

нейронных структур. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 85 с. ISBN 5-7691-1977-2.

11. Орлов А. И. Эконометрика. М.: Экзамен, 2014. 573 с. ISBN 5-472-00035-1.

12. Яновский Л. П., Буховец А. Г. Введение в эконометрику / под ред. Л. П. Яновского. 2-е изд., доп. М.: КноРус, 2007. 254 с. ISBN 978-5-85971-270-0.

ИВАНЧЕНКО Владимир Иванович, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».

Адрес для переписки: ivanchenko-v.i@yandex.ru

КОМЯКОВ Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: tskom@mail.ru

ПЛОТНИКОВ Юрий Викторович, инженер-исследователь Научно-исследовательской части (НИЧ).

Адрес для переписки: omgups_lab@mail.ru

ЭРБЕС Виктор Владимирович, кандидат технических наук, инженер-проектировщик НИЧ.

Адрес для переписки: erbes-viktor@mail.ru

Для цитирования

Иванченко В. И., Комяков А. А., Плотников Ю. В., Эрбес В. В. Разработка интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования предприятий // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 54–58. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-54-58.

Статья поступила в редакцию 24.11.2017 г.

© В. И. Иванченко, А. А. Комяков, Ю. В. Плотников, В. В. Эрбес

УДК 621.313.33

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-58-62

В. А. КОПЫРИН
О. В. СМЕРНОВ

Тюменский
индустриальный университет,
г. Тюмень

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОГРУЖНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В статье представлены разработанная имитационная модель погружного асинхронного электродвигателя и результаты исследования режимов его работы. В качестве объекта исследования выбран электродвигатель номинальной мощностью 63 кВт. Построение модели проведено в программном комплексе Matlab/Simulink. Получены рабочие характеристики электродвигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, энергия, нефтяная скважина, имитационная модель, погружной электродвигатель.

Введение. В настоящее время свыше 75 % всей нефти в России добывается установками электроцентробежных насосов, что составляет 410,4 млн т [1, 2]. Погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД), входящий в состав электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса для добычи нефти, является одним из основных его элементов. Из-за конструктивных особенностей ПЭД построение адекватной имитационной модели, описывающей с достаточной степенью точности электромеханические процессы в машине, является сложной задачей [3–5].

В работах [6, 7] приведены результаты моделирования ПЭД в составе установок электроцентробежных насосов как асинхронного двигателя специфической конструкции. Предложенные математические модели позволяют исследовать электрические и механические характеристики электродвигателя.

В свою очередь, использование метода имитационного моделирования, как частного случая математического, позволяет наглядно исследовать процессы функционирования технических и техно-

логических объектов при минимальных материальных и трудовых затратах.

Целью публикации является сообщение о разработанной уточненной имитационной модели погружного асинхронного электродвигателя.

Теоретическая часть. В качестве объекта исследования выбран асинхронный электродвигатель ЭД-Я 63-117 М5В5 мощностью 63 кВт.

Для построения имитационной модели использованы готовые блоки электротехнических устройств, входящих в библиотеку Matlab/Simulink SimPowerSystem: three-phase programmable voltage source; asynchronous machinesquirrel cage. Для измерения мгновенных значений токов и напряжений участков цепи использован блок three-phase U-I.

Модель механической части асинхронной машины описывается выражениями [8]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_m &= \frac{1}{2H} (T_e - F \cdot \omega_m - T_m) \\ \frac{d}{dt} \theta_m &= \omega_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ω_m — угловая частота вращения ротора; θ_m — угловое положение ротора; T_m — механический момент на валу; H — суммарная инерционная постоянная машины и нагрузки; F — суммарный коэффициент вязкого трения (машины и нагрузки).

