

ОМСК

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 12 - 10 (27)

2018

ИЦ «ОРКА»

ЭЛЕКТРОННОЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

«Вестник современных исследований»

Выпуск № 12-10 (27) (декабрь, 2018).

ISSN 2541-8300

Сайт: <http://orcacenter.ru/journal>

Издание предназначено для научных и педагогических работников, преподавателей, докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Журнал выпускается по материалам международной научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований».

Информация об опубликованных статьях предоставляется в систему Российского индекса научного цитирования - **РИНЦ** (на основании договора о включении журнала в РИНЦ от 15.02.2017 г. №79-02/2017).

За содержание и достоверность статей ответственность несут авторы. Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых статей. Ответственность за аутентичность и точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы публикуемых статей.

Учредитель и издатель: Научный центр «Орка», 644116, г. Омск, ул. Герцена, 65/1, тел. 8-950-950-21-18, <http://orcacenter.ru>, info@orcacenter.ru

Оглавление

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ.....	8
Агабабян Е.О. Разработка базы данных «Комплексное снабжение ресторанов».....	8
Акопян К.А., Власов А.Е., Колодяжный В.В. Исследование электропривода главного движения универсального токарно-винторезного станка 16к20	12
Акопян К.А., Власов А.Е., Колодяжный В.В. Исследование электропривода гидрокопировального станка модели 16832 в среде Matlab.....	15
Андреева Д.С. Алгоритм оценки стоимости жилых объектов недвижимости с использованием нейросетевого подхода	18
Астапов И.Н., Бедрин И.Г. Анализ эффективности систем противопожарной защиты резервуарных парков.....	21
Аухадеев А.Э., Тухбатуллина Д.И., Егорова П.В., Рашитова Р.А., Староверова У.В. Исследование математических моделей режимов работы тягового электрооборудования электроподвижного состава городского электрического транспорта	25
Бабин В.А. Особенности функционирования оптических беспроводных систем	34
Белова М.Э. Лицензирование опасных производственных объектов.....	39
Белова М.Э. Лицензионно-разрешительная деятельность.....	42
Боровков М.И., Молдованов Д.В., Титова Н.Е. Современные подходы к очистке воды для повторного использования в производстве, например, продуктов питания.....	45
Васильев А.П., Семенов С.К. Исследование антивирусных программ.....	54
Васильев Д.Э., Тасмурзин М.К. Оценка потенциала рекуперативного торможения электрифицированных железных дорог.....	57
Васюта С.Д., Газизов А.Р. Методы обеспечения физической безопасности объектов информатизации.....	61
Веремеев Д.Н., Кислов К.В. Анализ методов синтеза систем управления с использованием нейроконтроллера.....	64
Гаврилов А.Г. Автоматизированная система визуального менеджмента.....	69
Гайнуллин Р.Ф., Захаров В.А., Аксенова Е.А. Создание 2D игры на Unity 3D 5.4	78
Галиев А.Ф. Перспективы использования солнечных панелей для энергообеспечения жилых домов.....	83
Гершкович Ю.Б. Применение роботов для инспекции трубопроводов и цистерн в нефтегазовой промышленности.....	84
Гильмутдинов Д.Я., Чернов М.П. Вибродиагностика оборудования. Методы, периодичность проведения диагностики.....	88
Гильмутдинова К.Р., Демидова А.С. Переосмысление двора: изучение методик проектирования	90
Голикова Т.А. Процессы 3D-печати: достоинства и недостатки	96
Горбунов А.С., Федоров Е.А. К вопросу влияния способа компенсации реактивной мощности в индукционных установках на гармонический состав тока индуктора.....	100
Горбунов А.С., Федоров Е.А. Влияние схем соединения вторичных обмоток фазообразующего трансформатора на величину установленной мощности преобразователя	103

УДК 621.313

Исследование математических моделей режимов работы тягового электрооборудования электроподвижного состава городского электрического транспорта

Аухадеев А.Э., Тухбатуллина Д.И., Егорова П.В., Рашитова Р.А., Староверова У.В.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

В статье проводится обзорно-аналитическое исследование моделей работы тягового электрооборудования электроподвижного состава. Выявлено, что существующие модели и методы их решения проработаны в основном для тяговых расчетов электрической тяги железнодорожного транспорта, что определяет их особую специфику. Полученные результаты позволят определить направления развития методологических основ теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта.

