Информация об авторах

Незевак Владислав Леонидович – к. т. н., старший научный сотрудниу, доцент, Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация, e-mail: nezevakWL@mail.ru

Authors

V. L. Nezevak - Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. Omsk State Transport University, Omsk, the Russian Federation, e-mail: nezevakWL@mail.ru

Для цитирования

Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов / В. Л. Незевак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 59, № 3. - С. 47–57. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).47-57.

For citation

Nezevak V. L. Modeling of operating modes of the electric power storage device with the busbars of a sectioning point in the conditions of handling heavy trains. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 47–57. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).47-57.

УДК *629.421.1* ***DOI:*** *10.26731/1813-9108.2018.3(59).57-68*

В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, В. В. Дурных

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: *16 октябрь 2018 г.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СЕРИИ ЭД9Э В СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB SIMULINK

Аннотация. *Тяговый трансформатор моторвагонного подвижного состава переменного тока является одним из самых важных элементов тягового привода, от которого зависит протекание электромагнитных процессов в выпрямительно-инверторном преобразователе и тяговых двигателях в режимах тяги и рекуперативного торможения.*

В данной статье представлено математическое моделирование тягового трансформатора типа ОДЦЭ-2000/25Б-У1, применяемого на современных электропоездах переменного тока серии ЭД9Э и ЭП3Д. На математической модели тягового трансформатора электропоезда проводятся опыты в режимах холостого хода и короткого замыкания, необходимых для сравнения характеристик математической модели с характеристиками реального тягового трансформатора. Для проведения моделирования вводятся дифференциальные уравнения электромагнитных и переходных процессов тягового трансформатора электропоезда. Для максимального приближения протекающих электромагнитных процессов в математической модели к процессам, протекающим в тяговом трансформаторе электропоездов переменного тока ЭП3Д и ЭД9Э, модель была дополнена магнитными характеристиками сердечника. Достоверность математической модели тягового трансформатора проверялась согласно опыту холостого хода и короткого замыкания. Полученные результаты опытов свидетельствуют о том, что характеристики математической модели соответствуют характеристикам тягового трансформатора электропоездов серии ЭП3Д и ЭД9Э.

Разработанная математическая модель тягового трансформатора позволит получить электромагнитные процессы, близкие к реальным, протекающие в тяговом приводе электропоезда переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Ключевые слова: *тяговый трансформатор, выпрямительно-инверторный преобразователь, тяговый электродвигатель (ТЭД), выпрямительная установка возбуждения, короткое замыкание, переменный ток, моделирование, тиристор, холостой ход, электропоезд.*

V. S. Ivanov, O. V. Mel'nichenko, V. V. Durnykh

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation
Received: *October 16, 2018*

MATHEMATICAL MODELING OF A TRACTION TRANSFORMER OF AN AC ELECTRIC TRAIN OF THE ED9E SERIES IN A SIMULATION ENVIRONMENT MATLAB SIMULINK

Abstract. *Traction transformer of AC multiple unit is one of the most important elements of the traction drive, on which the electromagnetic processes in the rectifier-inverter converter and traction motors depend in the traction and regenerative braking modes.*

This article presents mathematical modeling of a traction transformer of type ODTSE-2000 / 25B-U1, used on modern electric trains of alternating current of series ED9E and EP3D. Using the mathematical model of the electric train traction transformer, experiments are conducted in the idle run and short circuit modes necessary for comparing the characteristics of a mathematical model with those of a real traction transformer. To carry out the simulation, differential equations of electromagnetic and transient processes of the electric train traction transformer are introduced. The mathematical model of the transformer is supplemented by the introduction of

© В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, В. В. Дурных, 2018

magnetic characteristics of the core, which makes it possible to maximize the flow of electromagnetic processes in it. As a result, a mathematical model of the traction transformer for the electric trains ED9E and EP3D was obtained, as well as the electromagnetic processes of the idling and short-circuit test of the traction transformer, which, according to the results, can be claimed to match the characteristics of the mathematical model with the characteristics of the real traction transformer when comparing them.

The developed mathematical model of the traction transformer will make it possible to obtain electromagnetic processes close to the real ones that occur in the traction drive of an alternating current electric train in traction and regenerative braking regimes.

Keywords: *traction transformer, electric rectifier-inverter converters (RIC), traction motor (TM), rectifier excitation system (RES), alternating current, modeling, thyristor, short circuit (SC), idle run, electric train.*

Введение

На сегодняшний день открытое акционерное общество «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») является одной из наиболее энергозатратных компаний Российской Федерации: оно ежегодно использует более 40 млрд·кВт□ч электроэнергии, что составляет порядка 4 % от общего расхода страны. Основной объем потребления приходится на электрическую тягу поездов – 35 млрд кВт·ч. Компания разработала энергетическую стратегию России до 2030 г., в одном из пунктов которой указана проектировка подвижного состава нового поколения с использованием прорывных технологий.

Начиная с 2008 г. Демиховский вагоностроительный завод серийно осуществляет выпуск электропоездов переменного тока серии ЭД9Э с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) и коллекторными тяговыми двигателями. Тиристорная база позволяет не только выпрямлять переменный ток, но и плавно регулировать напряжения тяговых двигателей, а также инвертировать постоянный ток в переменный, что дает возможность электропоезду осуществить ресурсосберегающий режим – рекуперативное торможение [1].

Однако тиристорная база электропоездов имеет множество недостатков, основные из которых – это значительное потребление электроэнергии на тягу моторного вагона, примерно на 3 % выше, чем на электропоездах на базе диодов; коэффициент мощности ($K_м$) в режиме тяги и рекуперативного торможения не выше 0,84 и 0,65 соответственно, что говорит о нерациональном расходе электроэнергии на тягу за счет высокого потребления реактивной мощности электропоездом. В настоящее время тиристорные силовые полупроводниковые приборы являются морально устаревшими.

С момента появления IGBT-транзисторов мегаваттного класса имеется возможность проектирования новых ВИП на базе транзисторов, причем с массогабаритными показателями, которые позволят разместить новые преобразователи на существующих и вновь разрабатываемых электропоездах.

Существенное снижение расхода электроэнергии возможно с помощью применения IGBT-транзисторов и разработанных алгоритмов их управления. Данное техническое решение позволяет повысить коэффициент мощности моторвагонных подвижных составов (МВПС) в режимах тяги и рекуперативного торможения до 0,95 и 0,9 соответственно [2].

Однако для осуществления модернизации электропоезда серии ЭД9Э IGBT-транзисторами необходимо произвести математическое моделирование тягового трансформатора, так как от его параметров и характеристик сильно зависит протекание электромагнитных процессов в силовых цепях МВПС.

