Моделирование работы тягового двигателя пульсирующего тока

Ю. М. КУЛИНИЧ, С. А. ШУХАРЕВ, Д. Ю. ДРОГОЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС), Хабаровск, 680021, Россия

Аннотация. В работе представлена математическая модель тягового двигателя пульсирующего тока, в которой учтены нелинейный характер кривой намагничивания магнитопровода двигателя, а также влияние вихревых токов на характер протекания переходных процессов. Математические уравнения, описывающие электромагнитные процессы в двигателе, реализованы в модели с помощью пакета прикладных программ MatLab/Simulink. Полученные в результате выполнения программы электрические и механические величины полностью согласуются с соответствующими характеристиками тягового двигателя пульсирующего тока НБ-514, выбранного в качестве объекта моделирования. Это свидетельствует о возможности использования разработанной модели двигателя в других практических приложениях.

Ключевые слова: тяговый двигатель пульсирующего тока; математическая модель; MatLab/Simulink; вихревые токи; магнитная цепь

Введение. При моделировании работы двигателей пульсирующего тока [1] наибольшие сложности связаны с определением структуры магнитной составляющей модели, которая определяет инерционность протекания в двигателе электромагнитных процессов, особенно в переходных процессах при потере и восстановлении питания. В большинстве зарубежных публикаций, например в [2–4], авторы используют упрощенную модель двигателя, в которой не рассматриваются его магнитные характеристики, полагая, что двигатель работает на прямолинейном участке кривой намагничивания. Кроме того, в моделях не учтено влияние на переходной процесс вихревых токов, возникающих в магнитопроводе двигателя.

Магнитопроводы двигателей состоят из электротехнических материалов, обладающих как высокой магнитной проводимостью, так и хорошей электропроводностью. Для таких материалов характерны вихревые токи, возникающие при изменении магнитного потока. Эти процессы в значительной степени влияют на изменение магнитного потока в стали двигателя и, соответственно, на характер протекающих в нем электромагнитных процессов. В настоящее время при моделировании работы двигателя его магнитную цепь с контуром вихревых токов представляют в виде упрощенной схемы [5], состоящей из

двух эквивалентных трансформаторов с последовательно соединенными первичными обмотками. При этом вихревые токи моделируют с помощью двух резисторов, подключенных к вторичным обмоткам этих трансформаторов. Однако такая схема замещения магнитной цепи двигателя является упрощенной и поэтому не позволяет анализировать его работу при быстропротекающих переходных процессах. В силу указанных допущений расчетные кривые токов, напряжений и скорости двигателя существенно отличаются от достоверных.

Математическая модель тягового двигателя пульсирующего тока. Расчетные соотношения для схем замещения. В соответствии с [6] переходные процессы в двигателе пульсирующего тока с последовательным возбуждением следует рассматривать с учетом влияния вихревых токов в его массивном магнитопроводе при нелинейности магнитных характеристик. Расчетные размеры корпуса двигателя показаны на рис. 1.

В [6] установлена основная зависимость намагничивающей силы обмотки возбуждения $F_{\text{ов}}$ для двигателя пульсирующего тока:

$$\begin{cases} 1,23R_{m1}\Phi_1 + L_{\mu}\frac{d\Phi_1}{dt} = F_{\text{ов}} = iw_{\text{ов}}; \\ 5,29R_{m1}(\Phi - \Phi_1) + 0,477L_{\mu}\frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} = F_{\text{ов}} = iw_{\text{ов}}, \end{cases} \quad (1)$$

где R_{m1} — магнитное сопротивление магнитопровода двигателя; Φ_1 — основной магнитный поток двигателя; L_{μ} — магнитная индуктивность; i — ток, протекающий через обмотку возбуждения; $w_{\text{ов}}$ — число витков в обмотке возбуждения; Φ — общий магнитный поток двигателя.

При анализе переходных процессов в двигателе автор [6] аппроксимирует нелинейную магнитную характеристику электрической машины $\Phi = f(F)$ при помощи ломаной линии, состоящей из нескольких прямолинейных отрезков: $0 - a$, $a - b$, $b - c$ и т. д. (рис. 2).

