

УДК 681.511.26:51.751-74

DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4519

Шифр специальности ВАК 05.09.03; 05.09.01

Аналитическая модель динамической системы «длинный кабель – погружной асинхронный двигатель с заторможенным ротором» в полярной системе координат

А.С. Глазырин^{1,2}, И.А. Набунский³, С.С. Попов^{1,4}, Е.В. Боловин^{1,5}✉,
В.В. Тимошкин¹, С.Н. Кладиев¹, А.А. Филипас¹, Р.Н. Хамитов^{6,7},
В.А. Копырин⁶, Е.И. Попов⁶, В.З. Ковалев^{2,1}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

³ ООО «Алрино», Россия, г. Томск

⁴ ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск

⁵ ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, г. Томск

⁶ Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

⁷ Омский государственный технический университет, Россия, г. Омск

✉ orange@tpu.ru

Аннотация

Актуальность. Фонд нефтяных скважин Российской Федерации, в которых добыча производится с помощью установок электроцентробежных насосов или электроприводных лопастных насосов с каждым годом расширяется, и такая тенденция будет сохраняться минимум пару десятков лет. В свою очередь количество скважин с легкодоступными нефтепродуктами во введенном в эксплуатацию фонде уменьшается, что приводит к необходимости улучшения качества добычи и уменьшения энергозатрат для сохранения рентабельности и объемов добычи. Добиться этого возможно с помощью внедрения векторных энергоэффективных систем управления погружными двигателями на основе наблюдателей переменных состояния асинхронных электродвигателей с учетом переходных процессов в питающем кабеле значительной длины, передающем энергию от преобразователя частоты к двигателю. Основой наблюдателей являются настраиваемые математические модели, максимально достоверно описывающие электрические, электромеханические и механические процессы в электроприводе и связанных с ним системах автоматизации технологических процессов. Однако применение сложных и громоздких настраиваемых математических моделей в цифровых сигнальных процессорах из-за ограниченности производительности и памяти вызывает объективные трудности в получении решений повышенной точности в реальном масштабе времени. На основании этого разработка аналитической модели динамической системы «длинный кабель – погружной асинхронный двигатель с заторможенным ротором» в полярной системе координат является актуальной задачей. **Цель:** разработка аналитического описания настраиваемой математической модели регулируемого асинхронного двигателя с заторможенным ротором в полярной системе координат с учетом влияния длинного кабеля. **Методы:** теория электропривода, теории электрических машин, математические модели погружных асинхронных двигателей и редуцированной модели длинного кабеля, определитель Вандермонда, аналитические методы решения дифференциальных уравнений. **Результаты и выводы.** Разработана аналитическая модель регулируемого асинхронного двигателя с заторможенным ротором в полярной системе координат с учетом питающего кабеля значительной длины. Разработанная аналитическая модель рекомендована к использованию в векторном энергоэффективном электроприводе с применением принципов фазовой дискриминации с учетом влияния процессов в питающей кабельной линии. Такой электропривод имеет потенциал для увеличения рентабельности добычи нефти из низко- и среднедебетовых скважин.

Ключевые слова: погружной асинхронный двигатель, длинный кабель, установка электроцентробежного насоса, полярная система координат, режим заторможенного ротора, система обыкновенных дифференциальных уравнений.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Для цитирования: Аналитическая модель динамической системы «длинный кабель – погружной асинхронный двигатель с заторможенным ротором» в полярной системе координат / А.С. Глазырин, И.А. Набунский, С.С. Попов,

Е.В. Боловин, В.В. Тимошкин, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, Р.Н. Хамитов, В.А. Копырин, Е.И. Попов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 220–233. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4519

UDC 681.511.26:51.751-74
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4519

Analytical model of a dynamic system "long cable – submersible induction motor with fixed rotor" in a polar coordinate system

A.S. Glazyrin^{1,2}, I.A. Nabunskiy³, S.S. Popov^{1,4}, E.V. Bolovin^{1,5}✉,
V.V. Timoshkin¹, S.N. Kladiev¹, A.A. Filipas¹, R.N. Khamitov^{6,7},
V.A. Kopyrin⁶, E.I. Popov⁶, V.Z. Kovalev^{2,1}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

³ LLC «Alrino», Tomsk, Russian Federation

⁴ «NPF Mechatronica-Pro» LTD, Tomsk, Russian Federation

⁵ LLC «INT» of JSC «EleSy», Tomsk, Russian Federation

⁶ Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

⁷ Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

✉ orange@tpu.ru

Abstract

Relevance. The stock of oil wells in the Russian Federation, where production is carried out with the help of electric centrifugal pumps or electric-driven vane pumps, is expanding every year. This trend will continue for at least a couple of decades. In its turn, the number of wells with readily available oil products in the commissioned stock is decreasing. This leads to the need to improve production quality and reduce energy consumption to maintain profitability and production volumes. This can be achieved by implementing vector energy-efficient control systems for submersible motors based on observers of induction motor state variables. In this case one should take into account transients in the supply cable of considerable length, which transmits energy from a frequency converter to a motor. The observers are based on adjustable mathematical models that describe electrical, electromechanical and mechanical processes in electric drive and related process automation systems as reliably as possible. Using complex and cumbersome adjustable mathematical models in digital signal processors due to limited performance and memory causes objective difficulties in obtaining solutions of increased accuracy in real time. On this basis, the development of an analytical model of the dynamic system "long cable – submersible induction motor with fixed rotor" in the polar coordinate system is an urgent task. **Aim.** Development of analytical description of the mathematical model of the induction motor with a fixed rotor in the polar coordinate system taking into account the influence of a long cable. **Methods.** Electric drive theory, electric machine theory, mathematical models of submersible induction motors and reduced long cable model, Vandermonde's determinant, analytical methods for solving differential equations. **Result and conclusions.** The authors have developed an analytical model of the regulated induction motor with a fixed rotor in the polar coordinate system taking into account the supply cable of considerable length. The developed analytical model is recommended for use in vector energy-efficient electric drive with application of phase discrimination principles taking into account the influence of processes in the supply cable line. Such electric drive has a potential for increasing the profitability of oil production from low- and medium-debt wells.

Keywords: submersible induction motor, long cable, electric centrifugal pump installation, polar coordinate system, stationary rotor mode, system of ordinary differential equations.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. FENG-2023-0001 "Predictive control of energy flows of power generating complexes of the Arctic and the Far North, with stochastic nature of consumption and generation of electrical energy: theory, synthesis, experiment").

For citation: Glazyrin A.S., Nabunskiy I.A., Popov S.S., Bolovin E.V., Timoshkin V.V., Kladiev S.N., Filipas A.A., Khamitov R.N., Kopyrin V.A., Popov E.I., Kovalev V.Z. Analytical model of a dynamic system "long cable – submersible induction motor with

fixed rotor" in a polar coordinate system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no, 12, pp. 220–233. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4519

Введение

По данным делового журнала «Neftegaz.RU» фонд нефтяных скважин Российской Федерации на 2022 г. составлял 158785 скважин, из них в 110857 скважинах добыча нефти производится с помощью установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1]. В свою очередь сохраняется тенденция роста фонда УЭЦН, что связано с введением нового числа скважин в эксплуатацию и использования существующих. При этом, согласно обзору международного энергетического агентства (МЭА), пик потребления трех основных видов ископаемого топлива ожидается к 2030 г., а высокий спрос на нефтепродукты будет сохраняться как минимум до 2050 г. [2]. Приведенные данные позволяют с уверенностью сказать, что количество эксплуатируемых УЭЦН будет расти с каждым годом в течение следующих 20 лет. Однако в процессе эксплуатации УЭЦН возникают характерные технические проблемы, которые сказываются на снижении отказоустойчивости оборудования и его срока службы. К ним относятся: прихваты и заклинивания погружного электродвигателя (ПЭД), появления отложений на рабочей части насоса, закупорка насоса песком или илом, которая приводит к заклиниванию и выходу из строя насоса. Данные проблемы приводят к уменьшению межремонтного периода работы скважин нефтяного фонда, что подтверждено представленными данными в [1]. Стоит учесть, что доказанные запасы нефти, не требующие для своей добычи высоких энергозатрат, снижаются, количество фонтанирующих скважин становится меньше, а обводненность добываемого флюида увеличивается, что приводит к необходимости добывать уменьшения энергозатрат для повышения рентабельности добычи нефти низко- и среднедебетных скважин. Достичь такого результата и увеличить добычу нефти до 3 % позволяет перевод скважины на режим циклической эксплуатации (ЦЭС) [3–6]. Однако перевод скважин на ЦЭС уменьшает ресурс УЭЦН за счет ускоренного износа шайб, промежуточных радиальных и упорных подшипников в центробежном насосе и других сопутствующих факторов [6].

