

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (05.09.03)

УДК 656.212.61.9.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-92-100

Сравнение технических показателей двух серий тепловозов Монгольских железных дорог на основе математического моделирования

Г. Бурэн-Итгэл, В.А. Пречисский, А.А. Барат

Требования быстроты, надежности, безопасности и экономической эффективности грузоперевозок ставят перед Улан-Баторской железной дорогой ряд сложных логистических задач, таких как выбор оптимальной массы поезда, серии и числа секций локомотива для ведения грузового поезда заданного веса. В настоящее время эксплуатируются магистральные локомотивы 2ТЭ116УМ (31 единица, производства РФ), 2ZAGAL (10 единиц, производства Монголии), EVOLUTION (1 единица, производства США), DASH001 (2 единицы, производства США). Двухсекционный локомотив 2ТЭ116УМ, обеспечивающий движение состава массой 4500 тонн, на данный момент соответствует всем предъявляемым Улан-Баторской железной дорогой требованиям. В связи с развивающимися экономическими отношениями между Российской Федерацией и Китаем встают задачи повышения пропускной способности, что ведет к поиску других, более экономически эффективных и одновременно максимально безопасных вариантов перевозок. Для решения поставленных логистических задач планируется введение в эксплуатацию локомотива 2ТЭ10МК, выпускаемого в Казахстане.

Улан-Баторская железная дорога предложила провести сравнительные исследования тяговых свойств и особенностей эксплуатации двух типов тепловозов 2ТЭ116УМ и 2ТЭ10МК с целью целесообразности их использования в условиях грузовых перевозок в Монголии.

Рассмотрена полная математическая модель локомотива, реализованная в Simulink/MATLAB и включающая в себя регулятор мощности тягового генератора, позволяющая исследовать динамические и переходные процессы при переключении позиции контроллера машиниста. На ее основе сравниваются предполагаемые к введению в эксплуатацию локомотивы 2ТЭ116УМ и 2ТЭ10МК.

Ключевые слова: регулятор мощности тягового генератора, тяговый электродвигатель, динамические процессы, локомотивы 2ТЭ116УМ и 2ТЭ10МК, математическое моделирование.

Для цитирования: Бурэн-Итгэл Г., Пречисский В.А., Барат А.А. Сравнение технических показателей двух серий тепловозов Монгольских железных дорог на основе математического моделирования // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 92—100. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-92-100.

Mathematical Modeling-Based Comparison between the Technical Characteristics of Two Diesel Locomotive Series Used in the Mongolian Railways

G. Buren-Itgel, V.A. Prechissky, A.A. Barat

In view of the speed, reliability, safety and cost-effectiveness requirements of cargo transportation, the Ulan Bator Railway faces a number of complex logistical problems, such as choosing the optimal train weight, the series and the number of locomotive units for driving a freight train with a specified weight. Currently, the following main-line locomotives are in operation: 2TE116UM (31 units produced in the Russian Federation), 2ZAGAL (10 units produced in Mongolia), EVOLUTION (1 unit produced in the United States), and DASH001 (2 units produced in the United States). At the moment, a 2TE116UM twin-unit locomotive, which is able to move a 4500-ton train, complies with all requirements posed by the Ulan Bator Railway. At the same time, in view of the developing economic relations between the Russian Federation and China, there are challenges to increase the railroad capacity, which generates the need of searching for other, more cost-effective and at the same time maximally safe haulage options. To achieve the set logistic targets, there are plans to put into operation the 2TE10MK locomotive produced in Kazakhstan.

The Ulan Bator Railway executives proposed to carry out comparative investigations between the traction properties and operation features of two diesel locomotive types: 2TE116UM and 2TE10MK to estimate the expediency of using them under the conditions of cargo transportation in Mongolia.

The article considers the full mathematical model of a locomotive implemented in the Simulink/MATLAB software packages, which includes the traction generator power controller. The developed model enables the user to investigate the dynamic and transient processes triggered in switching the master controller positions. The model is used as a basic tool for comparing the 2TE116UM and 2TE10MK locomotive types that are supposed to be put in operation.

Key words: traction generator power controller, traction electric motor, dynamic processes, 2TE116UM and 2TE10MK locomotives, mathematical modeling.

For citation: Buren-Itgel G., Prechissky V.A., Barat A.A. Mathematical Modeling-Based Comparison between the Technical Characteristics of Two Diesel Locomotive Series Used in the Mongolian Railways. Bulletin of MPEI. 2019;4:92—100. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-92-100.

Введение

Планируемое к 2020 г. резкое повышение транзита товаров из России в Китай и обратно требует переоснащения Улан-Баторской железной дороги (УБЖД). В настоящее время эксплуатируются магистральные локомотивы 2ТЭ116УМ (31 единица, производство РФ), 2ZAGAL (10 единиц, производство Монголия), EVOLUTION (1 единица, производство США), DASH001 (2 единицы, производство США). Для решения поставленных логистических задач планируется введение в эксплуатацию локомотива 2ТЭ10МК, произведённого в Казахстане.

Приведена полная математическая модель, включающая в себя регулятор мощности тягового генератора, переходные процессы в нем (при переключении позиции контроллера машиниста), тяговый электродвигатель и динамические характеристики движения локомотива.

Основные характеристики локомотивов 2ТЭ116УМ и 2ТЭ10МК

Локомотив 2ТЭ10МК представляет собой модернизацию локомотива 2ТЭ10, произведенного в Казахстане по американской технологии. На нем установлен 16-цилиндровый двигатель с электронным впрыском топлива и новой системой охлаждения, что привело к увеличению срока службы тепловоза на 15 лет. Дизель 7FDL представляет собой четырехтактный двигатель с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха, оснащенный системой электронного управления впрыском топлива (EFI). Тепловоз обладает микропроцессорной системой управления BrightStar, позволяющей решить проблему снижения сцепления при боксовании колесных пар, обеспечить защиту ТЭД от перегрева и упростить техническое обслуживание локомотива.