Модель электрической части асинхронной машины описывается выражениями [8]:

$$\left. \begin{aligned} u_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega \cdot \psi_{qs} \\ u_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega \cdot \psi_{qs} \\ 0 &= R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d}{dt} \psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} \\ 0 &= R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d}{dt} \psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr} \\ T_e &= 1,5 (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $u_{ds}, i_{ds}, u_{qs}, i_{qs}$ — проекция векторов напряжения и тока статора на соответствующие оси; i'_{dr}, i'_{qr} — проекция векторов тока ротора на соответствующие оси; $R_s, L_{ls}, R'_r, L'_{lr}$ — активное сопротивление и индуктивность рассеяния статора и ротора соответственно; L_m — индуктивность цепи намагничивания; L_s, L'_r — полные индуктивности статора и ротора; $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi'_{dr}, \psi'_{qr}$ — проекция векторов

потокосцепления статора и ротора на оси d и q соответственно; ω, ω_r — угловая частота напряжения питания и электрическая угловая скорость вращения ротора.

Потокосцепление статора и приведенное потокосцепление ротора, а также индуктивность статора и приведенная индуктивность ротора определяются по выражениям: $\psi_{ds} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{dr}$, $\psi_{qs} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{qr}$, $\psi'_{dr} = L'_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds}$, $\psi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs}$, $L_s = L_{ls} + L_m$, $L'_r = L'_{lr} + L_m$ соответственно.

Начальные условия асинхронной машины могут быть определены по методике, изложенной в [9], или при помощи блока powergui [10].

Исходные данные для исследования приведены в табл. 1. Выражения для определения базисных единиц и их значения приведены в табл. 2.

В Matlab/Simulink модель асинхронной машины (asynchronous machines squirrel-cage) представлена Т-образной схемой замещения (рис. 1) и включает в себя электрическую часть и механическую. Все электрические переменные и параметры асинхронной машины приводятся к статору и двухфазной системе координат d, q .

На рис. 2 приведены рабочие характеристики электродвигателя ЭД-Я 63-117 М5В5, полученные в ходе приемосдаточных испытаний согласно протоколу № 29988 от 31.08.2015 г. ООО «Алмаз».

Результаты моделирования. В результате расчета электрических параметров электродвигателя

Таблица 1

Технические характеристики погружного электродвигателя

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение $U_{g,ном}$, В	1040
Номинальная мощность на валу $P_{g,ном}$, кВт	63
Номинальная частота вращения $n_{н'}$, об/мин	2910
Номинальный КПД η , %	84,5
Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{g,ном}$	0,84
Номинальный ток $I_{g,ном}$, А	51
Номинальный момент $M_{н'}$, Н·м	212
Кратность пускового тока k_I	5,1
Кратность пускового момента m_{II}	1,5
Кратность максимального момента m_{max}	2,3
Момент инерции J , кг·м ²	0,46
Номинальное скольжение $s_{н'}$, %	3,0
Критическое скольжение $s_{кр'}$, %	23,8
Сопротивление обмоток статора R_{I_g} при 84 °С, Ом	1,35

Таблица 2

Базисные единицы

Параметр	Расчетное выражение	Значение	Единицы измерения
Мощность	$S_{\sigma} = \frac{S_{g,ном}}{m} = \frac{88757}{3}$	29586	ВА
Напряжение	$U_{\sigma} = \frac{U_{g,ном}}{\sqrt{3}} = \frac{1040}{\sqrt{3}}$	600,4	В
Ток	$I_{\sigma} = \frac{S_{\sigma}}{U_{\sigma}} = \frac{29586}{600,4}$	49,3	А
Частота	$f_{\sigma} = f_1$	50	Гц
Полное сопротивление	$Z_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{I_{\sigma}} = \frac{600,4}{49,3}$	12,8	Ом
Активное сопротивление	$R_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{I_{\sigma}} = \frac{600,4}{49,3}$	12,8	Ом
Индуктивность	$L_{\sigma} = \frac{Z_{\sigma}}{2\pi \cdot f_{\sigma}} = \frac{12,8}{2 \cdot 3,14 \cdot 50}$	0,039	Гн
Угловая частота вращения магнитного поля статора	$\Omega_{\sigma} = \Omega_1 - \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{1}$	314,2	рад/с
Момент	$M_{\sigma} = \frac{S_{\sigma} \cdot m}{\Omega_{\sigma}} = \frac{29586 \cdot 3}{314,2}$	282,5	Н·м

