

А. Р. Сафин, канд. техн. наук, доц., sarkazan@bk.ru,
Р. Ш. Мисбахов, канд. техн. наук, доц., **В. М. Гуреев**, д-р техн. наук, проф.
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Разработка рациональной структуры тягового электропривода трамвая в среде моделирования электроэнергетических объектов программы MATLAB

Рассматривается имитационная модель тягового электропривода трамвая с асинхронными двигателями. Разработка имитационной модели выполнена с помощью программы MATLAB в приложении SimPowerSystem. Предложенная модель позволяет рассчитывать энергетические показатели тягового электропривода трамвая.

Ключевые слова: тяговый электропривод, тяговый инвертор, трамвай, имитационная модель, потери электрической энергии

Введение

В современной городской транспортной системе России из года в год все более важное место занимают трамвайные вагоны, так как этот вид транспорта обеспечивает минимальные эксплуатационные затраты, высокие объемы перевозки пассажиров и снижение загрязнения окружающей среды. В связи с этим необходимо создание новых современных трамвайных вагонов с улучшенными энергетическими характеристиками. Среди комплекса научно-технических проблем, направленных на улучшение процесса перевозки пассажиров, важным является вопрос снижения затрат электроэнергии трамвайными вагонами во время движения, которые существенно зависят от характеристик схем тягового электропривода. Повышение энергоэффективности является важной государственной задачей согласно приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ (Указ президента РФ от 7 июля 2011 года № 899 "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ").

Теоретические основы исследований электрической тяги рельсового транспорта начали закладываться в конце позапрошлого столетия. Основы для изучения фундаментальных проблем динамики рельсовых экипажей были заложены известными отечественными и зарубежными учеными: Н. Е. Жуковским, Н. П. Петровым, В. Е. Розенфельдом, В. В. Шевченко, В. Д. Тулуповым, Ф. Картером и др. Эти ученые разработали первые расчетные схемы рельсового экипажа, поезда и пути, поставили и решили важные задачи транспортной механики и электрической тяги.

Большой вклад в исследования электроподвижного состава внесли представители коллективов Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, Всероссийского научно-исследовательского института вагоностроения, Тверского института вагоностроения, ЦКБ транспортного машиностроения, Московского,

Санкт-Петербургского, Уральского, Омского, Самарского университетов путей сообщения и ряд других научных и производственных организаций и вузов.

В настоящее время в области динамики рельсового подвижного состава накоплен богатый опыт теоретических и экспериментальных трудов. К основным методам исследований относятся: натурный и модельный эксперименты; аналитическое, физическое и электронное моделирование, а также эффективные методы цифрового моделирования, основанные на численном интегрировании дифференциальных уравнений, которыми описывают движение электроподвижного состава [1].

В данной работе в качестве среды моделирования выбрана библиотека блоков SimPowerSystems (в версии MATLAB 6.1 и ранее — Power System Blockset), которая является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование конкретных устройств. SimPowerSystems содержит набор блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и другого оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования устройств силовой электроники, включая системы управления для них. Используя специальные возможности Simulink и SimPowerSystems, пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств.

Несомненным достоинством SimPowerSystems является тот факт, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием имитационных блоков SimPowerSystems, а систему управления — с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм ее работы, а не ее электрическую схему.

Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее работоспособность и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков SimPowerSystems можно использовать блоки и остальных библиотек Simulink, а также функции самого MATLAB, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Таким образом, SimPowerSystems в составе Simulink на настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем [2, 3].

Цель создания имитационной модели — определение рациональной структуры тягового электропривода с минимально возможными потерями электроэнергии в тяговом преобразователе и тяговом электродвигателе.

Задачей моделирования является анализ потерь электроэнергии в тяговом инверторе трамвая, в тяговом двигателе, системе охлаждения с учетом различных условий движения, элементной базы инвертора, способов управления.

Математическая модель движения трамвая

Как известно, объект управления, в данном случае трамвай, описывается следующей системой уравнений:

$$(1 + \gamma)m \frac{dv}{dt} = F - B - W_0(v) - W_g(s), \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = v,$$

где s — координата центра масс электроподвижного состава (ЭПС), в данном случае трамвая; v — скорость трамвая; t — время; m — масса состава; γ — коэффициент, учитывающий дополнительную инерцию вращающихся масс; F — суммарная сила тяги; B — суммарная тормозная сила; W_0 , W_g — основное и дополнительное сопротивления движению.