Ключевые слова: тяговое электрооборудование, математическая модель, электроподвижной состав, городской электрический транспорт.

Поиск математических моделей режимов работы тягового электрооборудования электроподвижного состава (ЭПС) городского наземного электрического транспорта (ГЭТ) для их анализа приводит в отрасль магистрального железнодорожного транспорта. Учитывая тот факт, что магистральный транспорт постоянного тока и метрополитен отчасти схож с городским наземным, были проанализированы их математические модели. [1-11 и др.]. Так же, анализировались модели магистрального транспорта переменного тока, т.к. в общем случае после тягового трансформатора и выпрямителя, в большинстве случаев имеется классическая схема ЭПС постоянного тока.

Как представлено в [8] тяговое электрооборудование (ТЭО) ЭПС постоянного тока представляют собой коллекторные машины и имеют щеточные контакты. Связи, налагаемые на токи при коммутации, в общем случае неголономны, поэтому метод уравнений Лагранжа-Максвелла для описания электромагнитных процессов в таких машинах неприменим [12]. В зависимости от целей того или иного исследования, для моделирования процессов в электродвигателях используются два крайних подхода к теории электромеханического преобразования энергии (или их сочетания). Первый - на основе уравнений Максвелла и второй - на основе схем замещения и уравнений Кирхгофа. В работе [10] излагается метод составления уравнений электрических машин с коммутацией в форме «обобщенных» уравнений Маджи на основе уравнений Максвелла. Обобщенными координатами электромагнитной системы являются максвелловские заряды и декартовы координаты точки. Уравнения, характеризующие среду, в которой протекают электромагнитные процессы, играют роль связей. Кроме того, моделирование машин постоянного тока усложняется наличием нелинейных связей, обусловленных насыщением магнитопровода, продольной, поперечной и коммутационной реакциями якоря двигателя, а также наличием вихревых токов. Точно учесть все указанные факторы невозможно [12].

В случае [8] для упрощения уравнений тяговых двигателей применена методика разделения движений А.Н. Тихонова, поскольку длительность переходных процессов, возникающих в момент переключения силовой установки локомотива или изменения профиля пути и описываемых быстрыми переменными, как известно, ничтожна по сравнению с длительностью установившегося режима. Быстрой переменной является ток якоря двигателя во время переходного процесса, а в период установившегося режима изменяется очень медленно и его можно на интервале дискретизации оценивать некоторым установившимся значением I_0 и некоторым приращением ΔI (на малых участках изменение

практически линейно). Постоянную времени для тока, а также выражения для I_0 и ΔI необходимо, таким образом, найти.

Кроме того, длительность этапа коммутации в тяговом двигателе также мала по сравнению с межкоммутационным этапом и практически не оказывает влияния на интегральные величины, такие как значение функционала и переменные состояния динамической системы «поезд» на элементе пути, а также на выбор управления. Поэтому при составлении упрощенной математической модели тягового двигателя достаточно составить уравнения для межкоммутационного этапа, а только что перечисленные величины находить с помощью усредненной величины тока обмотки якоря I .