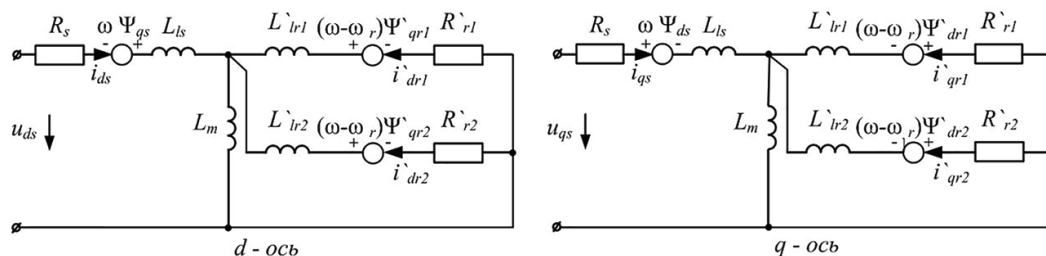


Рис. 1. Схема замещения электродвигателя

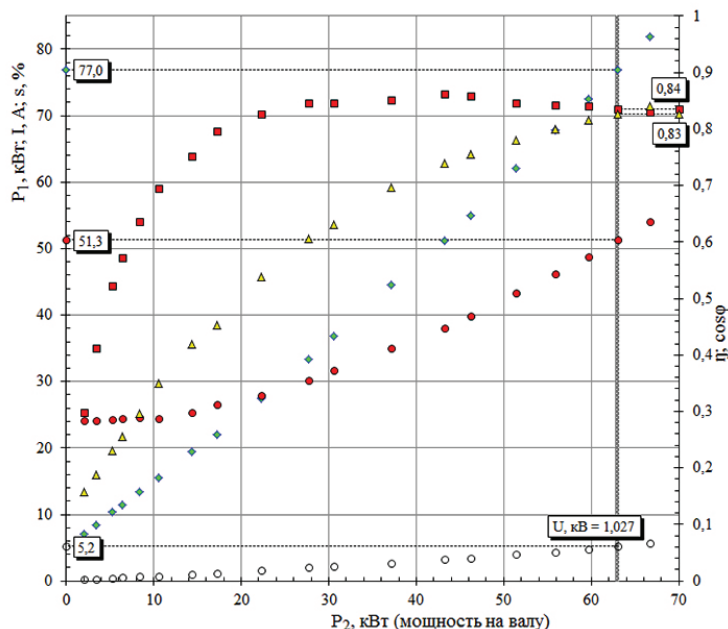


Рис. 2. Рабочие характеристики электродвигателя (экспериментальные)

Таблица 3

Параметры схемы замещения электродвигателя в абсолютных и относительных единицах

Параметр	В физических единицах, Ом	В относительных единицах, о.е.
Активное сопротивление обмотки статора	$R_{1g} = 1,35$	$R_{1g} = \frac{R_{1g}}{Z_6} = \frac{1,35}{12,8} = 0,105$
Индуктивное сопротивление обмотки статора	$X_{1g} = 0,995$	$x_{1g} = \frac{X_{1g}}{Z_6} = \frac{0,995}{12,8} = 0,077$
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора	$R'_{2g} = 0,676$	$R'_{2g} = \frac{R_{2g}}{Z_6} = \frac{0,676}{12,8} = 0,053$
Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора	$X'_{2g} = 0,995$	$x'_{2g} = \frac{X_{2g}}{Z_6} = \frac{0,995}{12,8} = 0,077$
Индуктивное сопротивление контура намагничивания	$X_{mg} = 21,05$	$x_{mg} = \frac{X_{mg}}{Z_6} = \frac{21,05}{12,8} = 1,64$

по методике, изложенной в [9, 10], и сопоставления их с экспериментальными данными получены параметры уточненной Т-образной схемы замещения исследуемого электродвигателя, выраженные в абсолютных и относительных единицах (табл. 3). Имитационная модель электродвигателя приведена

на рис. 3. Погружной электродвигатель подключен к трехфазному синусоидальному источнику напряжения 1040 В, частотой 50 Гц. Для определения значений полной, активной, реактивной мощностей и коэффициента мощности сети используется блок вычисления мощности (БВМ).