Основное удельное сопротивление движению состава (Н/кН), определяется по эмпирической формуле

$$w_0 = a + bv + cv^2, \quad (2)$$

где a , b , c — постоянные числовые коэффициенты; v — скорость движения.

Скорость трамвая определяется по формуле

$$v = 3,6 \cdot \frac{n\pi D}{g \cdot 60}, \quad (3)$$

где n — частота вращения вала тягового двигателя; D — диаметр колеса трамвая; g — передаточное отношение редуктора трамвая.

Энергетические показатели трамвая

Потребленная тяговым инвертором трамвая энергия вычисляется следующим образом:

$$E_{\text{инв}} = \int_0^T U_c I_{\text{инв}} dt, \quad (4)$$

где U_c — напряжение сети; $I_{\text{инв}}$ — сила тока, потребляемого инвертором.

Полная мощность, потребляемая из тягового инвертора, равна

$$P_{\text{двиг}} = \frac{3}{2} (U_{sq} I_{sq} + U_{sd} I_{sd}), \quad (5)$$

где I_{sq} , I_{sd} , U_{sq} , U_{sd} — проекции векторов тока и напряжения статора во вращающейся системе координат.

Энергия, потребляемая тяговым двигателем, равна

$$E_{\text{двиг}} = \int_0^T P_{\text{двиг}} dt. \quad (6)$$

Механическая энергия на валу двигателя рассчитывается по формуле

$$E_{\text{мех}} = \int_0^T \omega_{\text{двиг}} M_{\text{вр}} dt, \quad (7)$$

где $\omega_{\text{двиг}}$ — угловая скорость вращения вала двигателя; $M_{\text{вр}}$ — вращающий момент двигателя.

КПД тягового инвертора и тягового двигателя рассчитываются, соответственно, по следующим выражениям:

$$\eta_{\text{инв}} = \frac{E_{\text{двиг}}}{E_{\text{инв}}}; \quad (8)$$

$$\eta_{\text{двиг}} = \frac{E_{\text{мех}}}{E_{\text{двиг}}}. \quad (9)$$

Структура имитационной модели

За основу исследования взята силовая электрическая схема тягового преобразователя трамвайного вагона "Спектр" [4].

Трамвайный вагон (модель 71-402) представляет собой четырехосный вагон, предназначен для перевозки пассажиров на городских линиях с колеей 1524 мм. Питание электрических цепей вагона осуществляется от контактной сети с номинальным напряжением 550...600 В. Вагон оборудован тяговым асинхронным электроприводом с частотным регулированием и приспособлен для эксплуатации как в одиночку, так и по системе многих единиц в составе поезда из двух вагонов.

Пассажирское помещение рассчитано на 34 места для сидения и 164 мест для стояния пассажиров при максимальной загрузке 10 чел/м².

Тяговые двигатели (4 шт.) — асинхронные с номинальной мощностью 54 кВт, с короткозамкнутым ротором, частотно-управляемые с самообдувом АТЧД-225-4УХЛ2. Тиристорные тяговые преобразователи, каждый из которых управляет двумя тяговыми двигателями, имеют встроенную систему микропроцессорного управления; охлаждение осуществляется встроенным вентилятором с асинхронным приводом. Преобразователи обеспечивают полностью бесконтактное управление режимами работы двигателей, глубокое электродинамическое торможение (практически до полной остановки), рекуперацию электроэнергии.

Крутящий момент от каждого из двух тяговых электродвигателей передается на ось колесной пары через карданный вал и двухступенчатый редуктор с передаточным числом 7,36. Диаметр колес 710 мм, масса порожнего вагона не более 19,5 т. Максимальная скорость 75 км/ч. На рис. 1 обозначены основные элементы трамвайного вагона.

Моделировалась работа одного тягового преобразователя с двумя тяговыми двигателями с учетом равномерной загрузки всех четырех двигателей.

Общий функциональный вид имитационной модели тягового электропривода трамвая в SimPowerSystems представлен на рис. 2.

Рассмотрим входящие в имитационную модель блоки.

1. Блок управления тяговым электроприводом (рис. 3) реализует ШИМ на частоте 3 кГц. Возможен сравнительный анализ различных законов управления тяговым электроприводом (скалярное, векторное) в целях выбора наиболее рационального для конкретного подвижного состава. Рассчитывается расход электроэнергии на охлаждение, осуществляемое встроенным вентилятором с асинхронным приводом.