Таким образом, в переходных режимах работы двигателя намагничивающая сила обмотки возбуждения $F_{\text{ов}}$ уравнивается добавочной намагничивающей силой $F_{\text{доб}}$, обусловленной вихревыми токами и нелинейностью магнитных характеристик двигателя. При этом аппроксимируемой кривой

■ E-mail: kulinitich@rambler.ru (Ю. М. Кулинич)

Рис. 1. Расчетные размеры двигателя:

a_j — осевой размер (длина) магнитной части остова, м;
 h_j — толщина магнитопровода, м; l_j — длина средней магнитной силовой линии в остова на один полюс (от оси добавочного полюса до $1/4$ части ширины сердечника главного полюса), м

Fig. 1. Motor design dimensions:

a_j — axial size (length) of the framework magnetic part, m;
 h_j — magnetic circuit thickness, m; l_j — length of the middle magnetic force line in the framework to one pole (from the axis of the commutation pole to $1/4$ of the main pole core width), m

Рис. 2. Аппроксимация кривой намагничивания:

F_{10} и Φ_{10} — намагничивающая сила и магнитный поток в точке a ;
 F_{20} и Φ_{20} — намагничивающая сила и магнитный поток в точке b ;
 F_{30} и Φ_{30} — намагничивающая сила и магнитный поток в точке c

Fig. 2. Approximation of the magnetizing curve:

F_{10} and Φ_{10} — magnetizing force and magnetic flux at point a ;
 F_{20} and Φ_{20} — magnetizing force and magnetic flux at point b ;
 F_{30} and Φ_{30} — magnetizing force and magnetic flux at point c

намагничивания $\Phi = f(F)$ (см. рис. 2) соответствуют три схемы замещения двигателя, описываемые различными системами уравнений, что вызывает определенные сложности при моделировании переходных процессов в электрической машине.

Уточненный метод расчета переходных процессов в тяговом двигателе. В случае если известна аналитическая зависимость между намагничивающей силой F и магнитным потоком Φ в виде $F = f(\Phi)$, то величину добавочной намагничивающей силы $F_{доб}$

при некотором текущем значении Φ можно рассчитать как

$$F_{доб} = R_m \Phi = \frac{dF}{d\Phi} \Phi, \quad (2)$$

где R_m — дифференциальное сопротивление кривой $F = f(\Phi)$.

Это выражение относится к расчету как линейной, так и нелинейной части кривой намагничивания. Вычисление значений производной $dF/d\Phi$ в формуле (2) было выполнено методом графического дифференцирования обратной кривой намагничивания $F = f(\Phi)$. В этом случае выражение (2) для i -го значения магнитного потока Φ_i имеет вид

$$F_{доб i} = \frac{\Delta F_i}{\Delta \Phi_i} \Phi_i, \quad (3)$$

где ΔF_i и $\Delta \Phi_i$ — приращения намагничивающей силы и магнитного потока соответственно.

Таким образом, в соответствии с вышеизложенными предложениями, а также с учетом падения магнитного напряжения в стержнях магнитопровода двигателя система уравнений (1), описывающих электромагнитные процессы в двигателе, принимает вид

$$\begin{cases} 1,23 R_{m1} \Phi_1 + L_\mu \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi \frac{dF}{d\Phi} - R_{m1} \Phi = F_{ов} = i_{w_{ов}}; \\ 5,29 R_{m1} (\Phi - \Phi_1) + 0,477 L_\mu \frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} + \\ + \Phi \frac{dF}{d\Phi} - R_{m1} \Phi = F_{ов}. \end{cases} \quad (4)$$

Полученные для моделирования в среде MatLab уравнения имеют более компактный вид и позволяют более точно моделировать переходные процессы в двигателе пульсирующего тока, не прибегая к упрощениям, связанным с линеаризацией кривой намагничивания электрической машины.