Математическое моделирование тягового трансформатора ОДЦЭ-2000/25Б-У1 электропоездов переменного тока серии ЭП3Д и ЭД9Э

Однофазный тяговый трансформатор модели ОДЦЭ-2000/25Б-У1 устанавливают на отечественных, современных электропоездах переменного тока серии ЭП3Д и ЭД9Э. Конфигурация его обмоток показана на рис. 1 [1, 2].

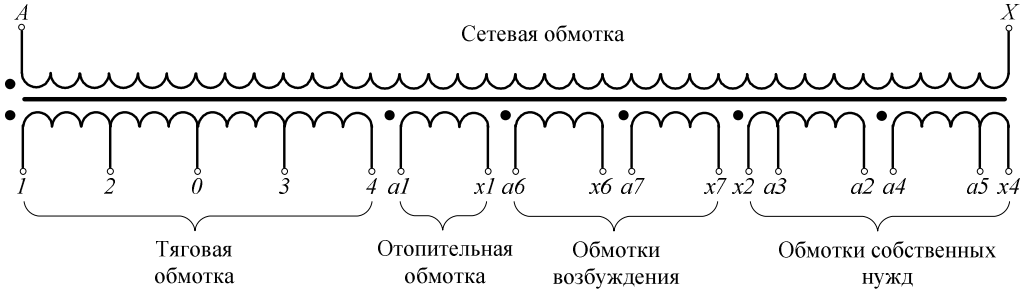


Рис. 1. Тяговый трансформатор модели ОДЦЭ-2000/25Б-У1, схема обмоток

Создание математической модели трансформатора осуществляется при помощи его схемы замещения, которая имеет вид многообмоточной системы с магнитными связями (рис. 2).

Параметры индуктивностей обмоток трансформатора закладываем постоянными, а емкостями пренебрегаем [3].

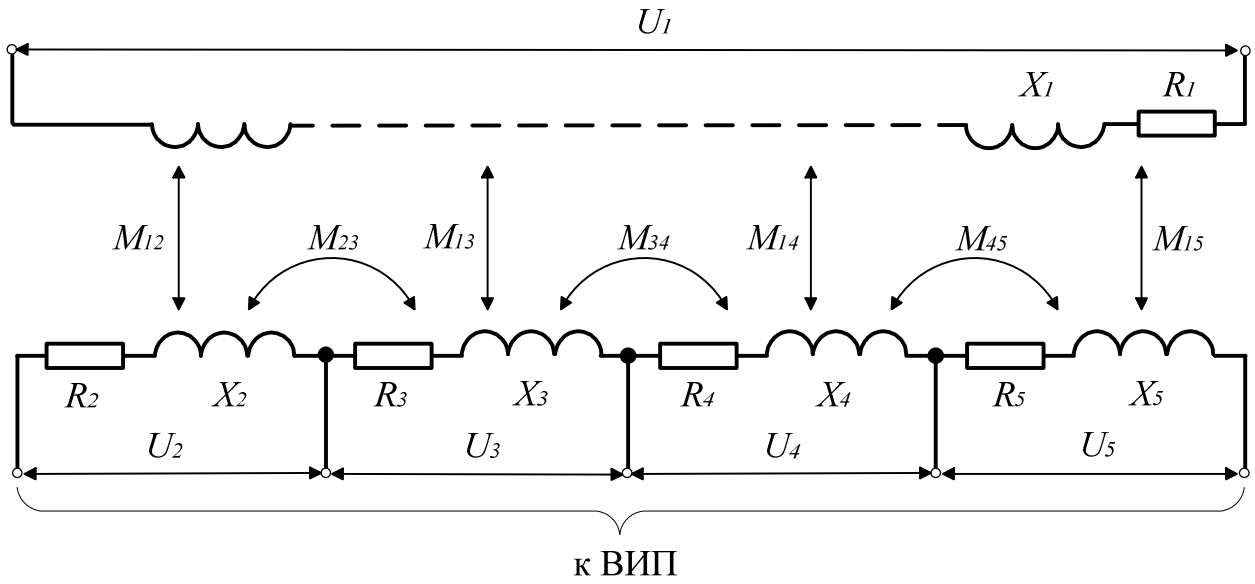


Рис. 2. Многообмоточный тяговый трансформатор модели ОДЦЭ-2000/25Б-У1 электропоездов серии ЭП3Д и ЭД9Э в виде схемы замещения

При работе трансформатора протекают электромагнитные процессы. Характер протекания данных процессов определяется системой дифференциальных уравнений [3]:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + L_{1\sigma}\dfrac{di_1}{dt} + w_1\dfrac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_2 = i_2 r_2 + L_{2\sigma}\dfrac{di_2}{dt} + w_2\dfrac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_3 = i_3 r_3 + L_{3\sigma}\dfrac{di_3}{dt} + w_3\dfrac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_4 = i_4 r_4 + L_{4\sigma}\dfrac{di_4}{dt} + w_4\dfrac{d\Phi_0}{dt}; \\ u_5 = i_5 r_5 + L_{5\sigma}\dfrac{di_5}{dt} + w_5\dfrac{d\Phi_0}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 – напряжение вторичных и первичной обмоток трансформатора; i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 – ток вторичных и первичной обмоток трансформатора; r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 – активное сопротивление вторичных и первичной обмоток трансформатора; Φ_0 – основной магнитный поток сердечника трансформатора; w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – витки обмоток тягового трансформатора.

Магнитодвижущая сила, возникающая между первичной и вторичными обмотками тягового трансформатора, создает основной магнитный поток в сердечнике, который определяем согласно закону Ома по следующему выражению [4]:

$$\Phi_0 = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3 + i_4 w_4 + i_5 w_5}{R_\mu} = \lambda_\mu (i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3 + i_4 w_4 + i_5 w_5), \quad (2)$$

где λ_μ – магнитная проводимость магнитопровода тягового трансформатора; R_μ – магнитное сопротивление тягового трансформатора.

Далее осуществляем преобразование уравнения (2) и подставляем в систему уравнений (1).