Перспективными и набирающими популярность способами борьбы с представленными ранее проблемами является разработка и внедрение системы управления ПЭД на основе наблюдателей переменных состояния асинхронных электродвигателей

(АД) [7–11], или так называемыми бездатчиковыми векторными асинхронными электроприводами (от английского термина – sensorless induction motor drive [12]) с внедренными энергоэффективными алгоритмами [13], в том числе с учетом питающей кабельной линии [14].

Пространственные векторы переменных состояния асинхронной машины в зависимости от поставленной задачи могут описываться в любой координатной системе [15, 16], не обязательно в декартовой. Рассмотрим перспективы применения полярной системы координат вместо общепринятой декартовой системы, в которой положение вектора описывается двумя координатами: модулем вектора и его фазой. Представление векторов переменных состояния настраиваемых математических моделей в полярной системе является удобным для использования принципа фазовой дискриминации, широко применяемого в радиотехнике и в позиционных электроприводах [17–19]. При этом из-за известных проблем, связанных с механической частью УЭЦН, необходимо знать информацию о крутящем моменте, создаваемом валом двигателя, особенно в режиме заторможенного ротора, вызванного подклиниванием или полным заклиниванием погружного насоса.

Математическое описание динамической системы «длинный кабель – погружной асинхронный двигатель» с заторможенным ротором в полярной системе координат

Для построения настраиваемой математической модели трехфазную асинхронную машину представляют в виде пространственных векторов переменных состояния в одной из систем координат. Выбор конкретной системы координат осуществляется исходя из имеющихся аппаратных и программных решений и специфики решаемых задач при построении электропривода. За основу разрабатываемой настраиваемой модели взята хорошо зарекомендовавшая себя [15, 20] система дифференциальных уравнений (СДУ) в неподвижной, жестко связанной со статором системе координат α , β , описывающей работу динамической системы, при общепринятых допущениях [21, 22], записанная в нормальной форме Коши на основе классической Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя:

$$\begin{cases}
 \frac{di_{1\alpha.k}(t)}{dt} = a_1 i_{1\alpha.k}(t) + a_2 u_{1\alpha.k}(t) + b u_{1\alpha}(t), \\
 \frac{di_{1\beta.k}(t)}{dt} = a_1 i_{1\beta.k}(t) + a_2 u_{1\beta.k}(t) + b u_{1\beta}(t), \\
 \frac{du_{1\alpha.k}(t)}{dt} = a_3 i_{1\alpha.k}(t) + a_4 u_{1\alpha.k}(t) + a_5 i_{2\alpha.k}(t), \\
 \frac{du_{1\beta.k}(t)}{dt} = a_3 i_{1\beta.k}(t) + a_4 u_{1\beta.k}(t) + a_5 i_{2\beta.k}(t), \\
 \frac{di_{2\alpha.k}(t)}{dt} = a_6 u_{1\alpha.k}(t) + a_1 i_{2\alpha.k}(t) + a_2 u_{2\alpha.k}(t), \\
 \frac{di_{2\beta.k}(t)}{dt} = a_6 u_{1\beta.k}(t) + a_1 i_{2\beta.k}(t) + a_2 u_{2\beta.k}(t), \\
 \frac{du_{2\alpha.k}(t)}{dt} = a_3 i_{2\alpha.k}(t) + a_4 u_{2\alpha.k}(t) + a_5 i_{3\alpha.k}(t), \\
 \frac{du_{2\beta.k}(t)}{dt} = a_3 i_{2\beta.k}(t) + a_4 u_{2\beta.k}(t) + a_5 i_{3\beta.k}(t), \\
 \frac{di_{3\alpha.k}(t)}{dt} = a_6 u_{2\alpha.k}(t) + a_1 i_{3\alpha.k}(t) + a_2 u_{3\alpha.k}(t), \\
 \frac{di_{3\beta.k}(t)}{dt} = a_6 u_{2\beta.k}(t) + a_1 i_{3\beta.k}(t) + a_2 u_{3\beta.k}(t), \\
 \frac{du_{3\alpha.k}(t)}{dt} = a_3 i_{3\alpha.k}(t) + a_4 u_{3\alpha.k}(t) + a_5 i_{1\alpha}(t), \\
 \frac{du_{3\beta.k}(t)}{dt} = a_3 i_{3\beta.k}(t) + a_4 u_{3\beta.k}(t) + a_5 i_{1\beta}(t), \\
 \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} = a_7 u_{3\alpha.k}(t) + a_8 i_{1\alpha}(t) + a_9 \Psi_{2\alpha}(t) + \\
 \quad + \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \omega(t) \Psi_{2\beta}(t), \\
 \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} = a_7 u_{3\beta.k}(t) + a_8 i_{1\beta}(t) + a_9 \Psi_{2\beta}(t) - \\
 \quad - \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} z_p \omega(t) \Psi_{2\alpha}(t), \\
 \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} = a_{10} i_{1\alpha}(t) + a_{11} \Psi_{2\alpha}(t) - z_p \omega(t) \Psi_{2\beta}(t), \\
 \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} = a_{10} i_{1\beta}(t) + a_{11} \Psi_{2\beta}(t) + z_p \omega(t) \Psi_{2\alpha}(t), \\
 \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J_3} [M_{эм}(t) - M_c(t)],
 \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{1\alpha}(t)$, $u_{1\beta}(t)$ – мгновенная проекция вектора питающего напряжения по оси α , β соответственно; $i_{(n)\alpha.k}(t)$, $i_{(n)\beta.k}(t)$ – мгновенная проекция вектора тока $(n)=1,2,3$ первого, второго, третьего звена погружного кабеля по оси α , β соответственно; $u_{(n)\alpha.k}(t)$, $u_{(n)\beta.k}(t)$ – мгновенная проекция вектора выходного напряжения $(n)=1,2,3$ первого, второго, третьего звена погружного кабеля по оси α , β соответственно; $i_{1\alpha}(t)$, $i_{1\beta}(t)$ – мгновенная проекция тока статора

погружного двигателя по оси α , β соответственно; $\Psi_{2\alpha}(t)$, $\Psi_{2\beta}(t)$ – мгновенная проекция потокосцепления ротора погружного двигателя по оси α , β соответственно; $M_{эм}(t)$ – мгновенная величина электромагнитного момента двигателя; $M_c(t)$ – мгновенная величина момента сопротивления на валу двигателя; $\omega(t)$ – частота вращения двигателя; $n=3$ – количество звеньев эквивалентной модели погружного кабеля, на которые она редуцирована; $a_1 = -\frac{R_k}{L_k}$, $a_2 = -\frac{1}{L_k}$, $a_3 = \frac{1}{C_k}$, $a_4 = -\frac{G_k}{C_k}$, $a_5 = -\frac{1}{C_k}$, $a_6 = \frac{1}{L_k}$, $b = \frac{1}{L_k} - \frac{1}{n}$ – коэффициенты, зависящие от параметров

схемы замещения погружного кабеля; $a_7 = \frac{1}{\sigma L_1}$, $a_8 = -\frac{R_{1\sigma}}{\sigma L_1}$, $a_9 = \frac{R_2' L_m}{\sigma L_1 L_2^2}$, $a_{10} = \frac{R_2' L_m}{L_2}$, $a_{11} = -\frac{R_2'}{L_2}$ –

коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения погружного асинхронного двигателя; L_k , R_k – эквивалентные индуктивность и активное сопротивление жилы погружного кабеля; G_k , C_k – эквивалентные проводимость и емкость изоляции погружного кабеля; $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора; $L_2' = L_{2\sigma}' + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора; $L_{2\sigma}'$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора; L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре двигателя; $R_s = R_1 + \frac{R_2' \cdot L_m^2}{L_{2\sigma}}$ – эквивалентное активное сопротивление обмотки статора; R_1 – активное сопротивление обмотки статора; R_2' – приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора; z_p – число пар полюсов двигателя; J_3 – эквивалентный момент инерции, приведенный к валу двигателя.