Согласно [7, 8] можно составить следующие уравнения электрического равновесия падений напряжения U_d и электродвижущей силы (ЭДС) цепи двигателя пульсирующего тока в переходном режиме:

$$U_d = E_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + R_{ш} i_{ш}; \quad (5)$$

$$R_{ш} i_{ш} = L_b \frac{di}{dt} + R_b i; \quad (6)$$

$$i_a = i + i_{ш}, \quad (7)$$

где E_a — электродвижущая сила; R_a , L_a — активное сопротивление и индуктивность якоря соответственно; R_b , L_b — активное сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения соответственно; $R_{ш}$ — сопротивление шунтирующего резистора; i_a — ток якоря; i — ток обмотки возбуждения; $i_{ш}$ — ток шунтирующего резистора.

Действие вихревых токов в магнитопроводе двигателя учитывают в соответствии с уравнениями (4).

Электрическая составляющая математической модели двигателя дополнена уравнением механического равновесия его вращающего момента M и противодействующих моментов в переходном режиме, которое имеет вид

$$M = T + J \frac{d\Omega}{dt} + b\Omega, \quad (8)$$

где T — момент нагрузки на валу двигателя; J — момент инерции ротора двигателя; b — коэффициент трения механической системы; Ω — угловая скорость вращения вала двигателя [9].

Электродвижущая сила E_a и вращающий момент M , развиваемый двигателем, рассчитывают как $E_a = C_E \Phi \Omega$, $M = C_M \Phi i_a$. Конструктивные постоянные коэффициенты для электродвижущей силы C_E и электромагнитного момента C_M равны между собой: $C_E = C_M$.

При разработке структурной схемы модели двигателя используют уравнения (4)–(7). Система этих уравнений для электрической части модели в удобной для реализации форме имеет вид

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} \left(U_d - C_E \Phi \Omega - i_a R_a - i R_b - L_b \frac{di}{dt} \right), \quad (9)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_b} (i_{ш} R_{ш} - i R_b), \quad (10)$$

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{1}{L_\mu} \left(i w_{ов} - 1,23 R_{m1} \Phi_1 - \Phi \frac{dF}{d\Phi} + R_{m1} \Phi \right), \quad (11)$$

$$\frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} = \frac{1}{0,477 L_\mu} \left(i w_{ов} - 5,29 R_{m1} (\Phi - \Phi_1) - \Phi \frac{dF}{d\Phi} + R_{m1} \Phi \right). \quad (12)$$

Уравнение механической составляющей математической модели (8) решают относительно производной угловой скорости Ω :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - T - b\Omega). \quad (13)$$

Моделирование работы тягового двигателя пульсирующего тока. Разработанная математическая модель двигателя пульсирующего тока реализована в среде проектирования MatLab/Simulink [10] и показана на рис. 3.

На рис. 3, *а* представлена левая часть математической модели, относящаяся к моделированию электрической цепи тока якоря двигателя. Напряжение питания двигателя U_d (на рис. 3, *а* обозначено как U_d) поступает на вход схемы от соответствующего источника ступенчатого напряжения U_d . Значение тока якоря i_a (на рис. 3, *а* обозначено как I_a) формируется на выходе интегратора Integrator_1.

На рис. 3, *б* представлена правая часть математической модели, относящаяся к моделированию

магнитной части двигателя, реализованная в соответствии с выражениями (11) и (12). Сигнал основного магнитного потока Φ_1 (на рис. 3, *б* обозначен как MP) формируется на выходе интегратора Integrator_3 в результате решения уравнения (11), сигнал высших гармоник магнитного потока $(\Phi - \Phi_1)$ образуется на выходе блока Integrator_4 путем интегрирования правой части уравнения (12).

Сигнал производной полного магнитного потока $d\Phi/dt$ формируется на выходе сумматора SUM_15 путем сложения значений $d\Phi_1/dt$ и $d(\Phi - \Phi_1)/dt$, полученных в результате решения правых частей уравнений (11) и (12). При этом коэффициенты усиления усилителей Kt_1 и Kt_2 схемы равны соответствующим коэффициентам $1/L_\mu$ и $1/0,477 L_\mu$ в правой части уравнений (11) и (12). Полученное значение $d\Phi/dt$ использовано в верхней части рис. 3, *а* при расчете падения напряжения в индуктивности обмотки возбуждения L_b , вычисляемого по формуле

$$u_{L_b} = L_b \frac{di}{dt} = w_{ов} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (14)$$

Сигнал основного полного магнитного потока Φ формируется на выходе сумматора SUM_16 в результате сложения входных сигналов Φ_1 и $(\Phi - \Phi_1)$.