Второй из анализируемых тепловозов 2ТЭ116УМ — модификация локомотива 2ТЭ116, адаптированная для железных дорог Монголии. Результатом модернизации стали удлинение секции с 18,15 до 18,7 м, замена фрикционных гасителей колебаний на гидравлические. Также установлены более мощный дизель-генератор, тиристорная выпрямительная установка М-ТПП-3600ДЛУ2 и более мощные ТЭД-133 (414 кВт). Улучшена система очистки наддувочного воздуха.

Сравнение основных характеристик локомотивов представлено в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики локомотивов 2ТЭ10МК и 2ТЭ116УМ

Оцениваемый параметр	Модель локомотива	
	2ТЭ10МК	2ТЭ116УМ
Дизель	7FDL-16	18-9ДГ-01
ТЭД	ЭД-133	ЭД-133
Генератор	GE ALTERNATOR	ГП-311Б
Осевая формула секции	3о–3о	3о–3о
Мощность по ГТД, кВт	4620	5300
Служебная масса, т	260,4	278
Конструкционная скорость, км/ч	100	100
Скорость длительного режима, км/ч	27,6	27
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	191	195
Запас топлива, т	7300·2	7200·2

Математическая модель микропроцессорной системы управления локомотива

Рассмотрим основные блоки МСУ-ТП [1]. В качестве задатчика позиции контроллера машиниста в системе использован источник ступенчатого сигнала, характеризующийся тремя параметрами:

$$N_{км} = \begin{cases} 0, t < 0; \\ h_1, 0 \leq t < T; \\ h_2, t \leq T, \end{cases}$$

где h_1, h_2 — заданное значение позиции контроллера машиниста; T — время переключения контроллера.

Время обработки, принятое в модели, составляет 90 с, при этом время переключения позиции контроллера с 0 до h_1 и с h_1 на h_2 — 50 с.

В блок задания входят параметры, соответствующие различным позициям контроллера машиниста: $N_{км}$ — позиция контроллера машиниста; n — частота обращения коленчатого вала; I_{max}, U_{max} — ток и напряжение отсечки; $P_{баз}$ — селективная мощность [2]. Указанные данные приведены для двух локомотивов. Отметим, что в модернизированном по американской технологии локомотиве 2ТЭ10МК имеется 8 позиций

переключения контроллера, в то время как в 2ТЭ-116УМ их пятнадцать. Функциональная схема блока задания изображена на рис. 1.

При аппроксимации зависимостей для 2ТЭ10МК следует анализировать три области: с 1 позиции по 3, с 3 по 7 и с 7 по 8. Аппроксимирующие выражения приведены в табл. 2:

Аналогичным образом представим в табл. 3 аппроксимирующие формулы для 2ТЭ116УМ, в которых нелинейность просматривается с 1 по 2 позиции, после чего зависимости аппроксимируются линейной функцией. Приближённые зависимости для оборотов вала генератора для обоих тепловозов даны в табл. 4. Погрешность аппроксимации не превышает 4%, а в среднем составляет около 1%.

Действие блока плавного изменения мощности аналогично действию блока задержки и плавного набора позиции («KM smooth change») с той лишь разницей, что на вход поступает ступенчатый сигнал, и темп набора позиции быстрее, чем в блоке задержки и плавного набора позиции. Впоследствии по этому сигналу формируется значение базовой задающей мощности генератора. В блоке «P 1–3» вычисляются значения мощности по формулам в табл. 2, 3 в зависимости от сигнала приведённой позиции контроллера машиниста. Схема снабжена двумя приборами графической индикации, благодаря которым можно проследить дискретизацию сигнала позиции контроллера и изменения тока, напряжения и мощности в зависимости от входного воздействия.

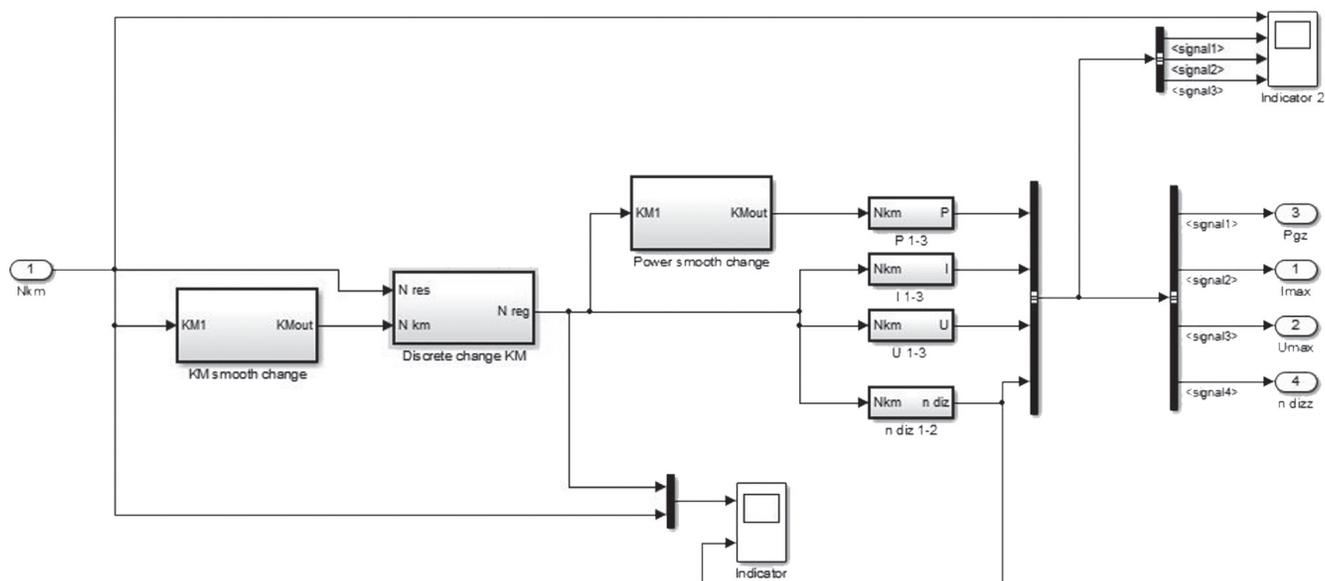


Рис. 1. Функциональная схема блока задания (блок BZ mod)