В итоге получаем дифференциальные уравнения протекающих, переходных электромагнитных процессов трансформатора электропоезда:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + (L_{1\sigma} + w_1^2)\dfrac{di_1}{dt} + w_1 w_2 \lambda_\mu \dfrac{di_2}{dt} + w_1 w_3 \lambda_\mu \dfrac{di_3}{dt} + w_1 w_4 \lambda_\mu \dfrac{di_4}{dt} + w_1 w_5 \lambda_\mu \dfrac{di_5}{dt}; \\ u_2 = i_2 r_2 + (L_{2\sigma} + w_2^2)\dfrac{di_2}{dt} + w_2 w_1 \lambda_\mu \dfrac{di_1}{dt} + w_2 w_3 \lambda_\mu \dfrac{di_3}{dt} + w_2 w_4 \lambda_\mu \dfrac{di_4}{dt} + w_2 w_5 \lambda_\mu \dfrac{di_5}{dt}; \\ u_3 = i_3 r_3 + (L_{3\sigma} + w_3^2)\dfrac{di_3}{dt} + w_3 w_1 \lambda_\mu \dfrac{di_1}{dt} + w_3 w_2 \lambda_\mu \dfrac{di_2}{dt} + w_3 w_4 \lambda_\mu \dfrac{di_4}{dt} + w_3 w_5 \lambda_\mu \dfrac{di_5}{dt}; \\ u_4 = i_4 r_4 + (L_{1\sigma} + w_4^2)\dfrac{di_4}{dt} + w_4 w_2 \lambda_\mu \dfrac{di_2}{dt} + w_4 w_3 \lambda_\mu \dfrac{di_3}{dt} + w_4 w_1 \lambda_\mu \dfrac{di_1}{dt} + w_4 w_5 \lambda_\mu \dfrac{di_5}{dt}; \\ u_5 = i_5 r_5 + (L_{5\sigma} + w_5^2)\dfrac{di_5}{dt} + w_5 w_2 \lambda_\mu \dfrac{di_2}{dt} + w_5 w_3 \lambda_\mu \dfrac{di_3}{dt} + w_5 w_4 \lambda_\mu \dfrac{di_4}{dt} + w_5 w_1 \lambda_\mu \dfrac{di_1}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь

$w_1^2 \lambda_\mu = M_{11}$ – индуктивность взаимная первичной трансформаторной обмотки;

$w_1 w_2 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T12}} = M_{12},\ w_1 w_3 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T13}} =$

$= M_{13},\ w_1 w_4 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T14}} = M_{14},\ w_1 w_5 \lambda_\mu =$

$= M_{11}\dfrac{1}{K_{T15}} = M_{15}$

– индуктивности взаимные между первичной и вторичными трансформаторными обмотками;

$w_5 w_4 w_3 w_2 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T12}}\dfrac{1}{K_{T13}}\dfrac{1}{K_{T14}}\dfrac{1}{K_{T15}} = M_{5432}$

– индуктивность взаимная между вторичными трансформаторными обмотками, где

$K_{T12}, K_{T13}, K_{T14}, K_{T15}$ – коэффициенты трансформации трансформатора между первичной и вторичными обмотками,

$K_{T12} = \dfrac{w_1}{w_2}, K_{T13} = \dfrac{w_1}{w_3}, K_{T14} = \dfrac{w_1}{w_4}, K_{T15} = \dfrac{w_1}{w_5};$

$w_2^2 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T12}^2} = M_{22}, w_3^2 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T13}^2} = M_{33},$

$w_4^2 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T14}^2} = M_{44}, w_5^2 \lambda_\mu = M_{11}\dfrac{1}{K_{T15}^2} = M_{55}$

– индуктивности взаимные трансформаторных тяговых обмоток;

$L_{1\sigma} + M_{11} = L_1$ – полная индуктивность первичных трансформаторных обмоток;

$L_{2\sigma} + M_{22} = L_2, L_{3\sigma} + M_{33} = L_3, L_{4\sigma} + M_{44} = L_4, L_{5\sigma} + M_{55} = L_5$ – полные индуктивности вторичных трансформаторных обмоток.

После математических преобразований систем уравнений, используя принятые обозначения, получаем:

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + L_1 \dfrac{di_1}{dt} + M_{12}\dfrac{di_2}{dt} + M_{13}\dfrac{di_3}{dt} + M_{14}\dfrac{di_4}{dt} + M_{15}\dfrac{di_5}{dt}; \\ u_2 = M_{12}\dfrac{di_1}{dt} + i_2 r_2 + L_2\dfrac{di_2}{dt} + M_{23}\dfrac{di_3}{dt} + M_{24}\dfrac{di_4}{dt} + M_{25}\dfrac{di_5}{dt}; \\ u_3 = M_{13}\dfrac{di_1}{dt} + M_{23}\dfrac{di_2}{dt} + i_3 r_3 + L_3\dfrac{di_3}{dt} + M_{34}\dfrac{di_4}{dt} + M_{35}\dfrac{di_5}{dt}; \\ u_4 = M_{14}\dfrac{di_1}{dt} + M_{24}\dfrac{di_2}{dt} + M_{34}\dfrac{di_3}{dt} + i_4 r_4 + L_4\dfrac{di_4}{dt} + M_{45}\dfrac{di_5}{dt}; \\ u_5 = M_{15}\dfrac{di_1}{dt} + M_{25}\dfrac{di_2}{dt} + M_{35}\dfrac{di_3}{dt} + M_{45}\dfrac{di_4}{dt} + i_5 r_5 + L_5\dfrac{di_5}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

Далее записываем систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_5 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 & M_{34} & M_{35} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_4 & M_{45} \\ M_{15} & M_{25} & M_{35} & M_{45} & L_5 \end{vmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Величины полных индуктивностей и активных сопротивлений обмоток тягового трансформатора расположены по диагонали матрицы (5).

Величины взаимных индуктивностей между обмотками трансформатора расположены слева и справа от диагонали матрицы (5).

С помощью функционального блока библиотеки Simulink – Multi-Winding Transformer осуществим создание тягового трансформатора электропоезда с учетом дополнительных параметров (рис. 3) [5]:

– характеристика насыщения магнитопровода трансформатора;

– индуктивность рассеивания обмоток трансформатора, L_σ;

– сопротивления сетевой и вторичной обмотки, $R_{\text{обм}}$;

– гистерезис.

Параметры схемы замещения тягового трансформатора задаются в относительных величинах. Вычисление данных величин производится с учетом технических параметров трансформатора модели ОДЦЭ-2000/25Б-У1 (табл. 1) [1].