Сигнал тока намагничивания $i_\mu \approx i$ двигателя образуется на выходе блока преобразования, обозначенного на рис. 3, *б* как $I_u = f(MP)$. В этом блоке реализована обратная характеристика кривой намагничивания двигателя $\Phi = f(I_\mu)$. С помощью этого блока формируются значения тока i_μ в зависимости от поступающего на его вход сигнала полного магнитного потока Φ . Блок преобразования $1/MP = f(I_u)$ рассчитывает обратные значения магнитного потока $1/\Phi$ в зависимости от входного сигнала тока намагничивания i_μ . С помощью этого блока и перемножителя Product_8 вычисляют значения магнитного сопротивления двигателя по формуле

$$R_{m1} = \frac{F_b}{\Phi_1} \approx \frac{i w_{ов}}{\Phi}. \quad (15)$$

Полученное значение R_{m1} используют при определении магнитного сопротивления для основного магнитного потока $1,23 R_{m1}$ и магнитного потока высших гармоник $5,29 R_{m1}$. Эти значения получают с применением усилителей, обозначенных на схеме как Gain_1 и Gain_2, они формируются на выходе соответствующих перемножителей Product_4 и Product_5.

С помощью блока преобразования $dF/dMP = f(MP)$ и перемножителя Product_7 вычисляется добавочная намагничивающая сила в соответствии с выражением (3), сигнал которой поступает на отрицательные входы сумматоров SUM_11 и SUM_12.

В нижней части рис. 3, *а* представлена механическая часть модели двигателя. В соответствии

Рис. 3. Модель тягового двигателя пульсирующего тока:

a — левая часть математической модели; b — правая часть математической модели; $[A]$ – $[C]$ — межсхемные соединители

Fig. 3. Model of the undulated-current traction motor:

a — left side of mathematical model; $\bar{o}$ — right side of mathematical model; $[A]$ – $[C]$ — intercircuit connectors

с выражением (13) для производной угловой скорости Ω на выходе усилителя C_m формируется сигнал крутящего момента двигателя M . На вход усилителя C_m с выхода перемножителя $Product_2$ поступает сигнал произведения сигналов тока якоря I_a и магнитного потока MP . С помощью константы M_s задается момент нагрузки на валу двигателя. Усилители b и $1/J$ задают соответствующие механические характеристики двигателя. Сигнал угловой скорости вращения двигателя Ω формируется на выходе интегратора $Integrator_2$.

Сигнал ЭДС формируется на выходе перемножителя $Product_3$ в результате умножения сигнала угловой скорости Ω с выхода $Integrator_2$ на величину сигнала $C_E\Phi$, получаемого на выходе усилителя C_e .

Таким образом, в представленной модели двигателя объединены его электрическая и механическая составляющие. В частности, ЭДС двигателя в электрической части модели определяется его угловой скоростью Ω , рассчитанной в механической части. С другой стороны, крутящий момент двигателя M зависит от значения тока якоря I_a , полученного в электрической части модели. Кроме того, приведенные выше расчетные формулы позволяют учесть в модели влияние вихревых токов в магнитопроводе двигателя.

Благодаря принятой конфигурации разработанная математическая модель достаточно точно отображает электромагнитные процессы, происходящие в двигателе. Это особенно важно при описании работы двигателя в переходных режимах, в частности при его пуске и остановке.

Результаты математического моделирования. На рис. 4 представлена кривая затухания ЭДС двигателя НБ-514, вычисленная с помощью разработанной математической модели в сравнении с экспериментальной кривой.

Кривые получены в процессе затухания ЭДС после выключения двигателя. Кривая 1 соответствует экспериментальным данным, приведенным в [11], кривая 2 получена в результате математического моделирования. Выключение двигателя происходит при токе двигателя 780 А при начальном значении ЭДС $E = 525$ В.