Элемент "Задатчик скорости и ускорения" содержит ПИ регулятор (пропорционально-интегральный) и определяет максимальную скорость движения трамвая. Элемент "Блок задания закона управления U/f " (рис. 3) обеспечивает исполнение скалярного управления асинхрон-

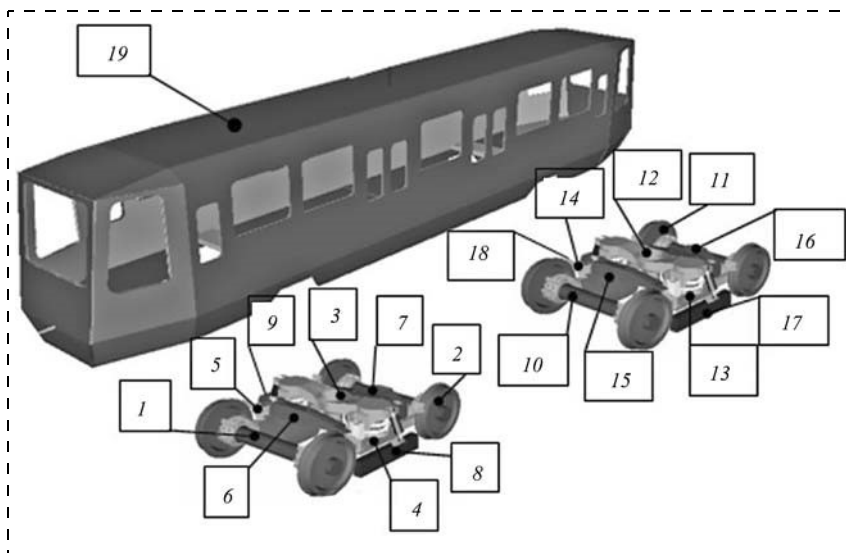


Рис. 1. Основные элементы трамвайного вагона "Спектр":

1—2, 10—11 — колесные пары; 3, 12 — надрессорные балки; 4, 5, 13, 14 — продольные балки; 6, 7, 15, 16 — моторные балки с тяговыми электродвигателями; 8, 9, 17, 18 — башмаки магниторельсового тормоза; 19 — кузов



Рис. 2. Общий функциональный вид имитационной модели тягового электропривода трамвая в SimPowerSystems

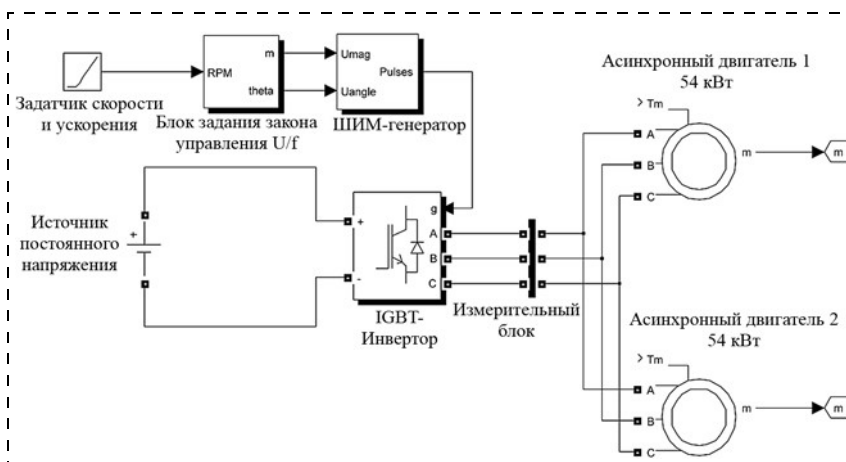


Рис. 3. Блок управления тяговым электроприводом

ным электроприводом по закону U/f с поддержанием заданного момента. Элемент "ШИМ-генератор" задает несущую частоту широтно-импульсной модуляции. Элемент "IGBT-инвертор" взят из библиотеки SimPowerSystems, который позволяет задавать тип полупроводникового элемента тягового преобразователя и его параметры. Модель асинхронного двигателя включает в себя сопротивления и индуктивности обмоток ротора и статора, а также момент инерции на валу двигателя в зависимости от массы состава. Выходные электрические и механические параметры тяговых двигателей подаются на блок *m*, откуда они подаются в блок вычисления потребленной тяговыми двигателями электроэнергии.

2. Блок вычисления потерь в IGBT-инверторе (динамических, статических) (рис. 4) позволяет задавать конкретные характеристики полупроводниковых элементов преобразователя, а также проверить тепловой режим работы преобразователей в целях выбора соответствующего режима работы системы охлаждения.