Теперь обратимся к работе [10], в которой получены следующие дифференциальные уравнения, описывающие динамические процессы в электрической машине постоянного тока в течение межкоммутационного этапа, с помощью метода «обобщенных» уравнений Маджи:

- для вращательного движения якоря машины

$$J\ddot{\varphi} + \sigma\dot{\varphi} - i_b \frac{\partial}{\partial \varphi} \sum_{j=1}^{2N} m(\gamma_j) i_j = 0 \quad (1)$$

- для обмотки возбуждения, уложенной на статоре

$$L_b \frac{di_b}{dt} + R_b i_b - \frac{\partial}{\partial t} \left[\sum_{j=1}^{2N} m(\gamma_j) i_j \right] = 0 \quad (2)$$

- для j -й рамки обмотки якоря

$$\sum_{k=1}^{2N} m_{kj} \frac{dj_k}{dt} + R_j i_j + \frac{\partial}{\partial t} [i_b m(\gamma_j)] = U_j, j \in [1, 2N]; \quad (3)$$

- для внешнего участка цепи якоря

$$R_e i_a = E_a + U_{2N+1}, \quad (4)$$

где J – момент инерции якоря относительно собственной оси вращения, φ – угол поворота якоря, σ – коэффициент сопротивления рашению якоря двигателя, i_a , i_b , i_j – токи якоря, обмотки возбуждения и j -й рамки, $m(\gamma_j)$, m_{kj} – взаимные индуктивности соответственно между j -й рамкой и обмоткой возбуждения и между j -й и k -й рамками, L_b – индуктивность обмотки возбуждения, R_b , R_j – активные сопротивления соответственно обмотки возбуждения и j -й рамки; E_b , E_a , U_j – напряжения, приложенные соответственно к обмотке возбуждения машины, клеммам внешней цепи якоря и к j -й рамке, $2N$ – число полюсов.

Уравнения (1 – 4) составлялись на основе упрощенной расчетной схемы двигателя и некоторых допущений, но с учетом неголономных связей, что невозможно получить методом Лагранжа-Максвелла.

Эти же уравнения можно интегрировать и на этапе коммутации, если выделять короткозамкнутые рамки якоря и учитывать изменение сопротивления в скользящем контакте.

Для задачи определения режимов ведения ЭПС по участку важны, как уже отмечалось, установившиеся после окончания переходных процессов значения быстрых переменных, причем некоторая неточность допустима, если только она не повлияет на устойчивость решения. Также желательно избавиться от необходимости рассмотрения в отдельности каждой рамки обмотки якоря.

Применявшаяся в таких случаях в ряде работ [10, 12, 13] гипотеза о мгновенной коммутации, согласно которой и на основании законов Кирхгофа следует, что

$$i_j = \frac{i_a}{2}; U_j = -\frac{U_{2N+1}}{N}, \quad (5)$$

может привести к значительным погрешностям, так как принимается допущение, что токи в ветвях устанавливаются мгновенно, а связи считаются интегрируемыми. К более точным результатам приводит допущение о том, что коммутация машины хорошо отлажена и за время коммутации ток в короткозамкнутой рамке меняется от значения $i_a/2$ до значения $-i_a/2$ плавно, так что характер этого изменения может быть представлен некоторой аналитической функцией $q(\gamma_j)$. Такое предположение равносильно введению уравнений связей, налагаемых на токи в рамках обмотки якоря [12]:

$$f(\gamma_j) = i_j - \Psi(\gamma_j)i_a = 0 \quad (6)$$

где $j=1,2,\dots,2N$, функция $\Psi(\gamma_j)$ принимает значения $q(\gamma_j)$ и $\pm 1/2$ в зависимости от интервала, но при этом предполагается дифференцируемой достаточное число раз. Эта связь неинтегрируемая инеголономная. С помощью аппарата «обобщенных» уравнений Маджи в [10] получена система дифференциальных уравнений относительно φ, i_b и i_a :

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} + \sigma\dot{\varphi} - \chi i_b i_a = 0 \\ L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + \chi i_b \dot{\varphi} = E_a; \\ L_b \frac{di_b}{dt} + R_b i_b = E_b, \end{cases} \quad (7)$$

где коэффициент χ зависит от конструктивных параметров машины. В привычной форме записи используются соотношения:

$$\begin{cases} \chi i_b i_a = C_m \Phi i_a = M_{вр}; \\ \chi i_b \dot{\varphi} = C_e \Phi \dot{\varphi} = E, \end{cases} \quad (8)$$

где C_e, C_m - электрическая и магнитная постоянные машины;

Φ - магнитный поток;

$M_{вр}$ - вращающий момент;

E - противоЭДС.