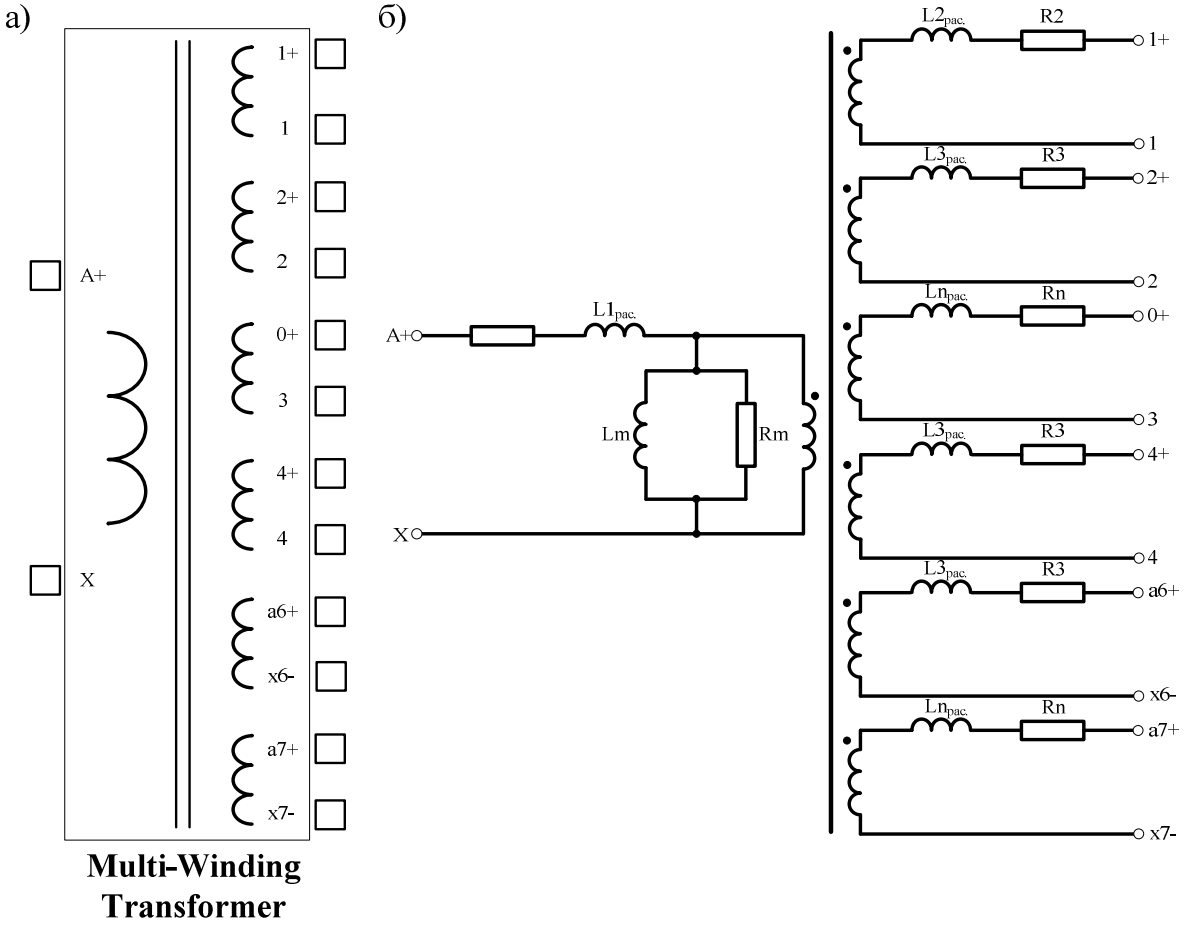


Рис. 3. Пиктограмма (а) и схемное исполнение модели многообмоточного трансформатора электропоезда (б) в библиотеке Simulink

Таблица 1

Технические параметры трансформатора ОДЦЭ-2000/25Б-У1

Параметр трансформатора		Величина параметра
Частота питающей сети, Гц		50
Номинальная мощность сетевой обмотки, кВ·А		1652
Номинальное напряжение сетевой обмотки, кВ		25
Номинальный ток сетевой обмотки, А		66,1
Ток холостого хода при напряжении 25 кВ, %		1,0
Номинальная мощность тяговых обмоток, кВ·А		1320
Номинальное напряжение тяговых обмоток, В	1–2	500
	1–0	1100
	1–3	1650
	1–4	2200
Номинальный ток тяговых обмоток, А		600
Номинальная мощность обмотки возбуждения, кВ·А		2×16
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	a_6–x_6; a_7–x_7	122
Номинальный ток обмотки возбуждения, А		133,3

Блок-схема математической модели тягового трансформатора электропоезда переменного тока, полученная в редакторе Simulink, изображена на рис. 4.

Определение индуктивности рассеяния тягового трансформатора осуществляем экспериментальным способом из опыта короткого замыкания с использованием паспортных данных $\left(U_k\ \%\right)$, а также известных параметров трансформатора – номинального напряжения $\left(U_H\right)$ и тока $\left(I_H\right)$ по формуле [6]

$$L_\sigma = \frac{U_k\% \cdot U_н}{I_н \cdot \omega \cdot 100}. \qquad (6)$$

Адекватность данной модели тягового трансформатора доказывается из выполнения на ней опыта холостого хода и короткого замыкания.

Математическая модель трансформатора дополнена магнитными характеристиками магнитопровода (рис. 5–7). Это позволит максимально приблизить протекающие электромагнитные процессы в математической модели к процессам тягового трансформатора электропоездов переменного тока серии ЭД9Э и ЭП3Д [7–12].

На рис. 8, 9 показаны диаграммы опыта холостого хода трансформатора.

На рис. 10 показаны результаты опыта короткого замыкания тягового трансформатора.