Уравнение электромагнитного момента представлено векторным произведением векторов \vec{I}_1 и $\vec{\Psi}_2$ по закону Ленца:

$$M_{эм}(t) = \frac{3}{2} \frac{L_m z_p}{L_2} [\Psi_{2\alpha}(t) i_{1\beta}(t) - \Psi_{2\beta}(t) i_{1\alpha}(t)].$$

В выражении имеется поправочный коэффициент 3/2. Он необходим для соблюдения баланса мощностей при переходе от модели трехфазной асинхронной машины к двухфазной. Данный ко-

эффицент включен в механическую подсистему АД, в другом варианте поправочный коэффициент может быть введен в электрическую подсистему.

Стоит отметить, что эквивалентная модель длинного кабеля содержит три звена с сосредоточенными параметрами, так как такая модель показала свою эффективность в работе [23] и является рациональным для решаемой задачи.

В Т-образной схеме замещения АД дополнительно могут учитываться потери мощности в магнитной подсистеме в виде активного сопротивления R_m в цепи намагничивания. Эти потери обычно относительно невелики, особенно при номинальном режиме работы. Помимо R_m , для других задач могут быть использованы и другие параметры.

В системе уравнений (1) в нормальной форме Коши относительно производных переменных состояния выделит отдельно функции правых частей в общем виде:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha.k}(t, i_{1\alpha.k}, \dots, \omega)}{dt} = f_{i_{1\alpha.k}}(t, i_{1\alpha.k}, \dots, \omega) \\ \frac{di_{1\beta.k}(t, i_{1\alpha.k}, \dots, \omega)}{dt} = f_{i_{1\beta.k}}(t, i_{1\alpha.k}, \dots, \omega), \\ \dots \\ \frac{d\omega(t, i_{1\alpha.k}, \dots, \omega)}{dt} = f_{\omega}(t, i_{1\alpha.k}, \dots, \omega). \end{cases} \quad (2)$$

Пусть $p \equiv \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования,

совпадающий с оператором Лапласа при некоторых условиях [24, 25]. Представим систему (2) в операторной форме записи:

$$\begin{cases} pI_{1\alpha.k}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega) = F_{I_{1\alpha.k}}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega), \left\| \frac{1}{p} \right. \\ pI_{1\beta.k}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega) = F_{I_{1\beta.k}}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega), \left\| \frac{1}{p} \right. \\ \dots \\ p\omega(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega) = F_{\omega}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega). \left\| \frac{1}{p} \right. \end{cases} \quad (3)$$

Сформулируем задачу Коши в интегральной постановке в операторном виде:

$$\begin{cases} I_{1\alpha.k}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{I_{1\alpha.k}}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega), \\ I_{1\beta.k}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{I_{1\beta.k}}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega), \\ \dots \\ \omega(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{\omega}(p, I_{1\alpha.k}, \dots, \omega). \end{cases} \quad (4)$$

Системы (1)–(4) описывают работу динамической системы в неподвижной, жестко связанной со статором системе координат α, β .

Векторы можно разложить на составляющие в любой координатной системе, не только декартовой. В настоящее время при решении научно-технических задач в различных прикладных областях применяются многие виды систем координат, отличных от декартовой: полярная, цилиндрическая, сферическая, на основе геометрии Лобачевского [26] или геометрии Бельтрами–Клейна [27, 28]. Одной из перспективных для исследования динамики электрических приводов является полярная система координат, которая, как и неподвижная декартовая, жестко связанная со статором система координат α, β , является двумерной. В ней движение пространственного вектора на плоскости описывается двумя координатами – модулем вектора и его фазой.

Пространственные векторы, описываемые в полярной системе координат в геометрической форме:

$$\begin{cases} \vec{U}_1 = U_{1m} \exp(j\varphi_{U_1}), \\ \vec{I}_{1.k} = I_{1.km} \exp(j\varphi_{I_{1.k}}), \\ \vec{U}_{1.k} = U_{1.km} \exp(j\varphi_{U_{1.k}}), \\ \dots \\ \vec{\Psi}_2 = \Psi_{2m} \exp(j\varphi_{\Psi_2}), \end{cases} \quad (5)$$

где U_{1m}, φ_{U_1} – модуль и фаза вектора входного напряжения; $I_{1.km}, U_{1.km}, \dots, \Psi_{2m}$ – соответствующие модули векторов переменных состояния динамической системы (1); $\varphi_{I_{1.k}}, \varphi_{U_{1.k}}, \dots, \varphi_{\Psi_2}$ – соответствующие фазы векторов переменных состояния динамической системы (1).

Исходя из разложений пространственных векторов (5), запишем СДУ с функциями правых частей в общем виде, аналогичную системе (2), только в полярных координатных осях:

$$\begin{cases} \frac{di_{1.km}(t, i_{1.km}, \dots, \omega)}{dt} = f_{i_{1.km}}(t, i_{1.km}, \dots, \omega), \\ \frac{d \tan_{I_1}(t, i_{1.km}, \dots, \omega)}{dt} = f_{\tan_{I_1}}(t, i_{1.km}, \dots, \omega), \\ \dots \\ \frac{d\psi_{2m}(t, i_{1.km}, \dots, \omega)}{dt} = f_{\psi_{2m}}(t, i_{1.km}, \dots, \omega), \\ \frac{d \tan_{\Psi_2}(t, i_{1.km}, \dots, \omega)}{dt} = f_{\tan_{\Psi_2}}(t, i_{1.km}, \dots, \omega), \\ \frac{d\omega(t, i_{1.km}, \dots, \omega)}{dt} = f_{\omega}(t, i_{1.km}, \dots, \omega). \end{cases} \quad (6)$$

В системе (6) введены переменные состояния рассматриваемой динамической системы в полярной системе координат, такие как: $i_{(n),km}(t)$, $u_{(n),km}(t)$ – модуль вектора тока и напряжения ($n=1,2,3$ первого, второго, третьего звена погружного кабеля; $\text{Tan}_{i_{(n),k}}(t)$, $\text{Tan}_{u_{(n),k}}(t)$ – тангенс фазы вектора тока и напряжения ($n=1,2,3$ первого, второго, третьего звена погружного кабеля; $\psi_{2m}(t)$ – модуль вектора потокосцепления ротора; $\text{Tan}_{\psi_1}(t)$ – тангенс фазы вектора потокосцепления ротора; $i_{1m}(t)$ – модуль вектора тока статора; $\text{Tan}_{i_1}(t)$ – тангенс фазы вектора тока статора. Для удобства положение вектора в полярной системе координат в СДУ (6) описывается тангенсом фазы, а не самой фазой.