С учетом того, что на подвижном составе применяются машины постоянного тока с последовательным возбуждением, система (7) преобразуется в

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = M_{вр} - M_{тр}; \\ L \frac{dI}{dt} + RI + \mu C_e \Phi \omega = U_{дв}. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь ω - угловая скорость вращения колесной пары,

L - индуктивность тягового двигателя,

R - активное сопротивление обмоток машины,

μ - коэффициент передачи тягового привода локомотива,

$U_{дв}$ - напряжение, приложенное к клеммам тягового двигателя, вращающий момент $M_{вр}$ и момент трения $M_{тр}$ здесь приведены к ободу колеса.

Вращающий момент находится по формуле

$$M_{вр} = 0,974 \mu C_e \Phi I \eta_{пр}, \quad (10)$$

где $\eta_{пр}$ - коэффициент полезного действия тягового привода локомотива (0,95. ..0,98).

Момент трения $M_{\text{тр}} = F_k(\varepsilon)r$, где r - радиус катания колесной пары, собственно реализует силу тяги локомотива и зависит от величины проскальзывания колесной пары по рельсам. Этот вопрос требует подробного рассмотрения, и к нему вернемся ниже.

Для зависимости от тока величины $C_e\Phi$ получено регрессионное уравнение

$$C_e\Phi(I) = \frac{d_0\alpha I}{d_1 + d_2\alpha I} \quad (11)$$

где α - коэффициент ослабления магнитного потока.

d_0, d_1, d_2 - коэффициенты.

В [8] для упрощения математической модели силы тяги ЭПС определены постоянные времени таких процессов, как ток якоря ТЭД и проскальзывание колесной пары по рельсам и применена методика разделения движений А.Н. Тихонова на быстрые и медленные составляющие.

В итоге для восьмиосного электровоза постоянного тока определена система дифференциальных уравнений для различных схем соединения тяговых двигателей [8]. Параметр n обозначает вид соединения тяговых электродвигателей: $n=1$ для последовательного (сериесного) соединения ТЭД, $n=2$ - для последовательно-параллельного (сериес-параллельного) соединения, $n=4$ - для параллельного соединения. Исходная система имеет вид:

$$\begin{cases} M(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} = \sum_{j=1}^8 F_k(u_j, v) - W(v); \\ \frac{J}{r} \frac{du_j}{dt} = M_{\text{впр}j} - rF_k(u_j, v) - \frac{J}{rM(1+\gamma)} (\sum_{j=1}^8 F_k(u_j, v) - W(v)); \\ L \frac{di_i}{dt} + RI_i + \mu C_e \Phi \frac{1}{r} \left(v + \frac{n}{8} \sum_{k=1+\frac{8}{n}(i-1)}^{8i/n} u_k \right) = \frac{nU_{\text{кк}}}{8}; \\ j \in [1, 8], j \in [1, n]. \end{cases} \quad (12)$$

В этих же рамках ведется моделирование силы тяги в работе [10]. Так для электровоза постоянного тока, пренебрегая сопротивлением вращению якоря ТЭД, вращающий момент на валу двигателя представлен в виде:

$$M_{\text{в}} = C_m \Phi I \quad (13)$$

где $C_m = 1,6 \times 10^{-10} pN/a$ - конструктивная постоянная тягового двигателя;

Согласно [10, 14], пренебрегая влиянием вихревых токов для режима тяги имеем приближенное равенство:

$$\begin{cases} U_{\partial} \approx R_{\partial} I + E + 1,35 e_{\text{св}} \\ e_{\text{св}} = 2p\sigma w_{\text{в}} \times \frac{10^{-8} d\Phi}{dt} \\ E = \mu v p N \times \frac{10^{-8} \Phi}{\pi D_6 a} \end{cases} \quad (14)$$

здесь μ - передаточное отношение редуктора тяговой передачи;

U_{∂} - приложенное к ТЭД напряжение;

R_{∂} - активное сопротивление обмотки якоря;

D_6 - диаметр бандажа по кругу катания;

E - противоЭДС двигателя;

σ - коэффициент рассеяния главного полюса;

$w_{\text{в}}$ - количество витков обмотки возбуждения;

v - скорость движения локомотива в м/с.