Таблица 2

Аппроксимирующие выражения для локомотива 2ТЭ10МК

2ТЭ10МК	Позиции		
	1 – 3	4 – 7	8
I_{max}, A	$-60N_k^2 + 820N_k$	$371N_k + 1148$	$475N_k$
U_{max}, B	$-12N_k^2 + 105N_k$	$46N_k + 108$	$62,5N_k$
$P_{баз}, кВт$	$39N_k^2 + 58,4N_k$	$-1,5N_k^2 + 314,5N_k - 338$	$103,75N_k$

Таблица 3

Аппроксимирующие выражения для локомотива 2ТЭ116УМ

2ТЭ116УМ	Позиции	
	1 – 2	3 – 15
I_{max}, A	$-50N_k^2 + 750N_k$	$200N_k + 1000$
U_{max}, B	$-8N_k^2 + 126N_k$	$27,7N_k + 223$
$P_{баз}, кВт$	$61N_k^2 + 23N_k$	$153,3N_k^2 - 39,9$

Таблица 4

Приближённые зависимости для оборотов вала генератора и локомотивов 2ТЭ10МК и 2ТЭ116УМ

Локомотивы	Позиции		
	1 – 2	3 – 7	8
2ТЭ10МК	$170N_k + 362$	959	1046
2ТЭ116УМ	1 – 3	4 – 5	6 – 15
	$120N_k + 230$	$55N_k + 405$	$25,55N_k + 616,7$

Важное структурное звено модели — регулятор мощности тягового генератора. На каждом такте работы происходит вычисление фактической мощности по значениям задающего напряжения на предыдущем такте и силы тока, потребляемой двигателями [3, 4]. Разность мощностей $\Delta P_{\text{факт}}$ подается на релейный элемент, далее, в соответствии с функцией

$$\Delta P_{\text{рЭ}}(\Delta P_{\text{факт}}) = \begin{cases} -K, & \Delta P_{\text{факт}} < -1 \text{ Вт}; \\ 0, & |\Delta P_{\text{факт}}| \leq 1 \text{ Вт}; \\ K, & \Delta P_{\text{факт}} > 1 \text{ Вт}, \end{cases}$$

значение $\Delta P_{\text{рЭ}}$ уходит на интегратор [3]. В случае, если рассогласование мощностей по модулю превышает 1 Вт, на вход интегратора подаётся значение K или $-K$, задающее темп регулирования мощности. Показатель 1 Вт задаёт погрешность определения мощности. Поскольку при повышении напряжения существует опасность превышения напряжения отсечки, то для данной позиции необходимо введение блока коррекции $\Delta P_{\text{рЭ}}$. При достижении указанного значения на вход интегратора подается 0 вместо K . После интегратора в блоке контролируется задающее напряжение генератора по до-

пустимому уровню отсечки. Необходимость в контроле нужна в случае изменения значения отсечки по напряжению (при сбросе позиций), поскольку при этом новое значение отсечки может быть ниже уровня задающего напряжения. В подобных ситуациях в системе контролирующими устройствами U_{limit} и RE1 задающее напряжение генератора плавно понижается до значения новой отсечки по напряжению, и, тем самым, исключается скачкообразное изменение. После всех описанных операций формирования и корректировки задающего значения напряжения генератора полученное значение через элемент памяти RAM участвует в контуре обратной связи по корректировке мощности. Сигнал поступает также на выход блока для участия в дальнейшем регулировании управления электропередачей.

После интегратора задающее напряжение следует проверить, поскольку при сбросе позиций оно может оказаться выше напряжения отсечки. В этом случае выполняется плавное понижение задающего напряжения генератора до новой отсечки. Затем полученное значение задающего напряжения посредством обратной связи участвует в корректировке мощности. Реализация схемы регулятора мощности показана на рис. 2