Система уравнений (6) в операторном виде аналогична системе (4):

$$\begin{cases} I_{1k,m}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{I_{1k,m}}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega), \\ \text{Tan}_{i_{1k}}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{\text{Tan}_{i_{1k}}}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega), \\ \dots \\ \Psi_{2m}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{\Psi_{2m}}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega), \\ \text{Tan}_{\psi_2}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{\text{Tan}_{\psi_2}}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega), \\ \omega(p, I_{1k,m}, \dots, \omega) = \frac{1}{p} F_{\omega}(p, I_{1k,m}, \dots, \omega). \end{cases} \quad (7)$$

Выражение функций правых частей соответствующих переменных состояния полярных координат СДУ (6), (7) осуществляется по тригонометрическим соотношениям (рис. 1) на основе координат неподвижной статорной системы $i_{1\alpha}(t)$ и $i_{1\beta}(t)$. В свою очередь, они являются проекциями пространственного вектора тока статора \vec{I}_1 на ортогональные оси α, β декартовой системы координат.

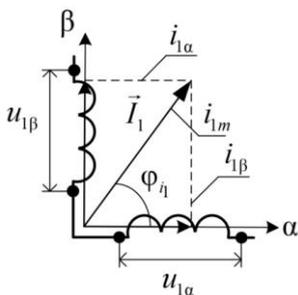


Рис. 1. Отображение тригонометрических соотношений для перехода в полярную систему координат

Fig. 1. Trigonometric relations for transition to the polar coordinate system

Из декартовых координат определяются полярные координаты $i_{1m}(t)$ и $\text{Tan}_{i_1}(t)$ следующими тригонометрическими соотношениями (предполагается, что нулевой луч полярной системы совпадает с осью α , которая совпадает с осью фазы a статора погружного двигателя):

$$\begin{cases} i_{1m}(t) = \sqrt{i_{1\alpha}^2(t) + i_{1\beta}^2(t)}, \\ \text{Tan}_{i_1}(t) = \frac{i_{1\beta}(t)}{i_{1\alpha}(t)}. \end{cases} \quad (8)$$

Переход из полярных координат к декартовым описывается соотношениями:

$$\begin{cases} i_{1\alpha}(t) = i_{1m}(t) \cos(\text{atan}[\text{Tan}_{i_1}(t)]), \\ i_{1\beta}(t) = i_{1m}(t) \sin(\text{atan}[\text{Tan}_{i_1}(t)]). \end{cases} \quad (9)$$

При расчете фазы векторов через их значения тангенса или при обратном переходе в декартовы координаты необходимо учесть положение вектора в полуплоскостях:

$$\varphi_{i_1}(t) = \begin{cases} \text{atan} \frac{i_{1\beta}(t)}{i_{1\alpha}(t)}, & i_{1\alpha}(t) > 0, \\ \pi + \text{atan} \frac{i_{1\beta}(t)}{i_{1\alpha}(t)}, & i_{1\alpha}(t) < 0, i_{1\beta}(t) \geq 0, \\ -\pi + \text{atan} \frac{i_{1\beta}(t)}{i_{1\alpha}(t)}, & i_{1\alpha}(t) < 0, i_{1\beta}(t) < 0, \\ \frac{\pi}{2}, & i_{1\alpha}(t) = 0, i_{1\beta}(t) > 0, \\ -\frac{\pi}{2}, & i_{1\alpha}(t) = 0, i_{1\beta}(t) < 0. \end{cases}$$

Таким образом, переход в полярную систему координат осуществлен на основе неподвижной системы α, β оператором перехода отдельно как для правой части дифференциальных уравнений системы (1), так и для левой части.

В переходах из декартовых координат α, β в полярные по выражению (8), и наоборот (9), могут быть рассмотрены любые пространственные вектора переменных состояния.

Математическое описание динамической системы «длинный кабель – погружной асинхронный двигатель с заторможенным ротором» в полярной системе координат

В процессе заклинивания погружного насоса считается, что реактивный момент сопротивления гарантированно больше возможного крутящего момента, развиваемого двигателем. В таком случае принимается, что частота вращения АД постоянна и равна нулю $\omega(t)=0$. Тогда следует исключить составляющие СДУ (1), зависящие от $\omega(t)$, в системе:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1\alpha.k}(t)}{dt} = a_1 i_{1\alpha.k}(t) + a_2 u_{1\alpha.k}(t) + bu_{1\alpha}(t), \\ \frac{di_{1\beta.k}(t)}{dt} = a_1 i_{1\beta.k}(t) + a_2 u_{1\beta.k}(t) + bu_{1\beta}(t), \\ \dots \\ \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} = a_7 u_{3\alpha.k}(t) + a_8 i_{1\alpha}(t) + a_9 \Psi_{2\alpha}(t), \\ \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} = a_7 u_{3\beta.k}(t) + a_8 i_{1\beta}(t) + a_9 \Psi_{2\beta}(t), \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} = a_{10} i_{1\alpha}(t) + a_{11} \Psi_{2\alpha}(t), \\ \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} = a_{10} i_{1\beta}(t) + a_{11} \Psi_{2\beta}(t). \end{array} \right. \quad (10)$$

В СДУ (10) компоненты пространственных векторов переменных состояния по оси α зависят только от составляющих векторов по оси α . Это наблюдается и с компонентами векторов по оси β . В таком случае поведение динамической системы аналогично описанию процессов, протекающих в двух независимых ортогональных нагруженных однофазных трансформаторах в осях α , β , питаемых от длинного кабеля. Поэтому рассматриваемая система разбивается на две независимые системы уравнений, представленные в матричном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_\alpha(t) &= AX_\alpha(t) + B_\alpha(t), \\ \frac{d}{dt} X_\beta(t) &= AX_\beta(t) + B_\beta(t), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} X_\alpha(t) &= [i_{1\alpha.k}(t), u_{1\alpha.k}(t), \dots, i_{1\alpha}(t), \Psi_{2\alpha}(t)]^T, \\ X_\beta(t) &= [i_{1\beta.k}(t), u_{1\beta.k}(t), \dots, i_{1\beta}(t), \Psi_{2\beta}(t)]^T \end{aligned}$$

– матрица-вектор переменных состояния рассматриваемой динамической системы по оси α , β соответственно;

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_4 & a_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_6 & a_1 & a_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & a_4 & a_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_6 & a_1 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_3 & a_4 & a_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 & a_8 & a_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{10} & a_{11} \end{pmatrix}$$

– матрица коэффициентов;

$$B_\alpha(t) = [bu_{1\alpha}(t), 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T,$$

$$B_\beta(t) = [bu_{1\beta}(t), 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

– матрица-вектор свободных членов по оси α , β соответственно.

Представим решение систем (11) в виде:

$$X_\alpha(t) = [F(t) - E] A^{-1} B_\alpha(t),$$

$$X_\beta(t) = [F(t) - E] A^{-1} B_\beta(t),$$

где $F(t) = \sum_{n=1}^8 \left[\frac{|D_n|}{|D|} A^{n-1} \right]$ – матричная функция, которая находится с помощью определителей Вандермонда [29]; E – единичная матрица; A^{-1} – обратная матрица.