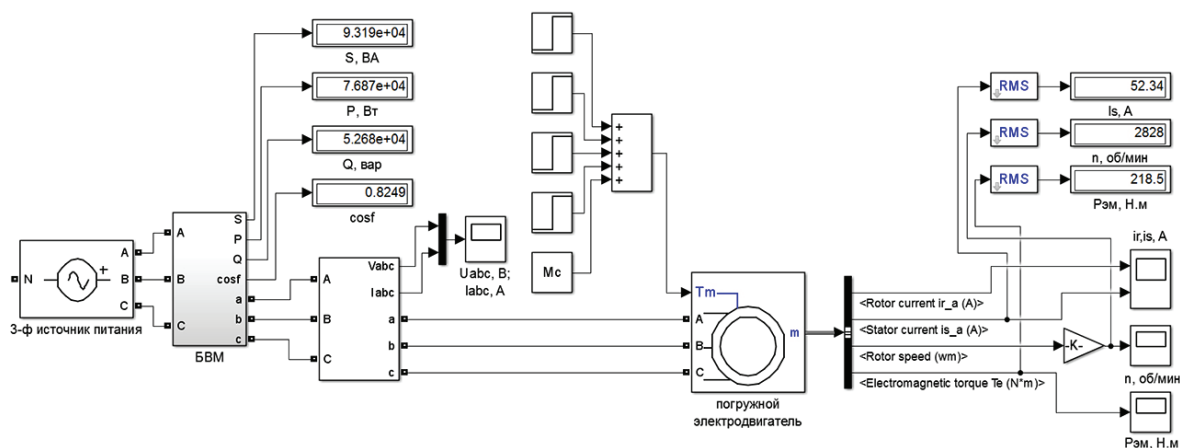


Рис. 3. Имитационная модель электродвигателя

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и полученных характеристик

Mс, %	Скорость, об/мин			Ток, А			Потребляемая активная мощность, кВт			Коэффициент мощности cos φ		
	1	2	Δ, %	1	2	Δ, %	1	2	Δ, %	1	2	Δ, %
40	2943	2936	0,1	30,2	31,9	-5,3	31,9	31,8	0,1	0,56	0,55	1,8
60	2911	2903	0,3	36,5	37,4	-2,4	46,4	46,3	0,2	0,70	0,69	1,4
80	2882	2869	0,4	44,1	44,2	-0,2	61,8	61,3	0,8	0,77	0,77	0,3
100	2844	2827	0,6	53,0	52,4	1,1	77,2	76,9	0,4	0,82	0,82	0,68
120	2811	2788	0,8	61,7	61,0	1,2	93,1	93,3	-0,2	0,85	0,85	-0,2