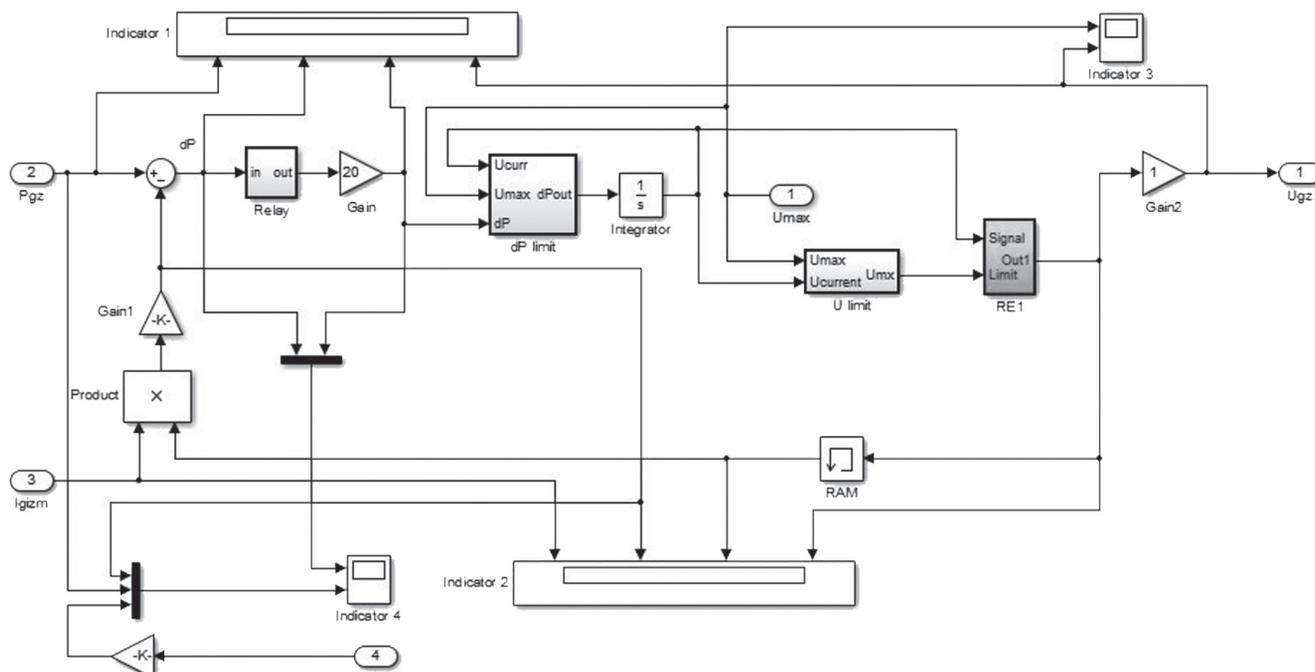


Рис. 2. Модуль управления мощностью Power Control (функциональная схема регулятора мощности)

При регулировании напряжения сравниваются значения потребляемого тока с током отсечки. В случае, если потребляемый ток оказывается больше, задающее напряжение корректируется следующим образом:

$$\Delta U_j = R(I_{\text{r.OC}} - I_{\text{max}}(N_{\text{км}})),$$

где $I_{\text{r.OC}}$ — потребляемый ток; $R = 2$ Ом сохраняет постоянное значение.

Значение ΔU_j , ограниченное 4 В, проходит проверку по отсечке для своей позиции [5]. Это достигается за счет блока RE1, ограничивающего сигнал, поступающий на вход Signal по максимальному значению отсечки, значение которой идет на вход Limit. Напряжение генератора формируется, исходя из величины расхождения задающего и фактического напряжения генератора с помощью пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора). Реа-

лизация схемы контроля напряжения продемонстрирована на рис. 3.

В основу модели тягового электродвигателя (ТЭД) положено дифференциальное уравнения энергетического состояния ТЭД последовательного возбуждения [6, 7]:

$$U = i(R_a + R_b) + e + (L_a + L_b)di/dt, \quad (1)$$

где U — напряжение на ТЭД; i — ток в обмотках; e — противо-ЭДС, наведенная в обмотке якоря; R_a , R_b , L_a , L_b — сопротивления и индуктивности обмоток якоря и возбуждения.

С учетом (1) разработана модель ТЭД, описывающая динамические электромагнитные процессы в его цепях и учитывающая характер нагрузок, а также степень насыщения магнитной цепи при работе на разных режимах:

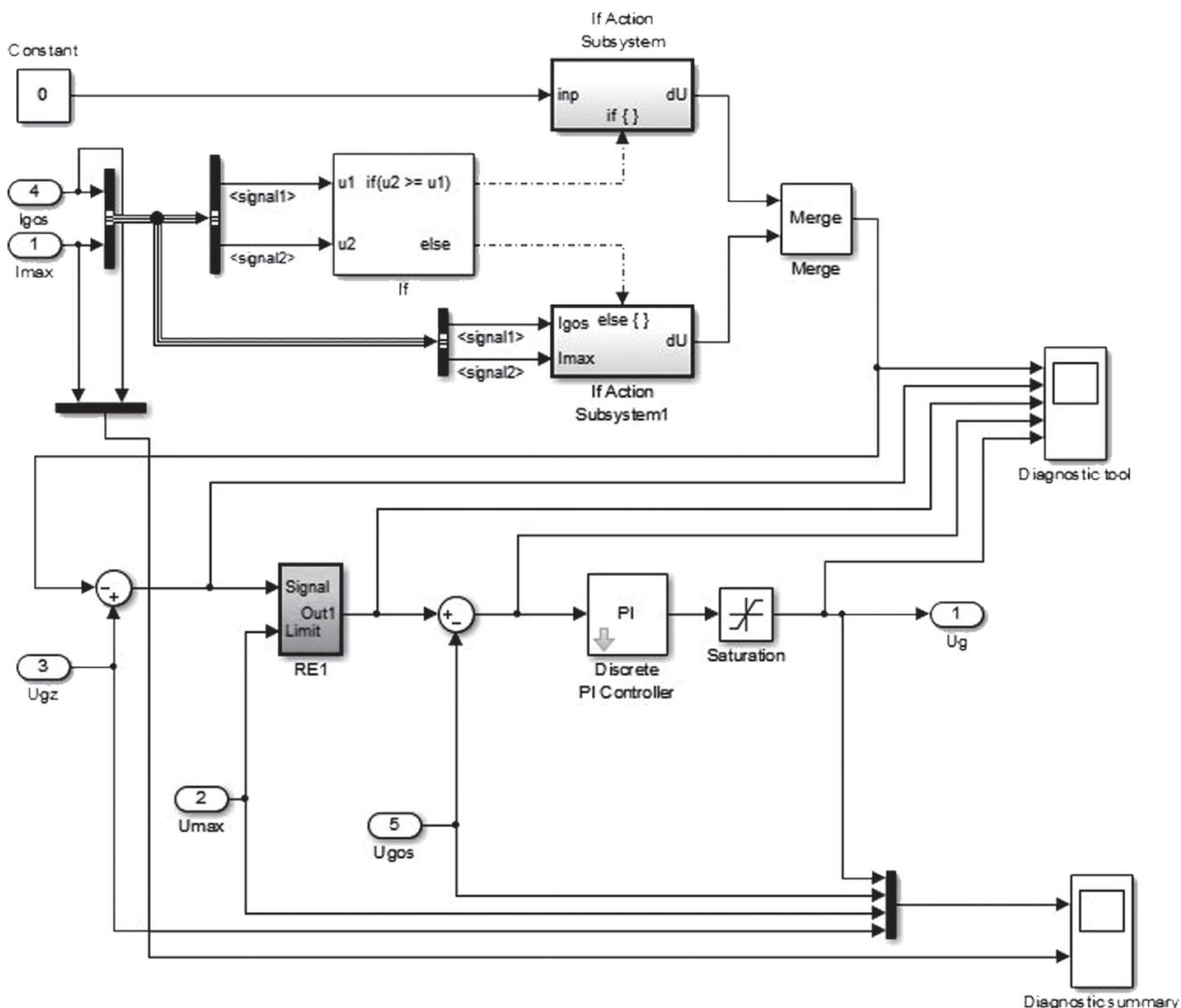


Рис. 3. Модуль управления напряжением Voltage Control (функциональная схема регулятора напряжения)