Полный определитель $|D|$ и частные $|D_1(t)|, \dots, |D_n(t)|$ определители Вандермонда находятся с помощью собственных значений $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ матрицы собственной динамики A :

$$|D| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{n-1} & \lambda_2^{n-1} & \dots & \lambda_n^{n-1} \end{vmatrix},$$

$$|D_1(t)| = \begin{vmatrix} e^{\lambda_1} & e^{\lambda_2} & \dots & e^{\lambda_n} \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{n-1} & \lambda_2^{n-1} & \dots & \lambda_n^{n-1} \end{vmatrix},$$

$$|D_2(t)| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{\lambda_1} & e^{\lambda_2} & \dots & e^{\lambda_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{n-1} & \lambda_2^{n-1} & \dots & \lambda_n^{n-1} \end{vmatrix},$$

$$|D_n(t)| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{\lambda_1} & e^{\lambda_2} & \dots & e^{\lambda_n} \end{vmatrix}.$$

Собственные значения λ_n определены по уравнению:

$$|A - \lambda E| = 0.$$

Оригиналы проекций переменных состояния динамической системы «длинный кабель – погружной двигатель» по оси α , β представляют собой сумму элементарных функций:

$$\begin{aligned} x_\alpha(t) &= bU_{1m} \sin(\omega_1 t) f(t, \lambda), \\ x_\beta(t) &= bU_{1m} \cos(\omega_1 t) f(t, \lambda), \end{aligned} \quad (12)$$

$$f(t, \lambda) = \sum_{i=1}^k \left\{ e^{\alpha_i t} \left[k_{1i} \cos(\beta_i t) + k_{2i} \sin(\beta_i t) \right] \right\} + \sum_{j=1}^m k_{3j} e^{\lambda_j t} + k_4,$$

где $\omega_1=2\pi f_1$ – круговая частота питающего напряжения; k – количество комплексно-сопряженных пар собственных значений $\lambda_i=\alpha_i+j\beta_i$ матрицы собственной динамики A ; m – количество вещественных собственных значений λ_j ; k_{1i} , k_{2i} , k_{3j} , k_4 – коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения кабеля и двигателя.

Таблица 1. Параметры схемы замещения нефтепогружного кабеля КПКБ-90 3×16 [30]
Table 1. Parameters of substitution scheme of oil-submersible cable KPKB-90 3×16 [30]

Погонная емкость, C_0 , Ф/км Linear capacitance, C_0 , F/km	Погонная индуктивность, L_0 , Гн/км Linear inductance, L_0 , H/km	Погонная проводимость, g_0 , См/км Linear conductive, g_0 , Ω^{-1} /km	Погонное сопротивление, r_0 , Ом/км Linear resistance, r_0 , Ω /km
$2,125 \cdot 10^{-7}$	$300,676 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	1,204

Для погружного двигателя марки ЭД-63-117, питающегося через погружной кабель КПКБ-90 3×16, получены годографы Парка–Горева переменных состояния (рис. 2–5) рассматриваемой динамической системы. Параметры схем замещения нефтепогружного кабеля и двигателя, полученные на экспериментальном стенде в работе [30], приведены, соответственно, в табл. 1, 2.

Таблица 2. Параметры схемы замещения погружного асинхронного двигателя ЭД-63-117 [30]
Table 2. Parameters of substitution scheme of the submersible induction motor ED-63-117 [30]

Параметр Parameter	Значение Value
Номинальное напряжение, В/Rated voltage, V	1040
Активное сопротивление обмотки статора, Ом Active resistance of the stator winding, Ohm	1,0
Приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора, Ом Active resistance of the rotor winding induced to the stator, Ohm	0,676
Индуктивность обмотки статора, Гн Inductance of the stator winding, H	$3,17 \cdot 10^{-3}$
Приведенная к статору индуктивность обмотки ротора, Гн Inductance of the rotor winding induced to the stator, H	$3,17 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность контура намагничивания, Гн Inductance of the magnetization circuit, H	0,676

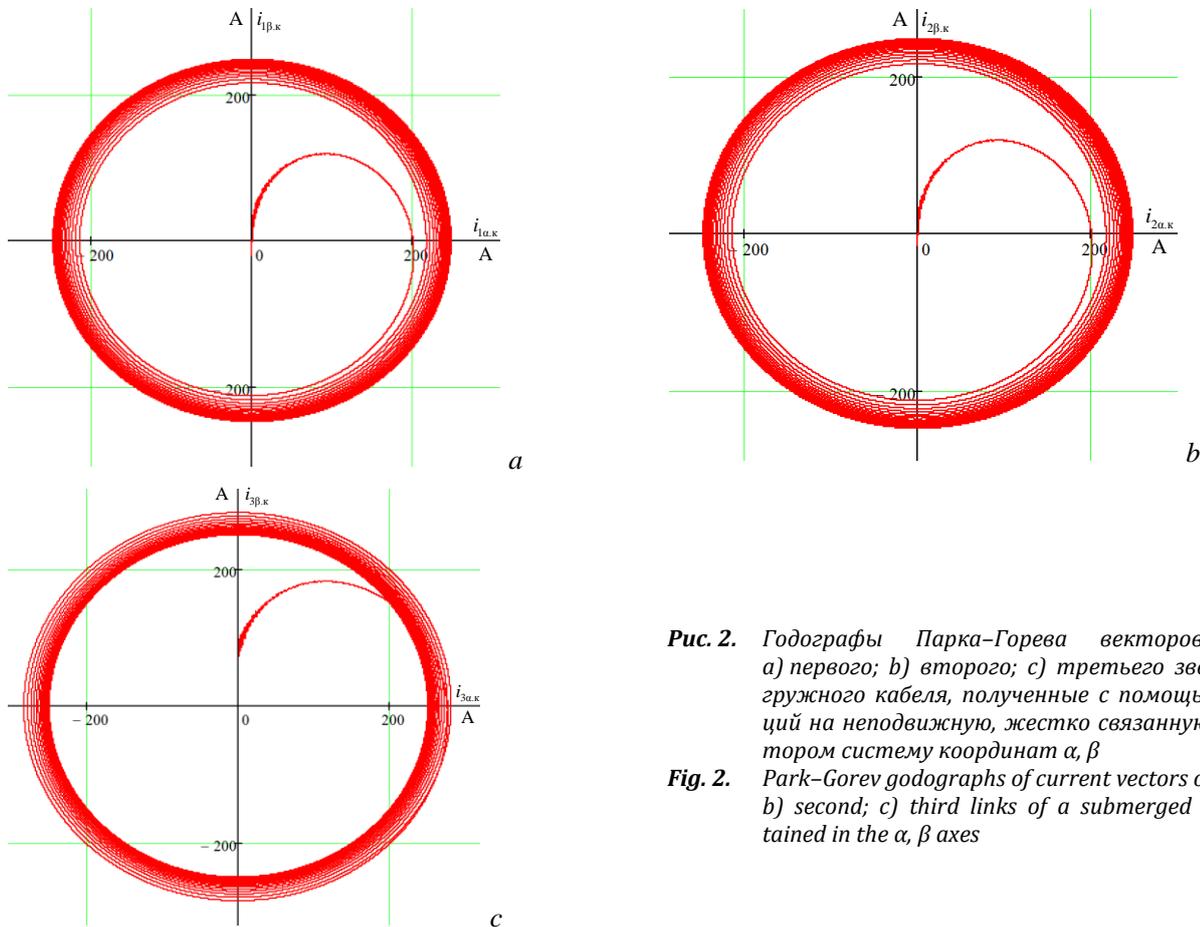


Рис. 2. Годографы Парка–Горева векторов тока: а) первого; б) второго; в) третьего звеньев погружного кабеля, полученные с помощью проекций на неподвижную, жестко связанную со статором систему координат α, β
Fig. 2. Park–Gorev godographs of current vectors of: a) first; b) second; c) third links of a submerged cable obtained in the α, β axes