Рассчитанная в результате моделирования зависимость затухания ЭДС согласуется с основными положениями теории электрических цепей. Известно, что продолжительность переходного процесса $t_{пер}$ в электрической цепи зависит от постоянной времени τ и определяется как $t_{пер} \approx 3\tau$. Для двигателя пульсирующего тока величину τ вычисляют в соответствии с выражением

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{L_a + L_b}{r_a + r_{дп} + r_{ко} + r_b \parallel r_{ш}} = \frac{0,00215}{0,031294} = 0,0687 \text{ с.} \quad (16)$$

Числитель формулы (16) определяется суммарным значением индуктивностей, включенных в цепь

Рис. 4. Сравнение результатов математического моделирования: 1 — кривая, построенная по экспериментальным данным; 2 — кривая, построенная методом математического моделирования

Fig. 4. Comparison of the mathematical modeling results: 1 — curve based on the experimental data; 2 — curve made using the mathematical modeling method

двигателя, а знаменатель — суммарным активным сопротивлением обмоток якоря r_a , дополнительных полюсов $r_{дп}$, компенсационной обмотки $r_{ко}$, а также сопротивлением параллельно включенных обмотки возбуждения r_b и шунтирующего сопротивления $r_{ш}$. Значение $t_{пер} = 3 \cdot 0,0687 = 0,206$ с соответствует характеру кривой затухания ЭДС (рис. 4, кривая 2). Отличие значения $t_{пер} = 0,206$ с от полученной в результате моделирования величины $t_{пер} = 0,16$ с объясняется тем, что при расчете по формуле (16) не учитывается динамическая индуктивность обмоток якоря и возбуждения. При моделировании работы двигателя с последовательно включенным сглаживающим реактором длительность переходного процесса увеличивается. Установлено, что при параметрах сглаживающего реактора $L_{ср} = 5$ мГн и $r_{ср} = 0,0068$ Ом [12] постоянная времени составит

$$\tau' = \frac{L}{R} = \frac{L_a + L_b + L_{ср}}{r_a + r_{дп} + r_{ко} + r_b \parallel r_{ш} + r_{ср}} = \frac{0,00715}{0,03809} = 0,1877 \text{ с}$$

и время переходного процесса увеличится до

$$\tau'_{пер} = 3\tau' = 3 \cdot 0,1877 = 0,5631 \text{ с.}$$

Из рис. 4 следует, что характер изменения кривой 2 повторяет форму экспериментальной кривой 1. Для объективного определения сходимости этих кривых рассчитана их корреляционная зависимость. В качестве показателя адекватности модели выбран коэффициент детерминации R^2 [13]. Согласно расчетам, выполненным в программной среде MS Excel, коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,976$, что свидетельствует об адекватности разработанной модели электромагнитным процессам, происходящим в двигателе.

Заключение. Разработана математическая модель тягового двигателя пульсирующего тока, в которой учтены нелинейный характер кривой намагничивания

магнитопровода двигателя и влияние вихревых токов на характер протекания переходных процессов. Модель в полной мере отражает происходящие в двигателе электромагнитные процессы. Полученная характеристика затухания для конкретного режима работы электродвигателя согласуется с экспериментальными данными и свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

Предлагаемая модель двигателя позволяет исследовать его работу как в статических, стационарных, так и в переходных режимах, в частности при его пуске и остановке, при потере и восстановлении питания. Предложенная математическая модель дает возможность проектировать двигатель пульсирующего тока с заданными эксплуатационными характеристиками, а также изучить влияние параметров двигателя на его энергетические показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихменев Б. Н., Кучумов В. А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. М.: Транспорт, 1988. 312 с.
2. Bitara Z., Jabia S., Khamisb I. Modeling and simulation of series DC motors in electric car // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 50. No. 50. P. 460–470.
3. Dash B., Vasudevan V. Simulink based interactive interface for a DC engine with PI controller // *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2011. Vol. 2. No. 12. P. 1–5.
4. Kaur M., Kaur M. Different controllers for position control of DC motor — a review // *International Journal of Electrical and Electronics Research*. 2015. Vol. 3. No. 4. P. 128–132.
5. Плакс А. В., Изварин М. Ю. Параметры коллекторных тяговых электродвигателей при моделировании переходных процессов в цепях электровозов // *Вестник ВЭЛНИИ*. 2004. № 1. С. 112–118.
6. Жиц М. З. Переходные процессы в машинах постоянного тока. М.: Энергия, 1974. 112 с.