$$\begin{cases} u_a = i_a R_a + c_e v \Phi + L_a \frac{di_a}{dt}; \\ u_b = i_b R_b + L_b \frac{di_b}{dt}; \\ i = i_a = i_b; \\ L_\mu \frac{d\Phi_1}{dt} = i w_b - 1, 23 r_{\mu 1} \Phi_1 - f(\Phi) + r_{\mu 1} \Phi; \\ i_\mu = f(\Phi), \end{cases} \quad (2)$$

где u_a, u_b — напряжения на обмотках якоря и возбуждения; i_a, i_b, i_μ — токи якоря, возбуждения и их высшие гармонические составляющие; c_e — постоянная ТЭД для определения противо-ЭДС; v — линейная скорость на поверхности якоря; Φ, Φ_1 — полный магнитный поток и первая гармоническая составляющая магнитного потока; $r_{\mu 1}$ — магнитное сопротивление для первой гармонической составляющей потока.

С учетом (2) создана модель ТЭД [6], описывающая динамические электромагнитные процессы в его цепях и учитывающая характер нагрузок, а также степень насыщения магнитной цепи при работе на разных режимах работы. Модель использует блоки задания индуктивностей обмоток якоря $L - a$, возбуждения $L - v$ тягового электродвигателя ЭДУ133 и его характеристику намагничивания F (рис. 4).

Электромагнитный момент двигателя вычисляли по зависимости:

$$M = c_m i \Phi,$$

где c_m — постоянная ТЭД для определения электромагнитного момента

Основу модели решения тяговой задачи составляет дифференциальное уравнение вращения якоря ТЭД:

$$J d\omega/dt = M - M_{\text{сопр}},$$

где J — приведённый момент инерции движущегося поезда к валу ТЭД; ω — угловая скорость вращения якоря; $M_{\text{сопр}}$ — момент сопротивления на валу ТЭД.

Моменты сопротивления и инерции определяли согласно данным [8, 9].

Момент сопротивления, приведенный к валу якоря ТЭД, искали на основании расчета сопротивления движению тепловоза с составом для текущего значения скорости:

$$M_{\text{сопр}} = (W_0 + W'') R_{\text{кол}} \mu \eta,$$

где W_0 — сила сопротивления движению локомотива, $W_0 = (w' + i)P$; W'' — сила сопротивления движению состава, $W'' = (w'' + i)Q$; $R_{\text{кол}}$ — радиус колеса тепловоза, $R_{\text{кол}} = 0,525$ м; μ — передаточное число тягового редуктора, $\mu = 4,12$; η — КПД тягового редуктора, $\eta = 0,975$; i — уклон профиля участка движения; P — масса локомотива, $P = 264$ т; Q — масса состава, $Q = 4000$ т.

Силы сопротивления движению локомотива и состава выражаются эмпирическими зависимостями через их удельные значения.

Для локомотива:

$$w' = 1,9 + 0,01V + 0,0003V^2 \text{ Н/кН};$$

для состава:

$$w'' = 0,7 + [(3 + 0,09V + 0,002V^2)/5] \text{ Н/кН},$$

где V — текущая скорость движения поезда, км/ч.

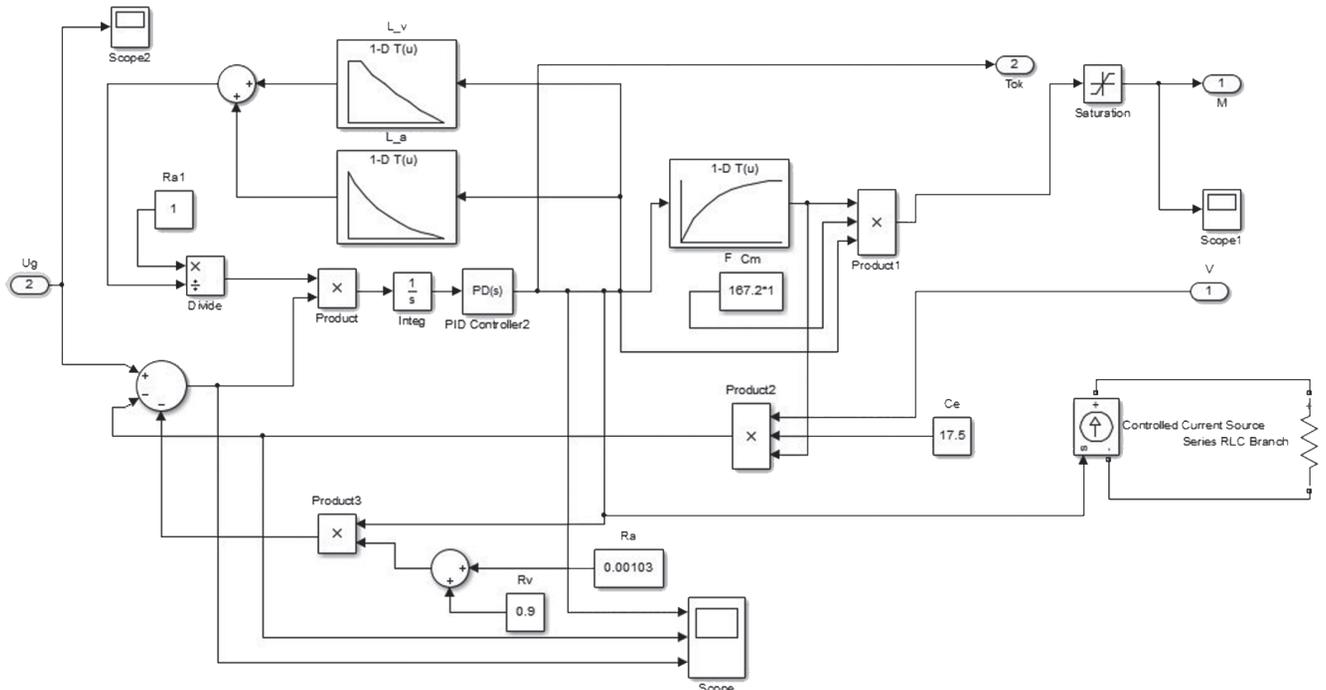


Рис. 4. Модуль динамической модели тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (блок TED1)