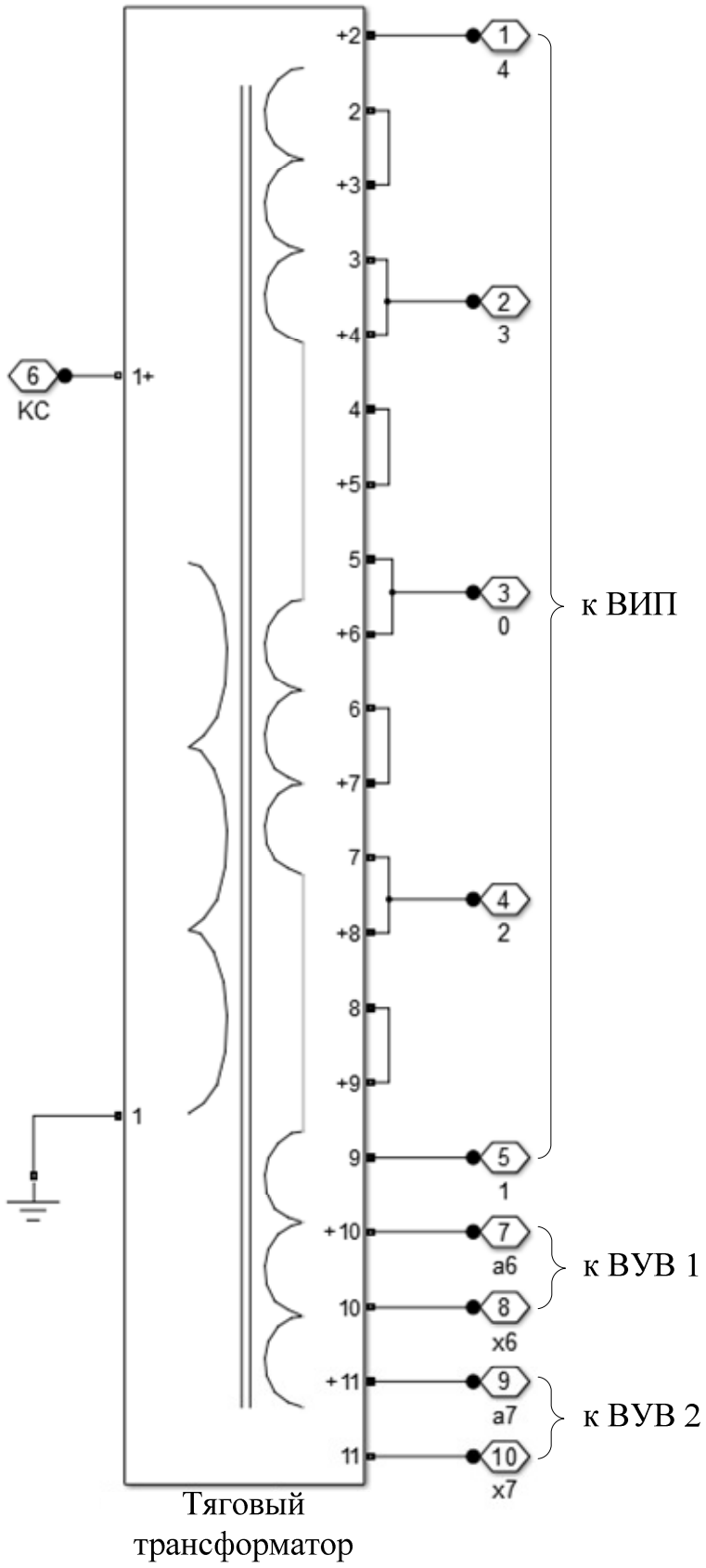


Рис. 4. Блок-схема тягового трансформатора электропоездов переменного тока ЭП3Д и ЭД9Э в редакторе Simulink

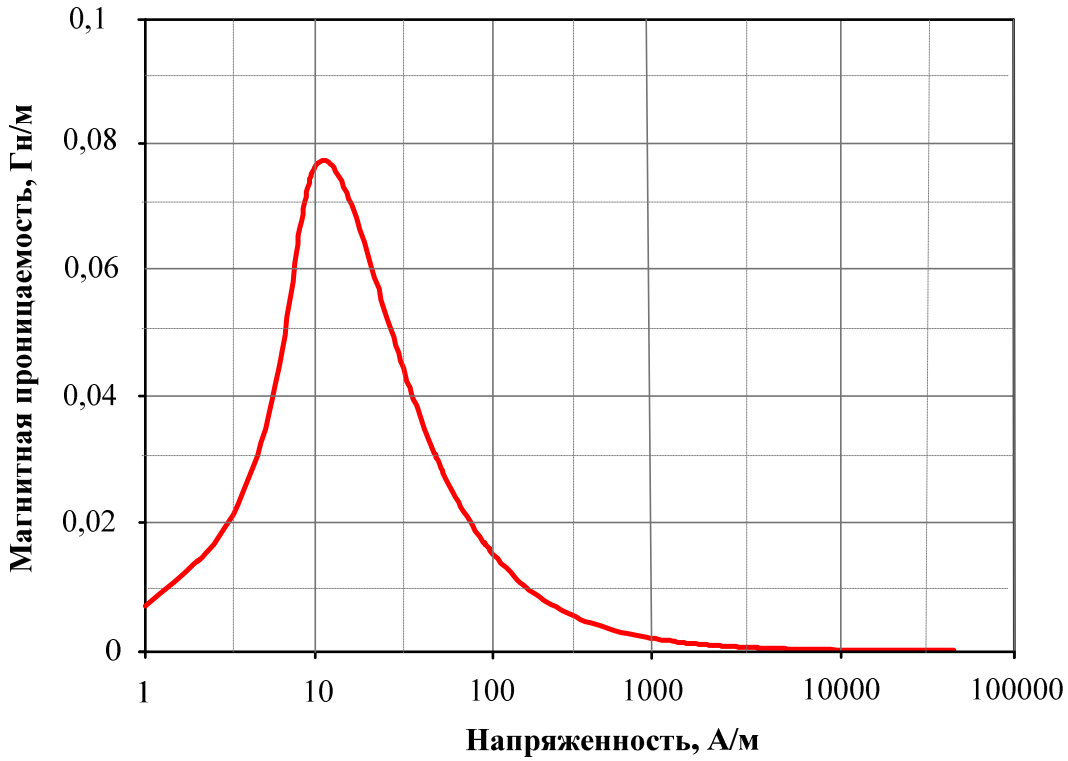


Рис. 5. Зависимость магнитной проницаемости от индукции электротехнической стали 3404