В схеме расчета статистических потерь (потерь проводимости) в модуле IGBT-транзистора находится мгновенное значение тока в модуле IGBT, которое дальше пересчитывается в действующее значение. Данное значение преобразуется в прямое падение напряжения на транзисторе на основе интерполяционных таблиц, которые задаются с учетом реальных характеристик IGBT-транзистора. Далее вычисляется мощность и энергия потерь в одном модуле и во всех шести соответственно.

Статические потери в обратных диодах модулей IGBT вычисляются аналогично.

Потери на выключение транзистора и на восстановление обратного диода транзистора вычисляются аналогично.

3. Блок вычисления потребленной электроэнергии тяговым инвертором из сети, тяговыми асинхрон-

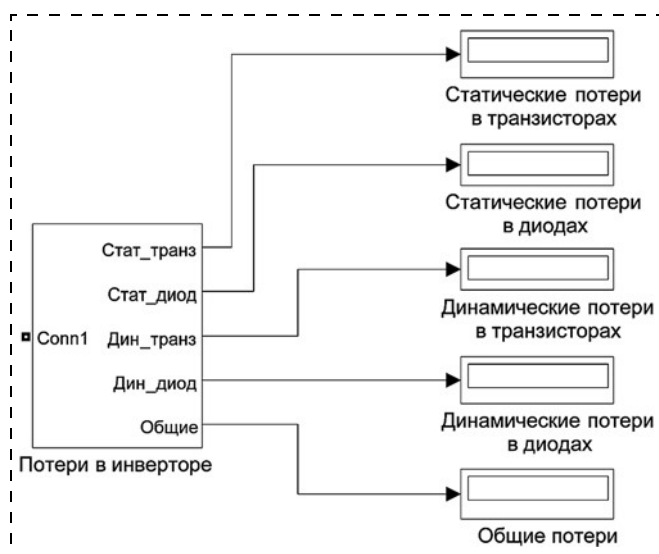


Рис. 4. Блок вычисления потерь в IGBT-инверторе

ными двигателями и механической энергии на валу тягового двигателя позволяет вычислять КПД отдельных элементов и всего тягового электропривода в целом (рис. 5).

На вход In3 подается значение вращающего момента $M_{вр}$, на вход In4 — частота вращения вала двигателя $\omega_{двиг}$, на вход In5 — значение силы тока $I_{инв}$, потребляемого тяговым инвертором.

Потребленная инвертором энергия вычисляется на основании формулы (4).

Напряжение берется равным номинальному значению сети 550 В, имеется возможность задавать изменение напряжения в сети в зависимости от нагрузки в ней. Интегрирование проводится с помощью блока Integrator из библиотеки SimPowerSystems.

Расчет электрической энергии, потребленной тяговым двигателем из тягового инвертора, выполняется на основе уравнений (5) и (6).

Механическая энергия на валу двигателя рассчитывается на основе формулы (7).

КПД инвертора и тягового двигателя рассчитываются по выражениям (8) и (9) соответственно.

4. Блок моделирования движения трамвая, который учитывает диаметр колес, передаточное число редуктора, массу вагона в зависимости от нагрузки, скорость движения, удельное сопротивление движению состава, профиль пути, момент инерции на валу двигателя (рис. 6), позволяет выполнять расчет скорости, ускорения и пройденного пути подвижного состава. Сопротивление движению пересчитывается в момент сопротивления на валу тягового двигателя.

Вход In1 принимает значение частоты вращения вала тягового двигателя, которое преобразуется в линейную скорость. Путем численного интегрирования и дифференцирования системы уравнений (1) получаем путь, пройденный составом, и ускорение состава.