7. Проектирование тяговых электрических машин: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / М. Д. Находкин [и др.]. М.: Транспорт, 1976. 624 с.

8. Кулинич Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения. Хабаровск: ДВГУПС, 2001. 153 с.

9. Ahmed A. S., Bari M. F., Shahjahan M. Speed control of DC motor with FZ-D controller. 3rd International conference on electrical information and communication technology (EICT), 7–9 December. Bangladesh: Khulna, 2017. 6 p.

10. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории проводниковых систем в среде MatLab-Simulink. СПб.: Лань, 2013. 443 с.

11. Плис В. И. Комбинированная адаптивная система регулирования тока тягового электродвигателя с воздействием по возмущению и отклонению: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. М.: МИИТ, 1997. 21 с.

12. Тушканов Б. А., Пушкарев Н. Г., Позднякова Л. А. Электровоз ВЛ85: руководство по эксплуатации. М.: Транспорт, 1992. 480 с.

13. Домбровский В. В. Эконометрика [Электронный ресурс]. Томск: ТГУ, 2016. URL: <http://sun.tsu.ru/mminfo/2016/Dombrovski/start.htm> (дата обращения 12.05.2019 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КУЛИНИЧ Юрий Михайлович,

д-р техн. наук, профессор,

кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО ДВГУПС

ШУХАРЕВ Сергей Анатольевич,

канд. техн. наук, старший преподаватель,

кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО ДВГУПС

ДРОГОЛОВ Денис Юрьевич,

аспирант, преподаватель,

кафедра «Транспорт железных дорог», ФГБОУ ВО ДВГУПС

Статья поступила в редакцию 28.06.2019 г., актуализирована 25.08.2019 г., принята к публикации 15.10.2019 г.

Simulation of the pulsating current traction motor

Yu. M. KULINICH, S. A. SHUKHAREV, D. Yu. DROGOLOV

Far Eastern State Transport University (FESTU), Khabarovsk, 680021, Russia

Abstract. Design and improvement of traction electric engines ensuring reduction of the railway transportation power consumption is a current long-term objective. The objective is to develop technical requirements to the new electric engines, including implementation of the set haulage performance of locomotive, providing for constant power in the certain range of the running speed, as well as required properties in case of the supply network parameters change, selection of the weight and dimensions parameters ensuring fitting of the traction electric engines in the locomotive underframe, and other important tasks.

The new technology is proposed for forecasting the engine properties using simulation modeling of the hauling features and electrical characteristics of engine in order to resolve the above mentioned objectives. The proposed pulsating current traction motor model takes into account the eddy currents effect on the processes of magnetic flux changes in the engine steel and the nature of electromagnetic processes in the engine. Electric com-

ponent of the engine simulation model is added with the torque mechanical balance equation that allows assessing its operating properties to the full extent.

Results of calculations are presented in the form of the engine electromotive force attenuation curve calculated for specific mode of operation at the armature current of 780 A and the initial value of electromotive force amounting to 525 V. Obtained parameter of attenuation correlates with the experimental data presented in the other information source. Value of determination factor between the specified curves certifies adequacy of the developed simulation model.

Proposed model of engine and methodology of its design allows modeling its operation in transition and in static modes of operation. Engine properties obtained by means of the proposed simulation model $n = f(i_a)$ and $M = f(i_a)$ are almost similar to the properties of traction engine NB-514 in the entire range of the armature current change i_a .

Proposed simulation model allows designing pulsating current traction motor with the set operating properties, as well as studying the engine parameters effect on its energy indicators.

