\mu)$ – магнитный поток двигателя, определяемый по характеристикам машины; c – постоянная двигателя; ω – угловая скорость вращения ротора. Параметры контура вихревых токов W_0, R_0 уточняются по экспериментальным данным [5].

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

Выражая из системы (1) производные токов, получаем уравнения двигателя в форме Коши.

$$\frac{dI_\alpha}{dt} = \frac{L_\mu [U - I_\alpha (R_\alpha + R_\beta) - c \cdot \Phi(I_\mu) \cdot \omega] + L_\mu \cdot I'_0 \cdot R'_0}{L_\mu (L_\alpha + L_\beta(I_\mu)) - L_\mu^2} \quad (2)$$

$$\frac{dI'_0}{dt} = \frac{-I'_0 \cdot R'_0 (L_\alpha + L_\beta) - L_\mu [U - I_\alpha (R_\alpha + R_\beta) - c \cdot \Phi(I_\mu) \cdot \omega]}{L_\mu (L_\alpha + L_\beta(I_\mu)) - L_\mu^2}$$

Выходными параметрами для электрической подсистемы тепловоза и входными для механической являются электромагнитные моменты двигателей

$$M = c \cdot \Phi(I_\mu) \cdot I_\alpha.$$

Скорости роторов ω , входящие в уравнение (2), определяются при расчете механической части в ПК УМ. Кривые $\Phi(I_\mu)$ и $L_\beta(I_\mu)$ в MatLab задаются таблично с интерполяцией промежуточных значений.

Сравнение результатов моделирования с осциллограммами эксплуатационных испытаний тепловоза 2ТЭ116, полученными ВНИКТИ МПС на участке Ртищево – Кочетовка Юго-Восточной железной дороги [7] показывает, что

расхождение расчетных и экспериментальных данных при нормальных условиях сцепления составляет не более 12 %.

На рис. 5 в качестве примера приведены результаты моделирования разгона до конструкционной скорости одной секции тепловоза 2ТЭ116 при переключении позиций контроллера машиниста с 1 по 6. Изображены следующие графики: номер позиции контроллера $N_{пк}$, скорость тепловоза V , ток выпрямительной установки I_d , момент двигателя первой колесной пары M , нагрузки на оси колесных пар первой тележки $N_1 \div N_3$.

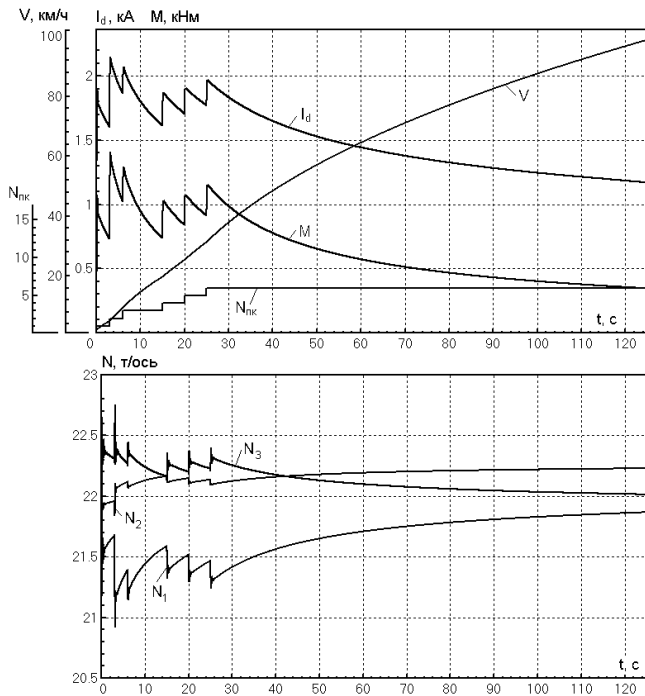


Рис. 5. Результаты моделирования динамики электромеханической системы секции тепловоза 2ТЭ116

В рамках продолжения исследований планируется разработка и анализ электромеханической модели магистрального тепловоза 2ТЭ25К с различными конструкциями тележек.

Выводы. 1. Разработана модель, иллюстрирующая принципиальную возможность прогнозирования динамических режимов в электромеханической системе тепловоза на базе совмещения программных комплексов MatLab и UM.

2. Для тепловоза 2ТЭ116 определены продольный и поперечный крип и силы крипа,

суммарная сила тяги, вертикальные силы на колесах, усилия в элементах подвешивания, виброускорения кузова, рам тележек, корпусов тяговых двигателей и другие параметры с учетом динамических процессов в электрической подсистеме и обусловленного ими перераспределения нагрузок.

3. Модель позволяет исследовать аварийные и нестационарные режимы и, при дополнении ее системами защиты от буксования, выполнять сравнение различных вариантов защиты.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел. – Брянск: БГТУ, 1997. - 156 с.
2. Павленко А.П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов. - М.: Машиностроение, 1991. - 192 с.
3. Жиц М.З. Переходные процессы в машинах постоянного тока. – М: Энергия, 1974. - 112 с.
4. Плакс А.В., Изварин М.Ю. Параметры коллекторных тяговых двигателей при моделировании переходных процессов в цепях электровозов// Вестник ВЭЛНИИ. – Новочеркасск: Из-во ВЭЛНИИ, 2004, С. 112-118.
5. Захарченко Д.Д., Ротанов Н.А., Горчаков Е.В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. – М.: Транспорт, 1979. – 303 с.
6. Ключев В.И. Теория электропривода. - М.: Энергоатомиздат, 2000. – 704 с.
7. Клименко Ю.И. Моделирование электропривода с изменяемой жесткостью тяговой характеристики: Дис. ... канд. техн. наук.- Коломна: ВНИКТИ, 2004. – 171 с.