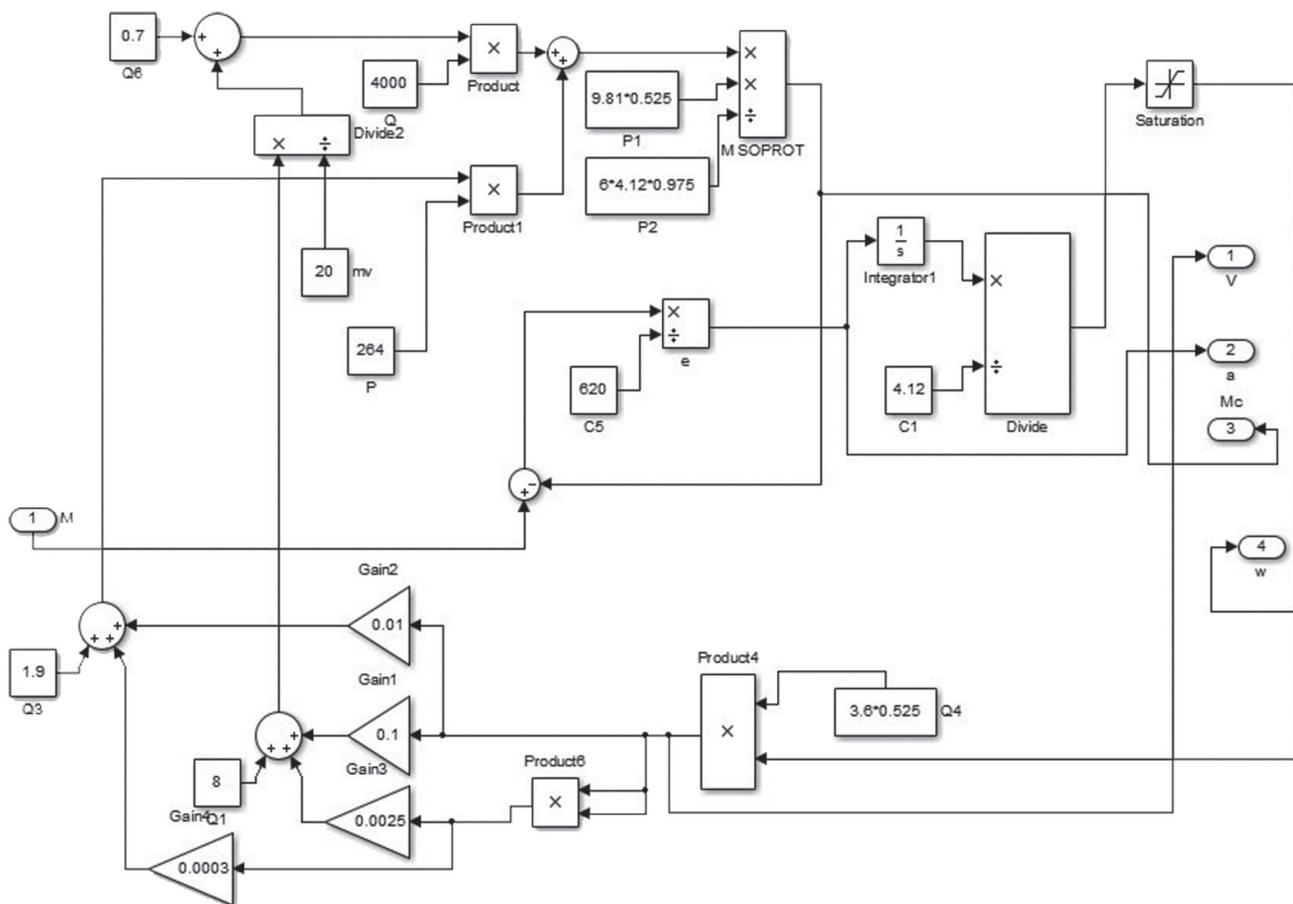


Рис. 5. Модуль динамической модели тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (блок Dinam)