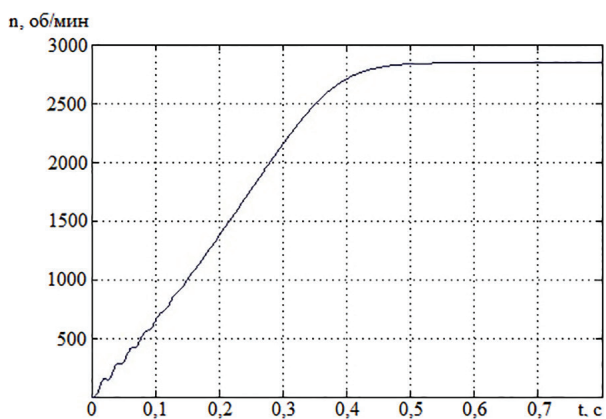


Рис. 4. Зависимость частоты вращения ротора от времени

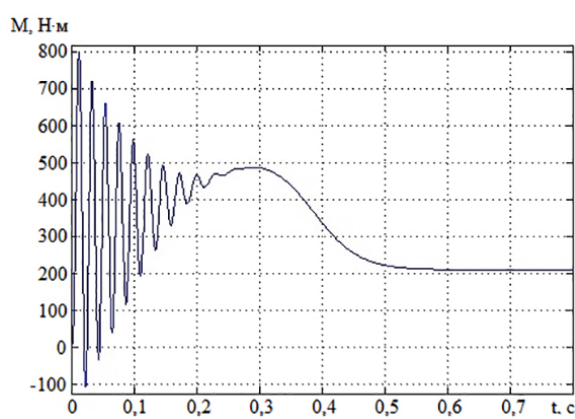


Рис. 5. Зависимость электромагнитного момента от времени

Сравнение экспериментальных рабочих характеристик (данные — 1) с полученными на имитационной модели (данные — 2) приведено в табл. 4. Исследование проводилось в установившемся режиме работы ПЭД при приложении статического момента на уровне 40 %, 60 %, 80 %, 100 %, 120 % от номинального.

В результате моделирования прямого пуска погружного асинхронного электродвигателя получены зависимости угловой частоты вращения ротора (рис. 4) и электромагнитного момента от времени (рис. 5) при приложении нагрузки в виде вентиляторного момента 212 Н·м, соответствующего форме

кривой механической характеристики электроцентробежного насоса.

На рис. 6 приведены графики изменения токов в статоре и роторе электродвигателя в момент пуска и установившегося режима. Получены зависимости потребляемого тока I , момента M , оборотов n , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и коэффициента полезного действия η в функции мощности на валу P_2 (рис. 7).

Обсуждение результатов. Анализ полученных данных показал, что разработанная имитационная модель ПЭД ЭД-Я 63-117 М5В5 с достаточной степенью точности воспроизводит характеристики

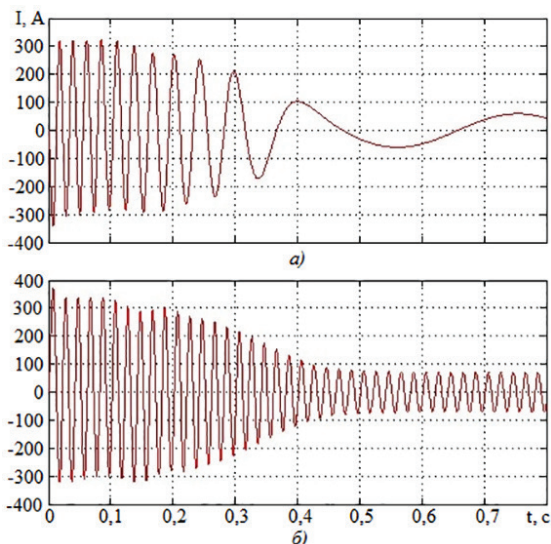


Рис. 6. Зависимость тока от времени:
а) в роторе; б) в статоре

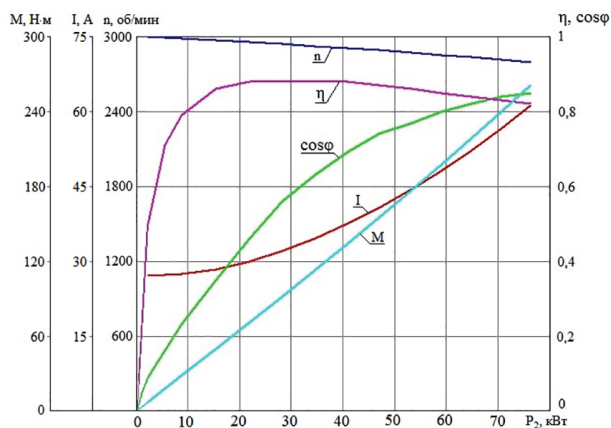


Рис. 7. Рабочие характеристики погружного электродвигателя (имитационные)

электродвигателя в установившемся режиме. В номинальном режиме различие между экспериментальными данными и расчетными для тока составляет 1,1 %, для потребляемой активной мощности — 0,4 %. Максимальная погрешность с учетом допустимых погрешностей измерений на испытательных стендах — не более 0,5 %, соответствующая области малых нагрузок, составляет для тока минус 5,8 % и уменьшается с увеличением нагрузки до 1,6 %.