В результате получена систему уравнений для определения магнитного потока, тока якоря и силы тяги ЭПС [10]:

$$\begin{cases} A \frac{d\Phi}{dt} + Bv\Phi + CI_B(\Phi) = cU_{k\epsilon} \\ I = (1 + \rho_2)I_B(\Phi) + \rho_3 \frac{d\Phi}{dt} \\ F_k = k\bar{m}\Phi I \end{cases} \quad (15)$$

При этом коэффициенты определяются следующим образом:

$$\begin{cases} A = k_1 + \rho_1 k_2 + cd\rho_3 R_p; B = 20 \frac{\mu}{D_6} \\ C = r + \rho_1 r_{гп} cd(1 + \rho_2) R_p; k_1 = 2,7 p \sigma w_B \times 10^{-8} \\ r = r_{я} + r_{\partial n} + r_{гп}; \rho_1 = \frac{r_{я} + r_{\partial n}}{R_{ш}}; \rho_2 = \frac{r_{гп}}{R_{ш}}; \rho_3 = \frac{k_2}{R_{ш}} \end{cases}$$

где $r_{я}$ - сопротивление якоря тягового двигателя;

$r_{\partial n}$ - сопротивление обмоток дополнительных полюсов;

$r_{гп}$ - сопротивление обмоток главных полюсов;

$R_{ш}$ - сопротивление шунта; c и d - параметры, зависящие от схемы соединения тяговых двигателей.

Устанавливая соответствие значений $\rho_1, \rho_2, \rho_3, c, d, R_p, R_{ш}$ номерам позиций контроллера, можно, вычислить силу тяги при любой позиции контроллера. Более того, определив напряжение контактной сети $U_k=0$, при $v > 0$ с их помощью можно определить силу, развиваемую при электрическом торможении. Следует отметить, что и в данном случае сила тяги локомотива будет функцией его скорости движения [10].

В работе [11] модель электрической тяги электропоезда метрополитена разделяют на подмодели.

Так для подмодели определения силы тяги одного вагона сила тяги двигателей определяется на основании тяговых характеристик вагона $F(I)$ и уравнения электрической машины постоянного тока с последовательным возбуждением [15-16]:

$$c_e \Phi(I) V + IR = U, \quad (16)$$

где c_e - постоянный коэффициент (постоянная электрической машины), $\frac{B/Tл}{м/с}$;

$\Phi(I)$ - магнитный поток возбуждения, Тл;

I - ток якоря двигателя, А;

R - сопротивление цепи якоря двигателя, Ом;

U - напряжение на двигателе, В.

Такой способ расчета [11, 15-18], в отличие от расчета непосредственно по зависимости силы тяги от скорости поезда, позволяет учесть временные задержки при коммутациях в силовой цепи, потери и изменение напряжения в контактной сети.

В качестве исходных данных в этом случае используются скоростные характеристики двигателей $V_j(I)$ (j - номер ступени ослабления поля, $j=1, \dots, N_j$, N_j - число ступеней ослабления поля), представляемые в табличной форме как массивы V_{ij} и I_{ij} (i - номер точки характеристики, $i=1, \dots, N_i, N_i$ - число точек на каждой скоростной характеристике) [11]. Характеристики магнитного поля на основании уравнения электрической машины рассчитываются по формуле

$$c_e \Phi_{ij} = \frac{U_{ном} - I_{ij} R_j}{V_{ij}}, i = 1, \dots, N_i, j = 1, \dots, N_j, \quad (17)$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение на одном двигателе, В;

$R_j = R_{я} + R_{нд} + K_j R_{нз}$ - сопротивление цепи якоря для j -ой ступени ослабления поля, Ом;

$R_{я}$ - сопротивление обмотки якоря двигателя, Ом;

$R_{нд}$ - сопротивление дополнительных полюсов, Ом;

K_j - коэффициент ослабления поля на u -ой ступени ослабления;

$R_{нз}$ - сопротивление главных полюсов, Ом.