Рис. 6. Кривая намагничивания электротехнической стали 3404

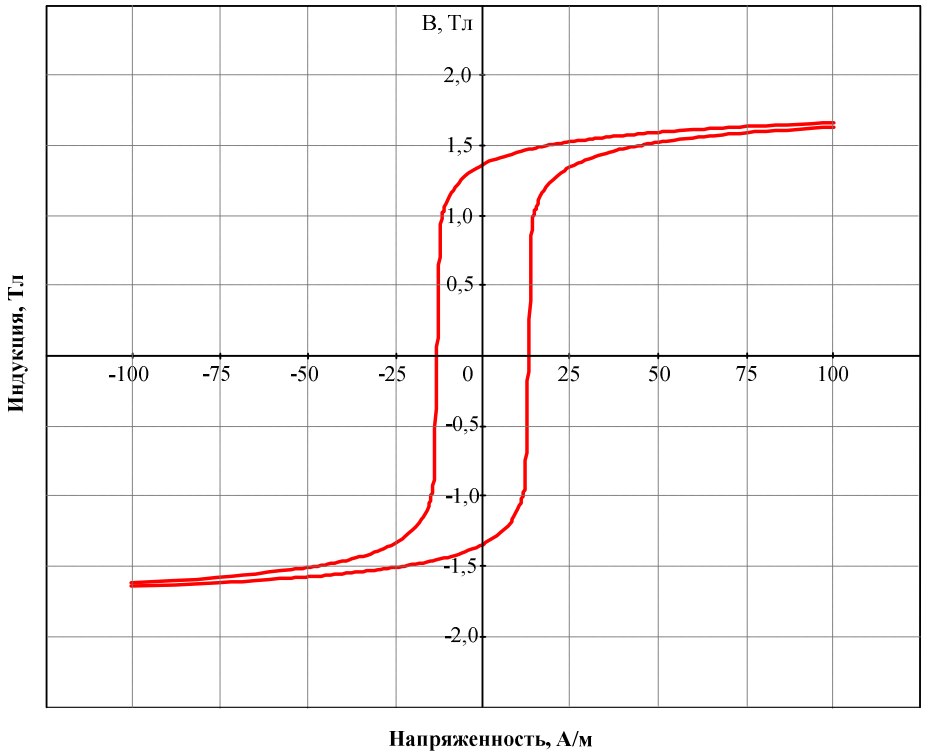


Рис. 7. Петля статического гистерезиса электротехнической стали 3404

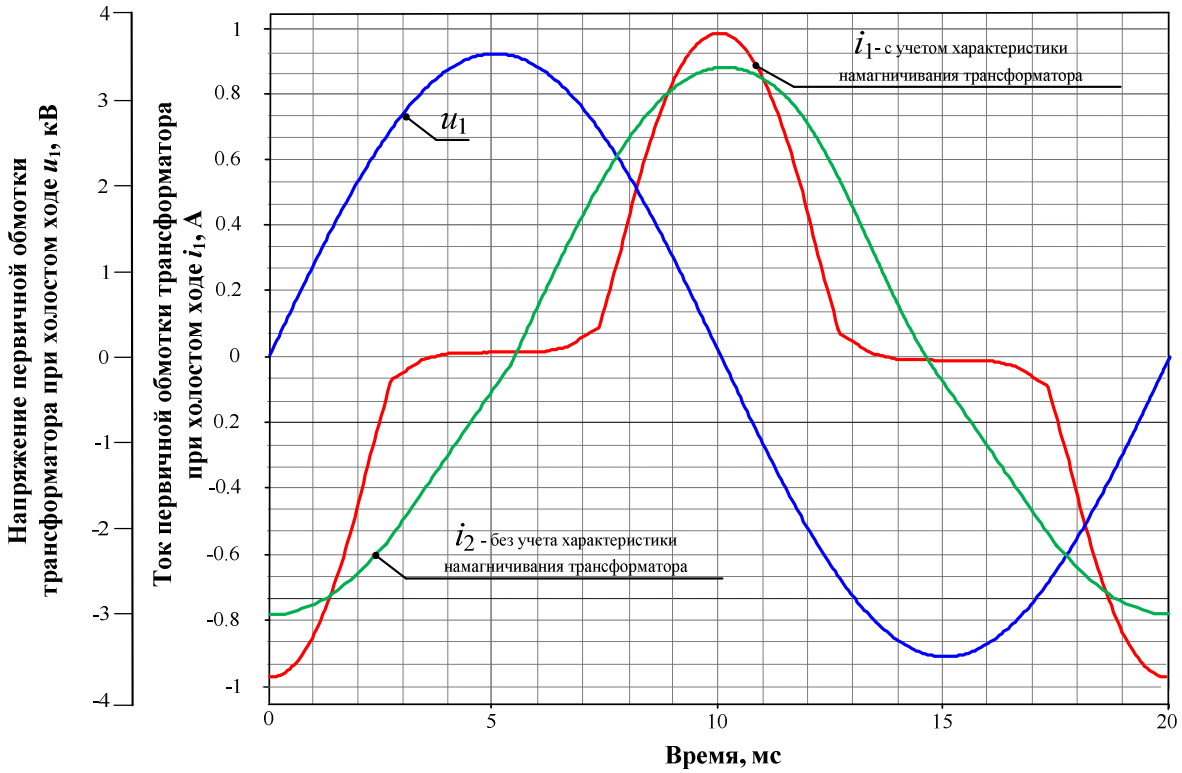


Рис. 8. Результаты опыта холостого хода тягового трансформатора

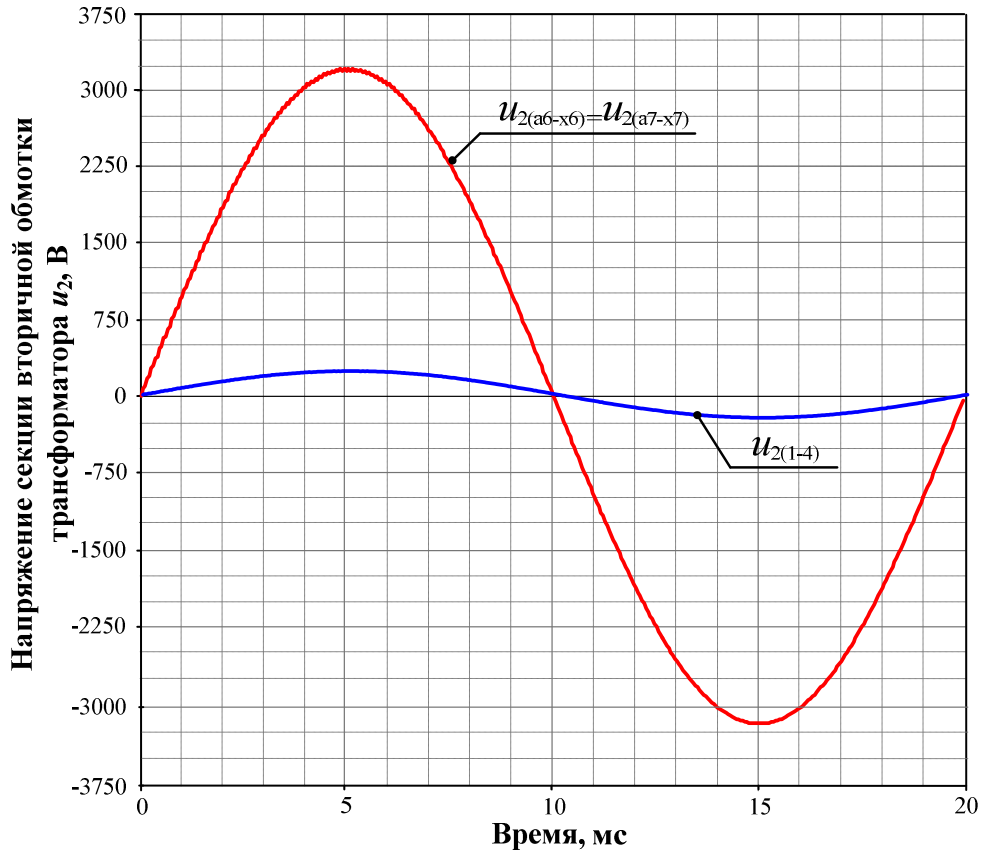


Рис. 9. Результаты опыта холостого хода тягового трансформатора

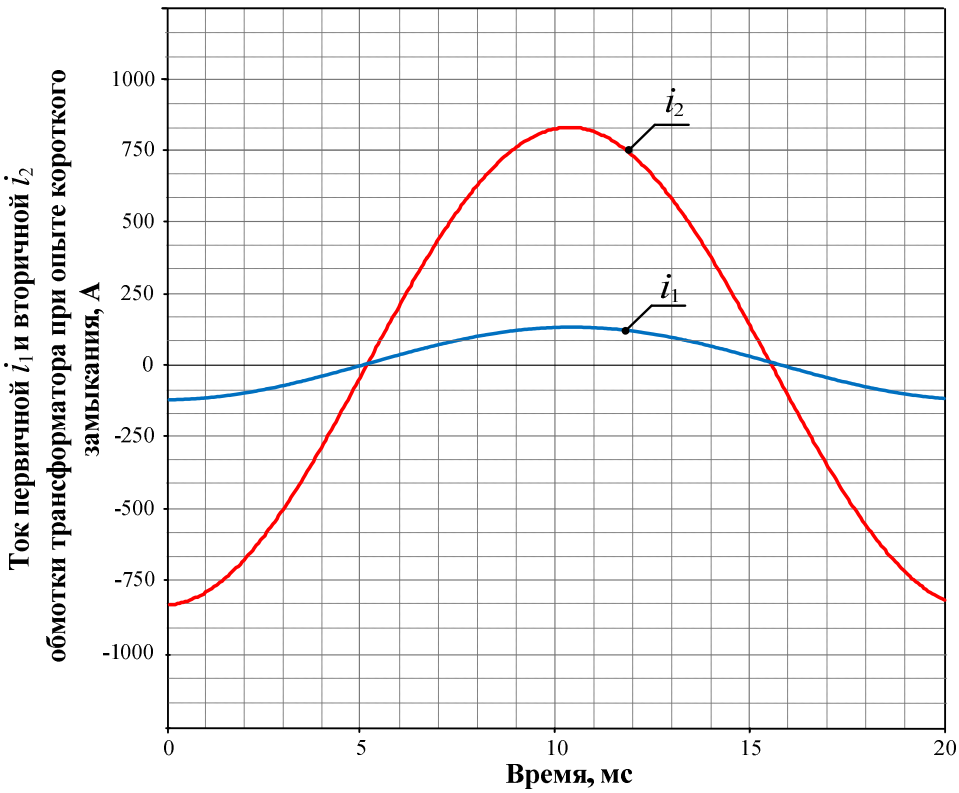


Рис. 10. Токи первичной и вторичной трансформаторных обмоток при эксперименте короткого замыкания

Заключение

По полученным результатам опыта холостого хода и короткого замыкания можно утверждать об адекватности полученной математической модели. Разработанная математическая модель тягового трансформатора позволит получить электромагнитные процессы, близкие к реальным, протекающие в тяговом приводе электропоезда переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельниченко О.В., Иванов В.С. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока // Вестник ИрГТУ, 2018, № 4.
2. Иванов В.С., Мельниченко О.В., Линьков А.О., Дурных В.В. Выпрямительно-инверторный преобразователь на базе IGBT-транзисторов для моторвагонного подвижного состава / Scientific research-2017, 2017.
3. Трансформатор тяговый однофазный типа ОДЦЭ – 2000/25Б – У1 Руководство по эксплуатации 1ВП.713.004 РЭ / ПАО «Укрэлектроаппрат», 2005. – 34 с.