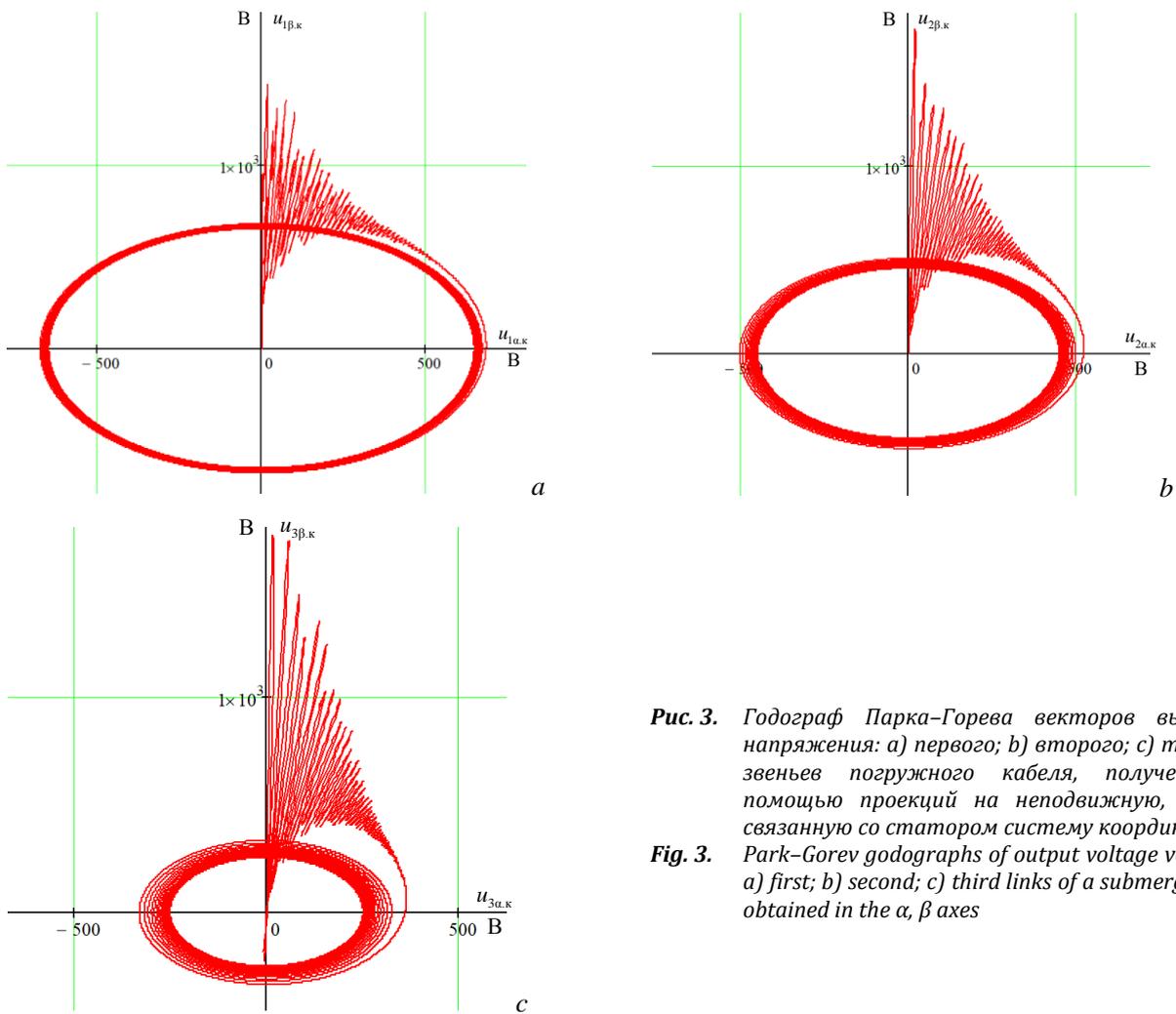


Рис. 3. Годограф Парка–Горева векторов выходного напряжения: а) первого; б) второго; в) третьего звеньев погружного кабеля, полученные с помощью проекций на неподвижную, жестко связанную со статором систему координат α, β
Fig. 3. Park–Gorev godographs of output voltage vectors of: a) first; b) second; c) third links of a submerged cable obtained in the α, β axes

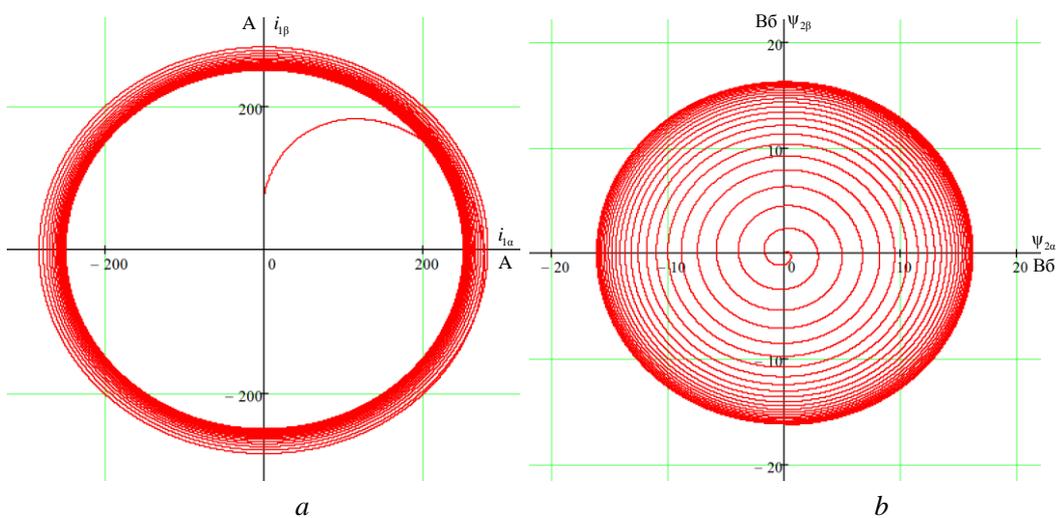


Рис. 4. Годограф Парка–Горева векторов: а) тока статора; б) потокосцепления ротора погружного двигателя, полученные с помощью проекций на неподвижную, жестко связанную со статором систему координат α, β
Fig. 4. Park–Gorev godographs of vectors of: a) stator current; b) rotor flux-coupling of the submersible motor obtained in the α, β axes

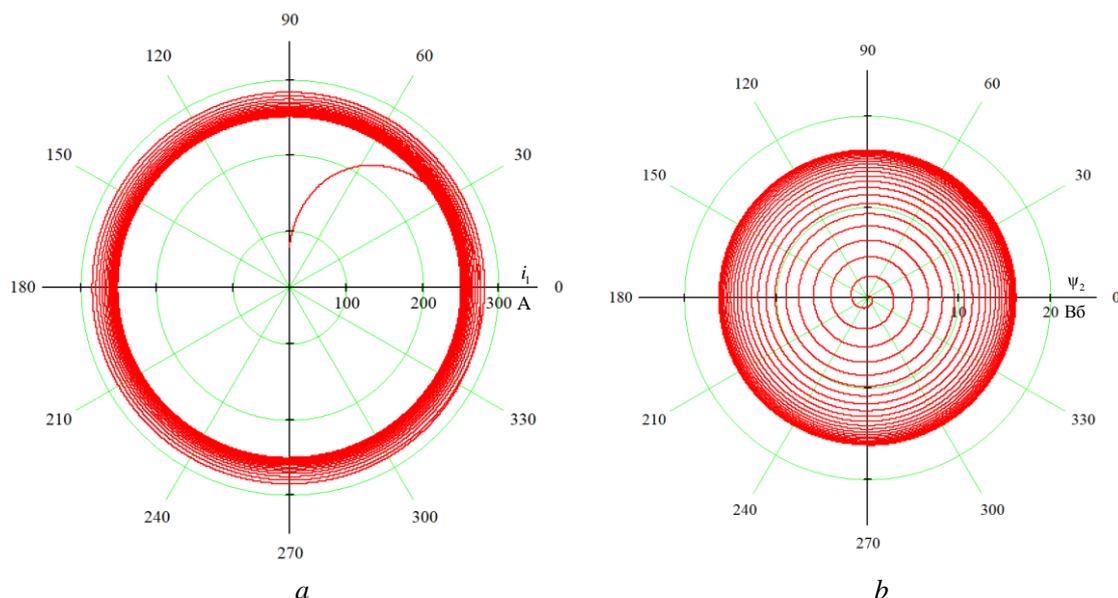


Рис. 5. Годограф Парка-Горева векторов: а) тока статора; б) потокосцепления ротора, полученные с помощью полярных координат

Fig. 5. Park-Gorev godographs of vectors of: a) stator current; b) rotor flux-coupling obtained using polar coordinates

Осуществим переход в полярную систему координат по соотношениям (8) с помощью найденных оригиналов декартовых проекций (12) векторов переменного состояния по осям α , β . На рис. 5 приведены годографы векторов тока статора и потокосцепления ротора, участвующие в векторном произведении для расчета крутящего момента.