Полученные по формуле (17) характеристики магнитного потока представляются затем в виде кусочно-линейной функции:

$$c_e \Phi_j(I) = a_{ij}^e I + b_{ij}^e, \text{ для } I_{ij} \leq I \leq I_{i+1,j}, j = 1, \dots, N_j, \quad (18)$$

где a_{ij}^e, b_{ij}^e - коэффициенты кусочно-линейной аппроксимации

$$a_{ij}^e = \frac{c_e \Phi_{i,j+1} - c_e \Phi_{ij}}{I_{i,j+1} - I_{ij}}, i = 1, \dots, N_{i-1}, j = 1, \dots, N_j \quad (19)$$

$$b_{ij}^e = c_e \Phi_{ij} - a_{ij}^e I_{ij}, i = 1, \dots, N_{i-1}, j = 1, \dots, N_j, \quad (20)$$

Подставляя аппроксимацию характеристик магнитного потока (18) с коэффициентами (19) и (20) в уравнение электрической машины (17) в [11] определяется величина тока якоря одного двигателя на n -ой позиции реостатного контроллера $I_{я}$ при скорости V как решение системы

$$\begin{cases} I_{я} = \frac{U_{\partial} - b_{ij(n)}^e V}{R_n + a_{ij(n)}^e V}; \\ I_{i,j(n)} \leq I_{я} \leq I_{i+1,j(n)}, \end{cases} \quad (21)$$

где $U_{\partial} = U_c / k_n$ - текущее напряжение на одном двигателе, В,

k_n - число последовательно включенных двигателей на n -ой позиции реостатного контроллера,

U_c - напряжение контактной сети, В

$j(n)$ - номер ступени ослабления поля, включенной на n -ой позиции реостатного контроллера,

$R_n = R_{я} R_{нд} + K_{j(n)} R_{нз} + r_n + r_{\partial}$ - сопротивление цепи якоря двигателя на n -ой позиции реостатного контроллера, Ом;

r_n - приведенное к одному двигателю сопротивление пускового реостата на n -ой позиции реостатного контроллера, Ом;

r_{∂} - дополнительное сопротивление в цепи двигателя (например, при ступенчатом отключении режима тяги), Ом, относительно переменных $I_{я}$ и i (ток якоря и номер участка аппроксимации соответственно).

Сила тяги одного двигателя при известном токе якоря двигателя на n -ой позиции реостатного контроллера в [11] определяется на основании кусочнолинейной аппроксимации

$$F_{\partial}(I_{я,n}) = a_{ij(n)}^f I_{я} + b_{ij(n)}^f \text{ для } I_{ij} \leq I \leq I_{i+1,j}, j = 1, \dots, N_j \quad (22)$$

где a_{ij}^f, b_{ij}^f - коэффициенты аппроксимации, полученные как:

$$a_{ij}^f = \frac{F_{i+1,j} - F_{ij}}{I_{i+1,j} - I_{ij}}, i = 1, \dots, N_{i-1}, j = 1, \dots, N_j \quad (23)$$

$$b_{ij}^f = F_{ij} - a_{ij}^f I_{ij}, i = 1, \dots, N_{i-1}, j = 1, \dots, N_j \quad (24)$$