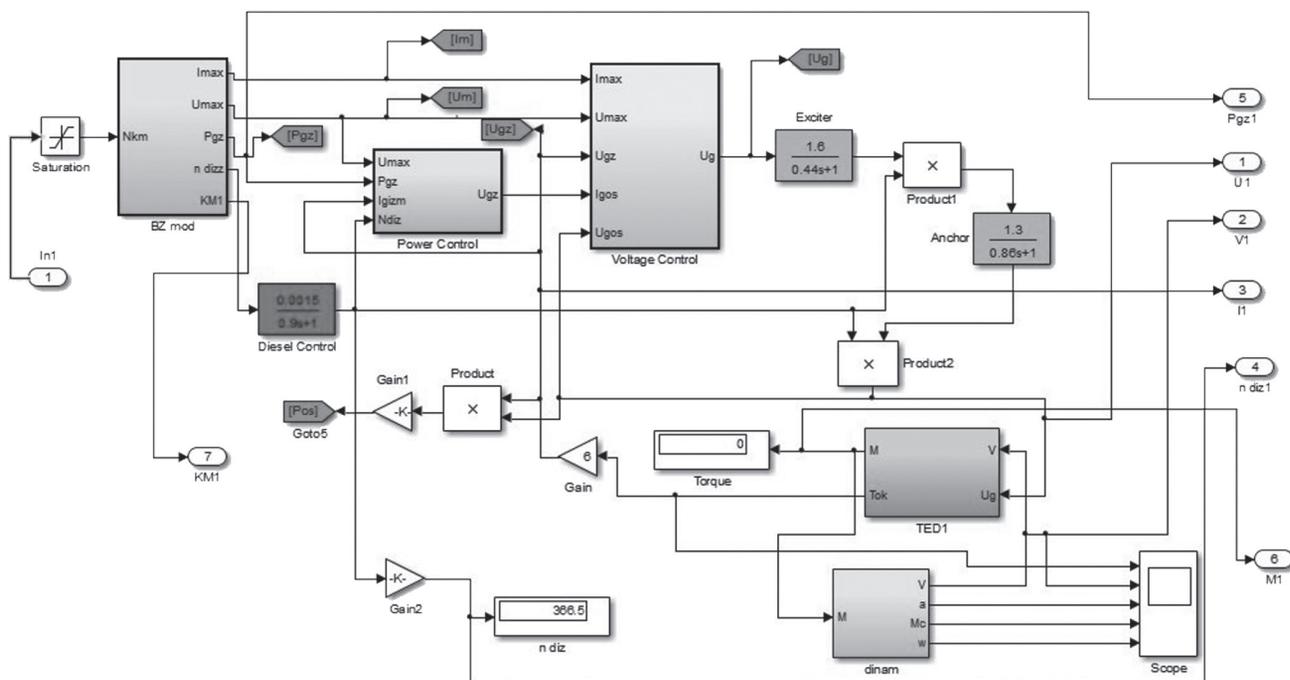


Рис. 6. Общая модель локомотива

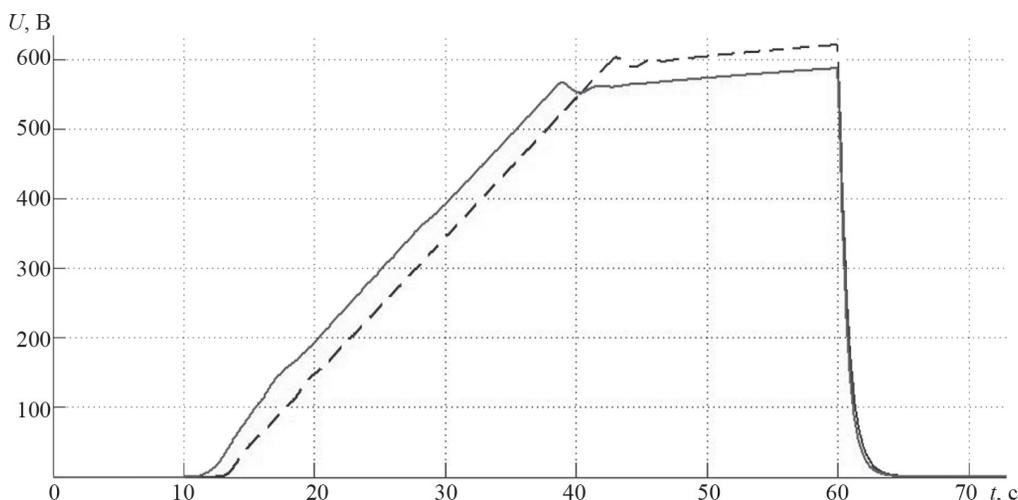


Рис. 7. Результат моделирования напряжения ТЭД локомотивов 2ТЭ116УМ (—) и 2ТЭ10МК (---)

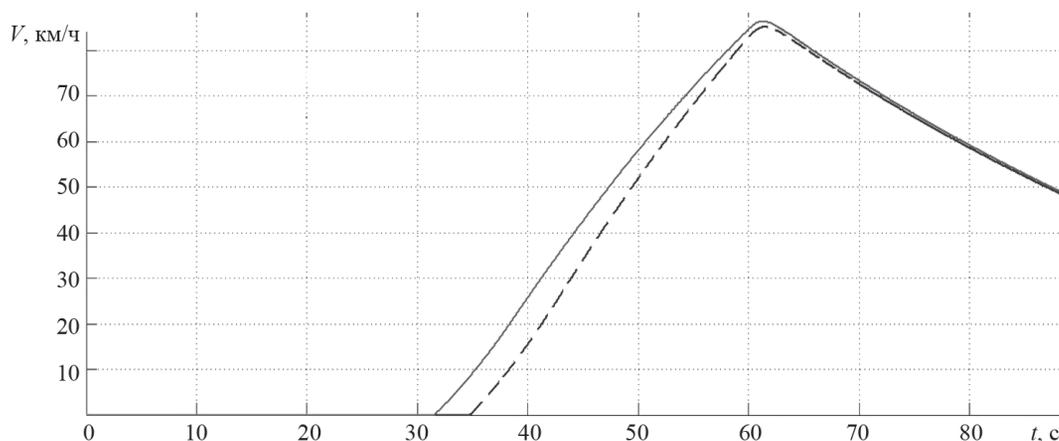


Рис. 8. Результат моделирования скорости локомотивов 2ТЭ116УМ (—) и 2ТЭ10МК (---) при изменении позиции контроллера машиниста

Момент инерции поезда, приведенный к валу ТЭД, определяется из уравнения кинетической энергии движущихся масс системы T_i :

$$J_w^2/2 = \Sigma T_i$$

Для моделирования динамических процессов в энергетической цепи тепловоза с учетом условий сцепления колеса и рельса в приложении Simulink/Matlab разработана комплексная модель системы, показанная на рис. 5.

Общая модель локомотива приведена на рис. 6 и включает в себя блок заданий (BZ mod), модули управления мощностью (Power Control) и напряжением (Voltage Control), модель ТЭД (TED1) и модуль динамической модели тягового двигателя (Dinam).

Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты моделирования напряжения ТЭД при повышении позиции контроллера с первой до макси-

мальной и затем снова до первой продемонстрированы на рис. 7, а итоги моделирования скорости локомотивов на рис. 8.

Заключение

Результаты моделирования напряжения ТЭД при повышении позиции контроллера с первой до максимальной и затем снова до первой показали, что зависимость напряжения 2ТЭ116УМ от времени имеет более высокую производную при начальных позициях контроллера, чем у 2ТЭ10МК. В связи с тем, что мощность тепловоза 2ТЭ116УМ была на 10% снижена ввиду особенностей эксплуатации в Средней Азии (высокие максимальные температуры и низкое атмосферное давление), максимальное значение напряжения ТЭД оказывается ниже. Моделирование скорости локомотивов показало, что перевозочные способности тепловозов 2ТЭ116УМ и 2ТЭ10МК практически одинаковы, а эксплуатационный расход топлива и масла у 2ТЭ10МК для Улан-Баторской железной дороги более предпочтителен.

Литература

References

1. **Пречисский В.А., Мартишин С.А.** Электропередача тепловоза с микропроцессорным управлением. М.: Издат. дом МЭИ, 2008.
2. **Романенко И.Г., Данилов М.И.** Моделирование тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения в замкнутой системе регулирования параметров // Вестник Северо-Кавказского федерального ун-та. 2015. № 2. С. 66—72.
3. **Грищенко А.В. и др.** Микропроцессорные системы автоматического регулирования электропередачи тепловозов. М.: Маршрут, 2004.
4. **Шрайбер М.А.** Моделирование теплового состояния тяговых электродвигателей постоянного тока // Бюллетень результатов научных исследований. 2014. № 4 (13). С. 36—38.
5. **Гордеев И.П., Тарасов Е.М., Балалаев А.Н., Калыкулин А.Н.** Моделирование процессов изменения токов и напряжений в силовых цепях локомотивов при различных состояниях их изоляции // Вестник СамГУПС. 2016. № 1 (31). С. 29—32.
6. **Логинава Е.Ю., Бурэн-Итгэл Г.** Исследование динамических процессов в электроприводе локомотива с использованием Simulink/Matlab // Cloud of Sci. 2015. Т. 2. № 1. С. 87—97 [Электрон ресурс] <http://cloudofscience.ru> (дата обращения 13.04.2018).
7. **Логинава Е.Ю., Коваленко А.В.** Влияние режима работы подвижного состава метрополитена на его энергетические показатели // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 6. С. 21—25.
8. **Логинава Е.Ю., Нурушев Е.Т.** Энергосберегающие технологии в системе городского транспорта // Задачи системного анализа, управления и обработки информации. 2014. Вып. 4. С. 86—89.
9. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в Matlab, Simulink, SimPowerSystems. М., СПб.: ДМК Пресс, Питер, 2008.

1. **Prechisskiy V.A., Martishin S.A.** Elektroperedacha Teplovoza s Mikroprotsessornym Upravleniem. M.: Izdat. Dom MEI, 2008. (in Russian).
2. **Romanenko I.G., Danilov M.I.** Modelirovanie Tyagovogo Dvigatelya Postoyannogo Toka Posledovatel'nogo Vozbuzhdeniya v Zamknoy Sisteme Regulirovaniya Parametrov. Vestnik Severo-Kavkazskogo Federal'nogo Un-ta. 2015.2:66—72. (in Russian).
3. **Grishchenko A.V. i dr.** Mikroprotsessornye Sistemy Avtomaticheskogo Regulirovaniya Elektroperedachi Teplovozov. M.: Marshrut, 2004. (in Russian).
4. **Shrayber M.A.** Modelirovanie Teplovogo Sostoyaniya Tyagovykh Elektrodvigateley Postoyannogo Toka. Byulleten' Rezul'tatov Nauchnykh Issledovaniy. 2014;4 (13):36—38. (in Russian).
5. **Gordeev I.P., Tarasov E.M., Balalaev A.N., Kalyakulin A.N.** Modelirovanie Protsesov Izmeneniya Tokov i Napryazheniy v Silovykh Tsepyakh Lokomotivov pri Razlichnykh Sostoyaniyakh ikh Izolyatsii. Vestnik SamGUPS. 2016;1 (31):29—32. (in Russian).
6. **Loginova E.Yu., Buren-Itgel G.** Issledovanie Dinamicheskikh Protsesov v Elektroprivode Lokomotiva s Ispol'zovaniem Simulink/Matlab. Cloud of Sci. 2015;2;1: 87—97 [Elektron Resurs] <http://cloudofscience.ru> (Data Obrashcheniya 13.04.2018).
7. **Loginova E.Yu., Kovalenko A.V.** Vliyanie Rezhima Raboty Podvizhnogo Sostava Metropolitena na Ego Energeticheskie Pokazateli. Elektronika i Elektrooborudovanie Transporta. 2013;6:21—25. (in Russian).
8. **Loginova E.Yu., Nurushev E.T.** Energoberegayushchie Tekhnologii v Sisteme Gorodskogo Transporta. Zadachi Sistemnogo Analiza, Upravleniya i Obrabotki Informatsii. 2014;4:86—89. (in Russian).
9. **Chernykh I.V.** Modelirovanie Elektrotekhnicheskikh Ustroystv v Matlab, Simulink, SimPowerSystems. M., SPb.: DMK Press, Piter, 2008. (in Russian).

Сведения об авторах:

Бурэн-Итгэл Гантумур (Монголия) — аспирант кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ», e-mail: Itgel_007@mail.ru

Пречисский Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ», e-mail: pretchis@gmail.com

Барат Артём Александрович — старший преподаватель кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: artemsputt@gmail.com

Information about authors:

Buren-Itgel G. (Mongolia) — Ph.D.-student of Electrical Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI, e-mail: Itgel_007@mail.ru

Prechisskiy Vladimir A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electrical Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI, e-mail: pretchis@gmail.com

Barat Artem A. — Senior Lecturer of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: artemsputt@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 14.05.2018

The article received to the editor: 14.05.2018