По годографам выходного напряжения (рис. 3) по мере прохождения звеньев кабеля в установившемся состоянии наблюдается падение напряжения на активном сопротивлении жилы кабеля с различной амплитудой переходного процесса. Длинный погружной кабель влияет на амплитуду и фазовый сдвиг вектора тока (рис. 2, 3), а также на его спектральный состав. Данное явление требует дальнейших исследований, особенно при использовании частотного регулирования с помощью широтно-импульсной модуляции. Годографы Парка-Горева моментобразующих векторов тока статора и потокосцепления ротора в полярной системе координат (рис. 5) идентичны аналогичным годографам (рис. 4), полученным с помощью декартовых координат на оси α , β . Это подтверждает верность перехода в полярную систему координат из неподвижной, жестко связанной со статором системы α , β , и возможность дальнейшего применения в системах управления и диагностики электроприводами УЭЦН.

Заключение

1. Разработана аналитическая модель динамической системы «длинный кабель – погружной

асинхронный двигатель с заторможенным ротором» в неподвижной, жестко связанной со статором системе α , β и в полярной системе координат. Такая настраиваемая модель может быть использована в качестве основы наблюдателя для бездатчикового энергоэффективного векторного электропривода с применением принципов фазовой дискриминации с учетом влияния процессов в питающей УЭЦН кабельной линии, что послужит для совершенствования систем питания и автоматического управления УЭЦН и позволит увеличить рентабельность добычи нефти в низко- и среднедебетовых скважинах, которые переводятся на режим циклической эксплуатации.

2. Разработанная аналитическая модель погружного асинхронного двигателя отличается от известных тем, что представлена в системе координат, отличной от декартовой, а именно в полярной системе, а кабельная линия представлена редуцированной моделью с сосредоточенными параметрами. Внешний вид и характер полученных с помощью разных математических моделей – декартовой и полярной, годографов Парка-Горева векторов тока статора и потокосцепления ротора, подтверждает верность перехода в полярную систему координат из неподвижной, жестко связанной со статором системы α , β , и возможность дальнейшего применения в системах управления и диагностики электроприводами УЭЦН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалетдинов Р.С. Механизованная добыча нефти: новые вызовы – новые решения // Деловой журн. Neftegaz.RU. – 2023. – № 4 (136). – С. 42–47.
2. World Energy Outlook 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (дата обращения 15.09.2023).
3. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (дата обращения 15.09.2023).
4. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния, путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало- и среднедебитных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 220–231. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4349.
5. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submersible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian) / A.A. Pashali, R.S. Khalifin, D.V. Silnov, A.S. Topolnikov, B.M. Latypov // OIJ. – 2021. – P. 92–96. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-4-92-96.
6. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачева, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 54–58. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58
7. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing / R. Iudin, A. Petrochenkov, B. Krause, E. Solodkiy, G. Panchenko // 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. – Riga, Latvia, 2021. – P. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
8. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
9. Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – Miami, FL, USA, 2017. – P. 1–7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
10. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable / Y. Deng, Z. Liang, P. Xi, X. Zuo // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2019. – V. 14. – P. 219–229. DOI: 10.1007/s42835-018-00023-7.
11. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular velocity's neural network observer of the electric drive of TVR-IM Type implemented in software environment LabVIEW // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, Russia, 2016. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012005.
12. Bose B K. Modern power electronics and AC drives. 1st ed. – USA: New Jersey, Prentice Hall, 2001. – 736 p.
13. Поляков В.Н. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов: концепция, задачи оптимизации, математические модели и алгоритмы управления: дис. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург, 2009. – 510 с.
14. Influence of motor cable on common-mode currents in an inverter-fed motor drive system / Pk. Xie, Jz. Lu, Gz. Chen, H. Chen // Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering. – 2018. – V. 19. – P. 273–284. URL: <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601518>.
15. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
16. Лазовский Э.Н. Математические модели асинхронной машины как компонента электропривода в полярных координатах: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2016. – 208 с.
17. Бубнов А.В. Анализ влияния алгоритма работы импульсного частотно-фазового дискриминатора на динамику электропривода с фазовой синхронизацией // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 139–143.
18. Бубнов А.В., Чудинов А.Н., Емашов В.А. Эффективный способ регулирования электропривода с фазовой синхронизацией // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 5. – С. 46–49.
19. Фалеев М.В., Ширяев А.Н. Развитие фазовых дискриминаторов для гибридных электроприводов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – № 3. – С. 1–4.
20. Разработка наблюдателя полного порядка с оперативным мониторингом момента сопротивления для погружных асинхронных электродвигателей / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, И.Г. Слепнёв, В.И. Полищук // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 118–126.
21. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
22. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Selvamathi R. Electric motor drives and their applications with simulation practices. – USA: Cambridge, Academic Press, 2022. – 507 p.
23. Раков И.В., Глазырин А.С., Кладиев С.Н. Разработка и настройка наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «кабельная линия – асинхронный двигатель» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 219–231.
24. Porcelli M., Simoncini V. Numerical solution of a class of quasi-linear matrix equations // Linear Algebra and its Applications. – 2023. – V. 664. – P. 349–368. DOI: 10.48550/arXiv.2209.00897.
25. Strang G. Introduction to linear algebra. 5th ed. – USA: Wellesley-Cambridge Press, 2021. – 584 p.
26. Лобачевский Н.И. О началах геометрии // Казанский вестник. – 1829–1830. – № 25–29. – С. 178–636.
27. Beltrami Eu. Saggio di interpretazione della geometria non-Euclidea // Giornale di Matematiche. – 1868. – V. VI. – P. 284–322.
28. Klein F. Ueber die sogenannte Nicht-Euklidische Geometrie // Mathematische Annalen. – 1871. – V. 4. – P. 573–625.

29. Bidiagonal decompositions of Vandermonde-type matrices of arbitrary rank / J. Delgado, P. Koev, A. Marco, J. Martínez, J.M. Peña, P. Persson, S. Spasov // *Journal of Computational and Applied Mathematics* – 2023. – V. 426. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.cam.2023.115064.
30. Переходные процессы в электротехническом комплексе добывающей скважины с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, В.А. Копырин, В.В. Тимошкин, С.Н. Кладиев, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, Ф.А. Лосев, А.П. Леонов, Е.И. Попов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2023. – Т. 334. – № 5. – С. 168–180.