на основании заданной матрицей F_{ij} табличной зависимости силы тяги одного двигателя от тока якоря. Сила тяги вагона F определяется как:

$$F = n_{\partial} F_{\partial} \quad (25)$$

где n_{∂} - число двигателей вагона, а расход электроэнергии на тягу A (кВт*ч) может быть получен путем решения дифференциального уравнения

$$dA/dS = 10^{-6} n_{\partial} U_{\partial} I_{\partial} / V. \quad (26)$$

Для подмодели определения силы торможения одного вагона в [11] сила торможения B представляет собой сумму сил электрического B_{∂} и пневматического (электропневматического) B_{Π} торможения:

$$B = B_{\partial} + B_{\Pi}. \quad (27)$$

Сила электрического торможения B_{∂} определяется на основании тормозной характеристики двигателя $B(I)$ и уравнения электрической машины постоянного тока с последовательным возбуждением в генераторном режиме

$$c_e \Phi(I) V = IR. \quad (28)$$

Такой способ расчета [11, 15-18], в отличие от расчета непосредственно по зависимости силы тяги от скорости поезда, позволяет проводить расчет для произвольных режимов торможения, а не только для режима «тормоз - автомат», что является единственной возможностью при моделировании силы электрического торможения по зависимости $B(V)$.

Характеристики магнитного потока в тормозном режиме не зависят от режима работы электрической машины, поэтому для расчета тока якоря в тормозном режиме используются зависимости, полученные выше для расчета тяги (16) - (18). Т.к. при торможении на промежуточных позициях реостатного контроллера ослабление поля возбуждения двигателя не используются, в последующие выражения входят лишь коэффициенты аппроксимации характеристики полного поля, и индекс j ослабления поля не проставляется [11].

Подставляя аппроксимацию характеристик магнитного потока (18) с коэффициентами (19) и (20) в уравнение электрической машины (28), в [11] определяют величину тока якоря одного двигателя на n -ой позиции реостатного контроллера $I_{я}$ при торможении на скорости V как решение системы

$$\begin{cases} I_{я} = \frac{b_i^e V}{R_n + a_j^e}; \\ I_j \leq I_{я} I_{i+1}, \end{cases} \quad (29)$$

где $R_n = R_{я} + R_{n\partial} + K_{j(n)} R_{nr} + r_n + r_{\partial}$ - сопротивление цепи якоря двигателя на n -ой позиции реостатного контроллера, Ом; r_n - приведенное к одному двигателю сопротивление пускового реостата на n -ой позиции реостатного контроллера, Ом, относительно переменных $I_{я}$ и i (ток якоря и номер участка аппроксимации соответственно). При отсутствии решения (несовместимости системы (29)), что соответствует срыву возбуждения двигателей, принимается $I_{я} = 0$.

Сила торможения одного двигателя при известном токе якоря двигателя на n -ой позиции реостатного контроллера ($n \neq 1$) определяется на основании кусочно-линейной аппроксимации

$$B_d(I_{я}, n) = a_i^b I_{я} + b_i^b, \text{ для } I_i \leq I \leq I_{i+1}, \quad (30)$$

где a_i^b и b_i^b коэффициенты аппроксимации, полученные, как

$$a_i^b = \frac{F_{i+1} - F_i}{I_{i+1} - I_i}, \quad i = 1, \dots, N - 1, \quad (31)$$

$$b_i^b = F_{ij} - a_i^b I_{ij}, \quad i = 1, \dots, N - 1, \quad (32)$$

на основании заданной матрицей B_i табличной зависимости силы торможения одного двигателя от тока якоря [11].

На 1-ой позиции реостатного контроллера величина тока якоря дополнительно ограничивается тиристорным регулятором магнитного потока возбуждения. Ток якоря при этом (без учета статизма тиристорного регулятора) равен току уставки тиристорного регулятора для текущей загрузки вагона $I_T^1(Q)$ для режима *Тормоз 1*, $I_T^2(Q)$ для режима *Тормоз 1* или *Тормоз 2* [11]. Считая зависимость силы торможения от магнитного потока линейной, можно принять, что на первой позиции реостатного контроллера при работе тиристорного регулятора сила торможения одного двигателя $B_d^1(I_{я}, Q)$ равна

$$B_d^1(I_{я}, Q) = \frac{B_d(I_{я,1})I_T(Q)}{I_{я}}, \quad (33)$$

где $B_d(I_{я}, Q)$ - сила торможения одного двигателя на первой позиции реостатного контроллера при полном поле, определяемая (28);

$I_T(Q)$ -ток уставки тиристорного регулятора для текущего режима.