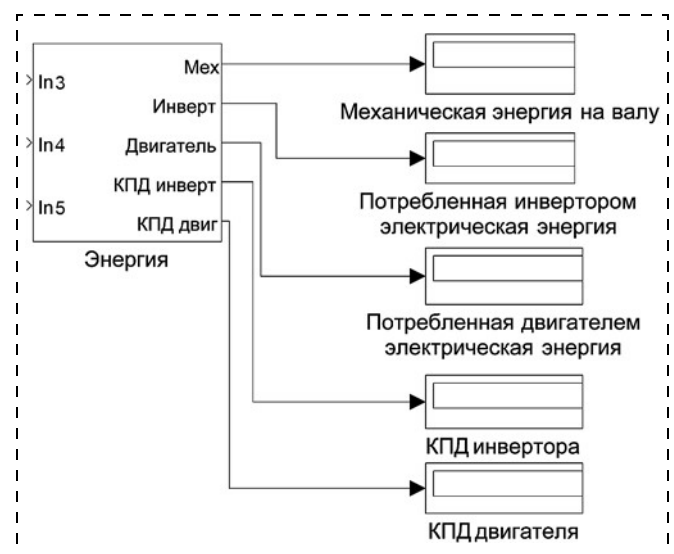


Рис. 5. Блок вычисления потребления электроэнергии тяговым электроприводом



Рис. 6. Блок моделирования движения трамвая

Путем пересчета скорости в км/ч рассчитывается основное удельное сопротивление движению по формуле (2).

Модели асинхронного двигателя и инвертора стандартные и взяты из библиотеки SimPowerSystem. Разработаны отдельные силовые блоки и блоки управления с учетом особенностей схемы управления конкретной марки трамвая.

Результаты моделирования

Проведенное имитационное моделирование в режиме пуска тягового электропривода трамвая и в режиме стабилизации скорости показало адекватность разработанной модели электромеханическим процессам, происходящим в электроприводе трамвая.

Согласно техническим характеристикам трамвая "Спектр" при номинальной нагрузке и напряжении

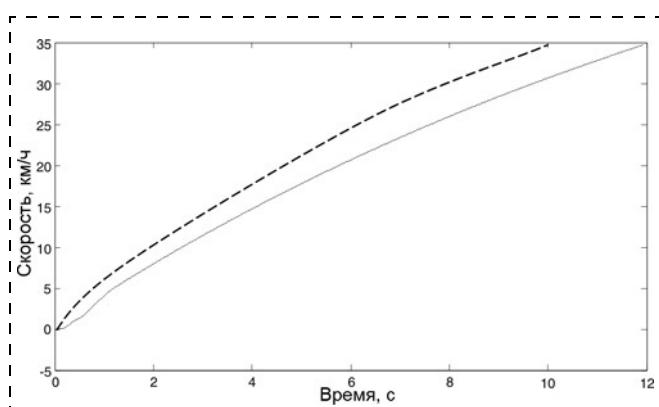


Рис. 7. Моделирование режима разгона при номинальной нагрузке и напряжении на горизонтальном участке: ——— стандартный разгон трамвая "Спектр"; — смоделированный разгон

Сравнение имитационных моделей тягового электропривода трамвая (моделирование пуска до $v_{ном} = 40$ км/ч, $a = const$, 1 тяговый преобразователь с 2 тяговыми электродвигателями)

Тип управления	Энергетические показатели	
	Потребление электроэнергии из тяговой сети — общее (Дж) — на входе тягового инвертора	Потери в инверторе, Дж (статические и динамические) — на основе учета реальных характеристик полупроводниковых элементов
Скалярное управление ($U/f = const$)	$3,453 \cdot 10^5$	2659
ШИМ — 3000 кГц Векторное управление	$3,535 \cdot 10^5$	4200

на горизонтальном участке пути время разгона до скорости 40 км/ч составляет 12 с (дистанция 100 м).

Результаты моделирования разгона представлены на рис. 7.

Отклонение от реальных данных составляет 12,5 %, что допустимо для имитационного моделирования.

Удельный расход электроэнергии на тягу составляет 48,4 Вт · ч/т · км [4].

На основании моделирования (см. таблицу) потребление электроэнергии в течение 12 с пуска составляет $3,453 \cdot 10^5$ Дж, для четырех двигателей при равномерной нагрузке это значение будет в два раза больше — $6,91 \cdot 10^5$ Дж $\approx 0,2$ кВт · ч. С учетом массы наполненного вагона (32,2 т) удельный расход электроэнергии на тягу составляет $200 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / 32,2 \times 0,1 \text{ т} \cdot \text{км} = 62,1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{т} \cdot \text{км}$, что на 22 % отличается от реального удельного расхода электроэнергии на тягу.

Проведено сравнение имитационных моделей тягового электропривода с различными законами управления: скалярным и векторным. Результаты показывают более высокое потребление электроэнергии при векторном управлении, что связано с более высокой частотой работы IGBT-модулей — 5...10 кГц (см. таблицу).

Применение данной модели позволит оценить рассматриваемые параметры тягового преобразователя (тип полупроводниковых элементов, схемы снижения пульсации напряжения и т. д.), сравнить различные алгоритмы управления в зависимости от загрузки подвижного состава, профиля пути, скорости движения.