REFERENCES

1. Kamaletdinov R.S. Mekhanizirovannaya dobycha nefiti: novye vyzovy – novye resheniya [Mechanized oil production: new challenges – new solutions]. *Business magazine Neftegaz.RU*, 2023, no. 4 (136), pp. 42–47.
2. *World Energy Outlook 2023*. Available at: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (accessed 15 September 2023).
3. *Prognoz dolgosrochnogo sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya RF na period do 2030 goda* [Forecast of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2030]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/41d457592e04b76338b7.pdf> (accessed 15 September 2023).
4. Kladiev S.N. Review and critical analysis of the current state and ways of developing the technological process of oil production by an electric drive in intermittent modes of operation of low- and medium-rate wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 334, no. 8, pp. 220–231. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4349.
5. Pashali A.A., Khalifin R.S., Silnov D.V., Topolnikov A.S., Latypov B.M. On the optimization of the periodic mode of well production, which is operated by submersible electric pumps in Rosneft Oil Company (Russian). *OIJ*, 2021, pp. 92–96. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-4-92-96.
6. Likhacheva E.A., Ostrovskiy V.G., Lykova N.A., Musinskiy A.N., Baidarov P.A. Oil submersible pumps reliability during cyclic operation. *PRoneft. Professionally about Oil*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 54–58. In Rus. DOI: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58.
7. Iudin R., Petrochenkov A., Krause B., Solodkiy E., Panchenko G. Electrical submersible pump complex model for sensorless parameters observing. *2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*. Riga, Latvia, 2021. pp. 1–5. DOI: 10.1109/RTUCON53541.2021.9711743.
8. Rabbi S.F., Constantine M., Rahman M.A. A novel sensorless IPM motor drive for electric submersible pumps. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. pp. 1–8. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002199.
9. Hussain H.A., Anvari B., Toliyat H.A. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Miami, FL, USA, 2017. pp. 1–7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
10. Deng Y., Liang Z., Xi P., Zuo X. Improved speed sensorless vector control algorithm of induction motor based on long cable. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2019, vol. 14, pp. 219–229. DOI: 10.1007/s42835-018-00023-7.
11. Kozlova L., Bolovin E., Payuk L. Angular velocity's neural network observer of the electric drive of TVR-IM type implemented in software environment LabVIEW. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk, Russia, 2016. pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/132/1/012005.
12. Bose B K. *Modern power electronics and AC drives*. 1st ed. USA, New Jersey, Prentice Hall, 2001. 736 p.
13. Polyakov V.N. *Energoeffektivnye rezhimy reguliruemyykh elektroprivodov: kontseptsiya, zadachi optimizatsii, matematicheskie modeli i algoritmy upravleniya*. Dis. Dokt. nauk [Energy-efficient modes of adjustable electric drives: concept, optimization problems, mathematical models and control algorithms. Dr. Dis.]. Ekaterinburg, 2009. 510 p.
14. Xie Pk., Lu Jz., Chen Gz., Chen H. Influence of motor cable on common-mode currents in an inverter-fed motor drive system. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2018, vol. 19, pp. 273–284. URL: <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601518>.
15. Udut L.S., Maltseva O.P., Koyain N.V. *Proektirovanie i issledovanie avtomatizirovannykh elektroprivodov. Ch. 8. Asinkhronny chastotno-reguliruemyy elektroprivod* [Design and research of automated electric drives. P. 8. Induction frequency-controlled electric drive]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 648 p.
16. Lazovskiy E.N. *Matematicheskie modeli asinkhronnoy mashiny kak komponenta elektroprivoda v polyarnykh koordinatakh*. Dis. Kand. nauk [Mathematical models of an asynchronous machine as a component of an electric drive in polar coordinates. Cand. Dis.]. Krasnoyarsk, 2016. 208 p.
17. Bubnov A.V. Analysis of the influence of the pulse frequency-phase discriminator operating algorithm on the dynamics of an electric drive with phase synchronization. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 6, pp. 139–143. In Rus.
18. Bubnov A.V., Chudinov A.N., Emashov V.A. Effektivnyy sposob regulirovaniya elektroprivoda s fazovoy sinkhronizatsiyey [An effective way to control an electric drive with phase synchronization]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2011, no. 5, pp. 46–49.
19. Faleev M.V., Shiryaev A.N. Razvitie fazovykh diskriminatorov dlya gibridnykh elektroprivodov [Development of phase discriminators for hybrid electric drives]. *Vestnik IGEU*, 2008, no. 3, pp. 1–4.
20. Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Afanasiev K.S., Timoshkin V.V., Slepnev I.G., Polishchuk V.I., Halasz S. Design of full order observer with real time monitoring of load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 118–126. In Rus.
21. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000. 654 p.
22. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Selvamathi R. *Electric motor drives and their applications with simulation practices*. USA, Cambridge, Academic Press, 2022. 507 p.

23. Rakov I.V., Glazyrin A.S., Kladiyev S.N. Development and configuration of a full-order observer for «cable line – induction motor» electrical complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 219–231. In Rus.
24. Porcelli M., Simoncini V. Numerical solution of a class of quasi-linear matrix equations. *Linear Algebra and its Applications*, 2023, vol. 664, pp. 349–368. DOI: 10.48550/arXiv.2209.00897.
25. Strang G. *Introduction to linear algebra*. 5th ed. USA, Wellesley-Cambridge Press, 2021. 584 p.
26. Lobachevskiy N.I. O nachalakh geometrii [On the principles of geometry]. *Kazanskiy vestnik*, 1829–1830, no. 25–29, pp. 178–636.
27. Beltrami Eu. Saggio di interpretazione della geometria non-euclidea. [Experience in interpreting non-Euclidean geometry]. *Giornale di Matematiche*, 1868, vol. VI, pp. 284–322.
28. Klein F. Ueber die sogenannte Nicht-Euklidische Geometrie [About the so-called non-Euclidean geometry]. *Mathematische Annalen*, 1871, vol. 4, pp. 573–625.
29. Delgado J., Koev P., Marco A., Martinez J., Peña J.M., Persson P., Spasov S. Bidiagonal decompositions of Vandermonde-type matrices of arbitrary rank. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2023, vol. 426, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.cam.2023.115064.
30. Glazyrin A.S., Isaev Y.N., Kopyrin V.A., Timoskin V.V., Kladiyev S.N., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Losev F.A., Leonov A.P., Popov E.I. Transient processes in electrical complex of production well with downhole compensator of reactive power. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 5, pp. 168–180. In Rus.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Савельевич Глазырин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. asglazyrin@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4138-598>

Иван Альбертович Набунский, исполнительный директор ООО «Алрино», Россия, 634009, г. Томск, ул. Карла Маркса, 36. vano_18.96@mail.ru

Семен Семенович Попов, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск, пр. Фрунзе, 119е. ssp14@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>

Евгений Владимирович Боловин, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО ИНТ АО «ЭлеСи», Россия, 634021, г. Томск, ул. Алтайская, 161А. orange@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>

Вадим Владимирович Тимошкин, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. timoshkinvv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5116-5508>

Сергей Николаевич Кладиев, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. kladiyev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. asglazyrin@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4138-598>

Ivan A. Nabunskiy, Executive Director, LLC «Alrino», 36, Karl Marx street, Tomsk, 634009, Russian Federation. vano_18.96@mail.ru

Semen S. Popov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Software Engineer «NPF Mechatronica-Pro» LTD, 119e, Frunze avenue, Tomsk, 634513, Russian Federation. ssp14@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>

Evgeniy V. Bolovin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia; Software Engineer, LLC «INT» of JSC «EleSy», 161A, Altaiskaya street, Tomsk, 634021, Russian Federation. orange@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8483-8999>

Vadim V. Timoshkin, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. timoshkinvv@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5116-5508>

Sergey N. Kladiyev, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. kladiyev@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>

Alexander A. Filipas, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Александр Александрович Филипас, кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. filipas@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5376-5416>

Рустам Нуриманович Хамитов, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Института промышленных технологий и инжиниринга, Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; профессор кафедры электрической техники Энергетического института, Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11. apple_27@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. kopyrinva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>

Евгений Игоревич Попов, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. popov72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>

Владимир Захарович Ковалев, доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. vz_kovalev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; Professor, Omsk State Technical University, 11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russian Federation. apple_27@mail.ru;

<https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., Associate Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. kopyrinva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>

Evgeniy I. Popov, Assistant, Tyumen Industrial University, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. popov72@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. vz_kovalev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>

Поступила в редакцию: 10.10.2023

Поступила после рецензирования: 15.12.2023

Принята к публикации: 20.12.2023

Received: 10.10.2023

Revised: 15.12.2023

Accepted: 20.12.2023