При этом сила электрического торможения всех двигателей вагона B_{Σ} определяется

$$B_{\Sigma} = n_d B_d \quad (34)$$

Таким образом, в статье проводится обзорно-аналитическое исследование моделей работы тягового электрооборудования электроподвижного состава. При этом в связи с тем, что существующие модели и методы их решения проработаны в основном для тяговых расчетов электрической тяги железнодорожного транспорта существует особая специфика принимаемых допущений и ограничений. Полученные результаты имеют научно-теоретическую значимость и могут быть использованы для определения направления развития методологических основ теории тягового электрооборудования городского электрического транспорта.

Список литературы

1. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда. М.: Транспорт, 1991. - 480 с.
2. Добровольская Э.М. Электропоезда метрополитена. - М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2003. - 320 с.
3. Деев В. В., Ильин Г. И., Афонин Г. С. Тяга поездов. М.: Транспорт, 1987. - 264 с.
4. Бирюков И.В., Рыбников Е.К., Беляев А.И. Тяговые передачи электропод-вижного состава железных дорог. - М.: Транспорт, 1986. - 256 с.
5. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги.-М.: Транспорт, 1983. -256 с.

6. Бакланов А.А. Энергетика движения поезда и нормирование расхода электроэнергии на тягу: дисс. ... канд. техн. наук 05.22.07; ОмИИТ. - Омск, 1988.-220 с.
7. Бакланов А.А. Энергетика движения поезда и нормирование расхода электроэнергии на тягу: дисс. ... канд. техн. наук 05.22.07; ОмИИТ. - Омск, 1988.-220 с.
8. Горбачев А.Н. Методы расчета оптимальных программ ведения поезда: дисс. ... канд. техн. наук 05.22.07; ОмИИТ. - Омск, 2000. - 173 с.
9. Головичер Я.М. Оптимальное управление тяговым подвижным составом в системах автоведения магистральных железных дорог: дисс. ... д-ра техн. наук 05.22.07; МГУПС (МИИТ). - М., 1994. - 298 с.
10. Нехаев В.А. Оптимизация режимов ведения поезда с учетом критериев безопасности движения: Методы и алгоритмы: дисс. ... д-ра техн. наук 05.22.07; ОмИИТ. - Омск, 1999. - 353 с.
11. Васильева М.А. Энергооптимальные режимы управления движением поезда метрополитена: дисс. ... канд. техн. наук 05.13.06; МИИТ. - Москва, 2003. - 182 с.
12. Львович А.Ю. Электромеханические системы. - Л.: ЛГУ, 1989.
13. Марковиченко В.В. Способ учета динамических процессов в поезде при разработке технологии его ведения. // Дисс. ... к.т.н. Омск: ОмИИТ, 1991.
14. Головичер Я.М. Оптимальное управление тяговым подвижным составом в системах автоведения магистральных железных дорог: дисс. ... д-ра техн. наук 05.22.07; МГУПС (МИИТ). - М., 1994. - 298 с.
15. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов/ Под ред. Л. А. Баранова. -М.: Транспорт, 1990.-272 с.
16. Розенфельд В.Е., Палей Д.А. Аналитический метод проведения на ЭЦВМ тягового расчета при заданном времени хода и минимальном расходе электроэнергии. //Вестник ВНИИЖТ.- 1974.-№1-С10-15.
17. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л.А.Баранов, Е.В. Ерофеев, В.И. Астрахан и др./Под ред. Л.А. Баранова. М.гТранспорт, 1984.-298 с.
18. Ерофеев Е.В. Принципы построения системы автоведения поездов метро-политена и пассажирских поездов при электрической тяге: дисс. ... д-ра техн. наук; МИИТ - М., 1985. - 395 с.

© А.Э. Аухадеев, 2018