Keywords: pulsating current traction motor; mathematical model; MatLab/Simulink; eddy current; magnetic system

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-313-319>

REFERENCES

1. Tikhmenev B. N., Kuchumov V. A. *Elektrovozy peremennogo toka s tiristornymi preobrazovatelyami* [AC electric locomotives with thyristor transducers]. Moscow, Transport Publ., 1988, 312 p.
2. Bitara Z., Al Jabia S., Khamis I. *Modeling and simulation of series DC motors in electric car*. Energy Procedia, 2014, Vol. 50, no. 50, pp. 460–470.
3. Dash B., Vasudevan V. *Simulink based interactive interface for a DC engine with PI controller*. International journal of scientific and engineering research, 2011, Vol. 2, no. 12, pp. 1–5.
4. Kaur M., Kaur M. *Different controllers for position control of DC motor — a review*. International journal of electrical and electronics research, 2015, Vol. 3, no. 4, pp. 128–132.
5. Plaks A. V., Izvarin M. Yu. *Parametry kollektornykh tyagovykh elektrodvigatelyey pri modelirovanii perekhodnykh protsessov v tsepyakh elektrovovozov* [Parameters of commutator traction electric engines when modeling transition processes in the electric locomotive circuits]. Vestnik VELNII, 2004, no. 1, pp. 112–118.
6. Zhits M. Z. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh postoyannogo toka* [Transition processes in the DC machines]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 112 p.
7. Nakhodkin M. D., Vasilenko G. V., Bocharov V. I., Kozorev M. A. *Proyektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin. Ucheb. posobiye dlya vuzov zh.-d. transp.* [Design of hauling electric machines. Textbook for higher schools of railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1976, 624 p.
8. Kulnich Yu. M. *Adaptivnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya gibridnogo kompensatora reaktivnoy moshchnosti elektrovoza s plynym regulirovaniyem napryazheniya* [Adaptive system of automatic control of electric locomotive reactance capacity hybrid compensator with variable voltage control]. Khabarovsk, FESTU, 2001, 153 p.

■ E-mail: kulinitich@rambler.ru (Yu. M. Kulnich)

9. Ahmed A. S., Bari M. F., Shahjahan M. *Speed control of DC motor with FZ-D controller*. 3rd International conference on electrical information and communication technology (EICT), 7–9 December, Bangladesh, Khulna, 2017, 6 p.

10. German-Galkin S. G. *Virtual'nyye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v srede MatLab-Simulink* [Virtual laboratories of semiconductor systems in MatLab-Simulink environment]. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2013, 443 p.

11. Plis V. I. *Kombinirovannaya adaptivnaya sistema regulirovaniya toka tyagovogo elektrodvigatelya s vozdeystviyem po vozmushcheniyu i otkloneniyu*. Kand. tekhn. nauk. diss. [Combined adaptive system of the traction electric engine current regulation affecting feedforward and feedback. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, Moscow State University of Railway Engineering, 1997, 21 p.

12. Tushkanov B. A., Pushkarev N. G., Pozdnyakova L. A. *Elektrovovoz VL85. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric locomotive VL85. Operation manual]. Moscow, Transport Publ., 1992, 480 p.

13. Dombrovsky V. V. *Ekonometrika* [Econometrics]. Tomsk, TSU, 2016. URL: <http://sun.tsu.ru/mminfo/2016/Dombrovski/start.htm> (retrieved on 12.05.2019) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Yuriy M. KULINICH,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Department "Railway transport",
Far Eastern State Transport University (FESTU)

Sergey A. SHUKHAREV,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer,
Department "Railway transport",
Far Eastern State Transport University (FESTU)

Denis Yu. DROGOLOV,

Postgraduate Student, Lecturer,
Department "Railway transport",
Far Eastern State Transport University (FESTU)

Received 28.06.2019

Revised 25.08.2019

Accepted 15.10.2019

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1, или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116

Оформить подписку можно в редакции: e-mail: journal@vniizht.ru, <https://vestnik.vniizht.ru/jour>.

Подписчики зарубежных стран могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).