4. Электропоезд ЭД9Э. Руководство по эксплуатации / ОАО «Демиховский машиностроительный завод», 2015. – 433 с.
5. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока с рекуперативным торможением / С.В.Власьевский // Дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.09.03 – Хабаровск, 2001. – 396 с.
6. Вопросы теории и расчета трансформаторов / под ред. С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
7. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
8. Михеев Г.М., Шевцов В.М., Иванова Т.Г. Методы определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Вестник Чувашского университета, 2009, № 2.
9. Пентегов И.В., Красножон А.В. Универсальная аппроксимация кривых намагничивания электротехнических сталей // Электротехника и электромеханика – НТУ «ХПИ», 2006, № 1.
10. Цзяньхуэй Ч., Грехов Л.В. Описание петель статического гистерезиса электротехнических сталей применительно к расчету быстродействующего электроуправляемого клапана топривной аппаратуры ДВС с электронным управлением // Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в Росиии: приоритеты развития и подготовка кадров» – МГТУ «МАМИ», 2012.
11. Холоднокатаные электротехнические стали / Справ. изд. Б.В. Молотилов, Л.В. Миронов, А.Г. Петренко. и др. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.
12. Мустафаев Р.А., Набиев М.А., Гулиев З.А., Гаджибалаев Н.М. К аппроксимации кривой намагничивания // Электричество, 2004, № 5.