Совершенствование и апробация данной модели проводится совместно с коллегами из Технического университета Дрездена (транспортный факультет им. Фридриха Листа, каф. "Системы управления движением транспорта") в целях внедрения в симулятор движения электроподвижного состава, разработанного на базе программного комплекса MATLAB [5].

Работа выполнена в рамках договора с Минобрнауки РФ от "12" февраля 2013 г. № 02.G25.31.0004.

Список литературы

1. Бахвалов Ю. А., Зарифьян А. А., Кашников В. Н., Колпакчян П. Г., Плохов Е. М., Янов В. П. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Под ред. Е. М. Плохова. М.: Транспорт, 2001. 286 с.
2. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
3. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
4. Гейзер А. И. Трамвайные вагоны моделей 71-402 и 71-403 с асинхронным приводом производства ФГУП "Уралтрансмаш" // Транспорт Урала. 2005. № 2 (5). С. 46—51.
5. Safin A. R. Selection of Efficient Control Circuits for a Tram Traction Electric Drive on the Basis of Development of a Simulation Model. Russian Electrical Engineering // Allerton Press. 2013. V. 84, № 1. P. 57—61.

A. R. Safin, Associate Professor, sarkazan@bk.ru, R. S. Misbakhov, Associate Professor, V. M. Gureev, Full Professor, Kazan State Power Engineering University

Development of a Rational Structure of Traction Electric Tram in the Simulation Environment of Electric Power Facilities Program MATLAB

We considered the development of a simulation model of tram traction drive with induction motors. Development of a simulation model is executed with the help of the program "Matlab" and SimPowerSystem application. The proposed model allows to calculate the energy performance traction for an electric tram.

SimPowerSystems, as part of Simulink, is considered one of the best packages for the simulation of electrical devices and systems. The purpose of the simulation model is to find out the rational structure of a traction drive with a minimal loss of electricity in a traction inverter and traction motor.

The problem of modeling is to analyze the energy losses in a traction inverter tram in a traction engine cooling system taking into account the different traffic conditions, element base of an inverter and control methods.

Application of this model will allow to assess parameters of the traction converter (type of semiconductor elements, circuits of ripple voltage reduction etc.), to compare different control algorithms depending on the load of the rolling stock, track profile, and speed.

Improvement and validation of this model is carried out together with colleagues from Traffic control systems department of the Technical University of Dresden, with the purpose of introduction of electric rolling motion simulator, based on MATLAB software package.

Keywords: traction, traction inverter, tram, simulation model, energy losses

References

1. Bakhvalov Yu. A., Zarifyan A. A., Kashnikov V. N., Kolpakch'yan P. G., Plokhov E. M., Yanov V. P. Modelirovanie elektromekhanicheskoy sistemy elektrovoza s asinkhronnym tyagovym privodom. Pod red. E. M. Plokhova. M.: Transport, 2001. 286 p.
2. German-Galkin S. G. Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v Matlab 6.0: Uchebnoe posobie. SPb.: KORONA print, 2001. 320 p.
3. Chernykh I. V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink. M.: DМК Press; SPb.: Piter, 2008. 288 p.
4. Geyzer A. I. Tramvaynye vagonny modely 71-402 i 71-403 s asinkhronnym privodom proizvodstva FGUP "Uraltransmash". Transport Urala. 2005. N. 2 (5). P. 46—51.
5. Safin A. R. Selection of Efficient Control Circuits for a Tram Traction Electric Drive on the Basis of Development of a Simulation Model. Russian Electrical Engineering. Allerton Press. 2013. V. 84, N. 1. P. 57—61.

УДК 621.793; 681.587

З. М. Хасанов, д-р техн. наук, проф., zimfirm@list.ru,

О. З. Хасанов, математик — системный программист,

Р. М. Гузаиров, начальник отдела информационной безопасности, управления и информационных технологий, Уфимский государственный авиационный технический университет

Математическая модель движения многосвязных систем электроприводов для технологических процессов электродугового плазменного напыления

Рассмотрены конструкционные решения проектирования прецизионных сложных многосвязных электроприводов для технологического оборудования электродугового плазменного напыления. Представлена математическая модель для оценки основных динамических параметров и характеристик механизмов многосвязных электроприводов.

Ключевые слова: автоматизация, динамика многосвязного движения, кинематическая схема, уравнения Лагранжа II рода, обобщенная координата и ее производные, держатель плазматрона