В результате исследования работы ПЭД на вентиляторную нагрузку установлено, что номинальная скорость вращения ротора достигается через 0,5 секунды после запуска и составляет 2844 об/мин (рис. 4). Кривая электромагнитного момента (рис. 5) с 0 по 0,3 секунды имеет колебательный характер, что соответствует переходному режиму работы. Начиная с момента времени 0,5 секунды, электродвигатель переходит в установившийся режим работы. Анализ кривых токов (рис. 6) в электродвигателе показал, что ток в роторе имеет высокую частоту колебаний между 0 и 0,4 секунды. Ток в статоре во время пуска достигает значения 256,9 А и снижается до 50,5 А в установившемся режиме работы. Кратность пускового тока составляет 5,08, что практически соответствует паспортным данным.

В ходе верификации рабочих характеристик ПЭД (рис. 7) установлено, что полученные характеристики с достаточной степенью точности отображают физические процессы в исследуемом электродвигателе.

Вывод. Разработанная имитационная модель адекватно отображает электромеханические процессы погружного асинхронного электродвигателя. Адекватность модели подтверждена сравнением полученных данных с экспериментальными рабочими характеристиками электродвигателя.

Библиографический список

1. Ивановский В. Н., Сабиров А. А., Деговцов А. В. [и др.]. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. № 4. С. 25–30.
2. Шевченко С. Д., Якимов С. Б., Ивановский В. Н. [и др.]. Разработка алгоритма расчета дебита нефтяных скважин при их эксплуатации УЭЦН // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013. № 6. С. 90–91.
3. Vivek V., Uma G., R. P. Kumudini Devi, Chellamuthu C. Performance of induction motor driven submersible pump using Matlab/Simulink // International Conference on Power System Technologies 2002. Proceedings PowerCon. 2002. Vol. 2. P. 765–768.
4. Ozpineci B, Tolbert Leon M. Simulink implementation of induction machine model — a modular approach // Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International. 2003. Vol. 2. P. 728–734. DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210317.
5. Rameshrabhu S, Dr. Deivasundari P. Efficiency Prediction of ESP through Mathematical Modeling for PV Applications // International Journal of Engineering Research and General Science. 2015. Vol. 3, Issue 2, Part 2. P. 494–504.
6. Бирюков С. В., Ковалев А. Ю., Ерёмин Е. Н., Хамитов Р. Н. Математическое моделирование погружных асинхронных электрических двигателей в составе установок электроцентробежных насосов // Омский научный вестник. 2012. № 1 (107). С. 186–188.
7. Ковалёв А. Ю. Моделирование погружных асинхронных электрических двигателей в составе установок электроцентробежных насосов: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2010. 157 с.
8. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
9. Терёхин В. Б. Моделирование систем электроприводов в Simulink (Matlab 7.0.1). Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 292 с.
10. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМКПресс, 2007. 288 с. ISBN 5-94074-395-1.

КОПЫРИН Владимир Анатольевич, специалист отдела развития научных инициатив.

Адрес для переписки: kopurinva@gmail.com

СМИРНОВ Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроэнергетика».

Адрес для переписки: oleg_smirnov_1940@mail.ru

Для цитирования

Копырин В. А., Смирнов О. В. Имитационное моделирование режимов работы погружного асинхронного электродвигателя // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 58–62. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-58-62.

Статья поступила в редакцию 22.12.2017 г.

© В. А. Копырин, О. В. Смирнов