REFERENCES

1. Mel'nichenko O.V., Ivanov V.S. Analiz primeneniya preobrazovatelei v silovykh skhemakh otechestvennogo motorvagon-nogo podvizhnogo sostava peremennogo toka [Analysis of the use of converters in the power circuits of the domestic AC motor rolling stock]. *Vestnik IrGTU* [*Proceedings of Irkutsk State Technical University*], 2018, No. 4.
2. Ivanov V.S., Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O., Durnykh V.V. Vypryamitel'no-invertornyi preobrazovatel' na baze IGBT-tranzistorov dlya motorvagonnogo podvizhnogo sostava [Rectifier-inverter converter based on IGBT transistors for rolling stock]. *Scientific research-2017*, 2017.
3. Transformator tyagovyi odnofaznyi tipa ODTsE – 2000/25B – U1 Rukovodstvo po ekspluatatsii 1VP.713.004 RE [Single-phase traction transformer, type ODTSE - 2000 / 25B - U1 Operation manual 1VP.713.004 RE]. PAO «Ukrelektroapprat» Publ., 2005, 34 p.
4. Elektropoezd ED9E. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Electric train ED9E. Operation manual]. JSC Demikhovsky Machine-Building Plant Publ., 2015, 433 p.
5. Vlas'evskii S.V. Povyshenie effektivnosti vypryamitel'no-invertornykh preobrazovatelei elektrovozov peremennogo toka s rekupe-rativnym tormozheniem [Improving the efficiency of rectifying-inverter converters of AC electric locomotives with recuperative braking]. D. Sci. (Engineering) thesis: 05.09.03. Khabarovsk, 2001, 396 p.
6. Vasyutinskii S.B. (ed.). Voprosy teorii i rascheta transformatorov [Questions of the theory and calculation of transformers]. Leningrad: Energiya Publ., 1970, 432 p.
7. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroistv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press Publ.; SPb.: Piter Publ., 2008, 288 p.
8. Mikheev G.M., Shevtsov V.M., Ivanova T.G. Metody opredeleniya induktivnosti rasseyaniya obmotok silovogo transformatora [Methods for determining the leakage inductance of the windings of a power transformer]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [*Vestnik of Chuvash University*], 2009, No. 2.
9. Pentegov I.V., Krasnozhon A.V. Universal'naya approksimatsiya krivykh namagnichivaniya elektrotekhnicheskikh stalei [Universal approximation of magnetization curves of electrical steels]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika* [*Electrical Engineering & Electromechanics*]. NTU «KhPI» Publ., 2006, No. 1.
10. Tszyan'khuei Ch., Grekhov L.V. Opisanie petel' staticheskogo gisterezisa elektrotekhnicheskikh stalei primenitel'no k raschetu bystrodeistvuyushchego elektroupravlyaemogo klapana toprivnoi apparatury DVS s elektronnym upravleniem [Description of static hysteresis loops of electrical steels in relation to the calculation of high-speed electrically controlled valve of the electronically controlled internal combustion equipment of the internal combustion engine]. *Materialy 77-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii AAI «Avtomobile- i traktorostroenie v Rosiii: prioritety razvitiya i podgotovka kadrov»* [*Materials of the 77th International Scientific and*

Technical Conference AAI Automotive and Tractor-Building in Russia: Development Priorities and Personnel Training]. MSTU «MAMI», 2012.

11. Molotilov B.V., Mironov L.V., Petrenko A.G. et al. Kholodnokatanye elektrotekhnicheskie stali. Sprav. izd. [Cold-rolled electrical steel. Ref. ed.]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1989, 168 p.

12. Mustafaev R.A., Nabiev M.A., Guliev Z.A., Gadzhibalaev N.M. K approksimatsii krivoi namagnichivaniya [Approximation of the magnetization curve]. *Elektrichestvo* [*Electricity*], 2004, No. 5.

Информация об авторах

Иванов Владислав Сергеевич – аспирант кафедры «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru

Мельниченко Олег Валерьевич – д. т. н., проф., заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Olegmelnval@mail.ru

Дурных Валерий Владимирович – начальник Восточно-Сибирской дирекции моторвагонного подвижного состава, г. Иркутск, e-mail: V_durnyh@mail.ru

Для цитирования

Иванов В. С. Математическое моделирование тягового трансформатора электропоезда переменного тока серии ЭД9Э в среде имитационного моделирования MATLAB Simulink / В. С. Иванов, О. В. Мельниченко, В. В. Дурных // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 59, № 3. - С. 57–68. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).57-68.

Authors

Ivanov Vladislav Sergeevich – Ph.D. of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru

Mel'nichenko Oleg Valer'evich – Doctor of Engineering Science, Prof., head of the Subdepartment of Electric Rolling Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Olegmelnval@mail.ru

Durnykh Valerii Vladimirovich – head of the East-Siberian Directorate of railcar rolling stock, Irkutsk, e-mail: V_durnyh@mail.ru

For citation

Ivanov V. S., Mel'nichenko O. V., Durnykh V. V. Mathematical modeling of a traction transformer of an alternating current electric train of the ED9E series in a simulation environment MATLAB Simulink. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 57–68. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).57-68.

УДК *629.4* ***DOI:*** *10.26731/1813-9108.2018.3(59).68-76*

П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский, И. А. Худоногов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
Дата поступления: *28 сентября 2018 г.*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЧИН САМОПРОИЗВОЛЬНЫХ СРАБАТЫВАНИЙ ТОРМОЗОВ ПОЕЗДА В ГРАНИЦАХ КРАСНОЯРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Аннотация. *В статье рассмотрены актуальные вопросы повышения управляющих качеств тормозов грузового поезда путем совершенствования контура ликвидации сверхзарядного давления, в частности модернизации клапана мягкости. Для совершенствования тормозных средств и исключения самопроизвольных срабатываний определено влияние профиля пути на приборы торможения. С целью оценки влияния профиля пути в местах наиболее частого срабатывания автотормозов рассмотрен профиль пути и определены места наиболее частого срабатывания автотормозов. Исследованы и определены причины самопроизвольных срабатываний автотормозов. Представлены экспериментальные исследования статических характеристик поршневого пневматического реле и диафрагменного пневматического реле. Проанализирована конструкция и работа уравнительной части крана машиниста усл. № 395. Сформулирована проблема срабатываний автотормозов поезда в результате перезарядки тормозной сети поезда. Произведено теоретическое обоснование необходимости модернизации тормозных средств подвижного состава железных дорог. Выявлены недостатки уравнительной части крана машиниста усл. № 395, позволяющие произвести дальнейшую модернизацию устройства с целью решения задачи повышения управляющих качеств тормозной системы, связанные с человеческим фактором во время зарядки и отпуска тормозов подвижного состава. Предложена модернизированная уравнительная часть крана машиниста. Предложенное исполнение уравнительной части крана машиниста повысит его чувствительность к перепадам давления в тормозной магистрали, связанным с продольно-динамическими реакциями поезда, своевременная компенсация подобного рода разрядок снизит количество самопроизвольных срабатываний автотормозов по причине продольно-динамических реакций. Приведены выводы и рассмотрен вопрос о дальнейшем совершенствовании тормозных средств подвижного состава железных дорог.*

Ключевые слова: *самопроизвольные срабатывания, перезарядка воздухораспределителя, уравнительная часть крана машиниста, автотормоза, безопасность движения.*

P. Yu. Ivanov, N. I. Manuilov, E. Yu. Dul'skii, I. A. Khudonogov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation
Received*: September 28, 2018*

© П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский, И. А. Худоногов, 2018