УДК 621.313:622.276.53
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5376
Шифр специальности ВАК: 2.3.1
Обзорная статья

Оценка влияния потерь в стали статора на энергетические показатели погружного электродвигателя при стохастической процедуре сборки послеремонтного погружного электродвигателя

В.З. Ковалев[1]✉, А.С. Глазырин[1,2], О.В. Архипова[1], Э.И. Хусаинов[1], В.А. Копырин[3], Е.И. Попов[3], Р.Н. Хамитов[3], А.А. Филипас[2], С.С. Попов[2,4], Е.В. Боловин[2,3], Е.А. Беляускене[2,3]

[1] Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск
[2] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск
[3] Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень
[4] ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск

✉vz_kovalev@mail.ru

Аннотация. ***Актуальность***. По ХМАО-Югре имеется более 89 тысяч единиц общего эксплуатационного фонда нефтяных скважин. Это позволяет стабильно добывать около 41 % российской нефти. В настоящий период значительная часть эксплуатируемых нефтяных месторождений находится в категории трудноизвлекаемых. Это составляет более 70 % от общего объема фонда скважин. Из них большая часть действующего добывающего фонда в качестве инструмента нефтедобычи использует установку электроцентробежного насоса с асинхронным погружным электродвигателем. Технологические вызовы в настоящий период требуют решения задач реновации имеющегося фонда нефтяных скважин. Одна из таких задач – увеличение наработки на отказ послеремонтных погружных электродвигателей. Поскольку в настоящее время после ремонта погружного электродвигателя его показатель наработки на отказ, как правило, снижается. В свою очередь, одна из основных вариативных компонент, послеремонтного погружного электродвигателя, а именно пакеты ротора с короткозамкнутой обмоткой, обладает значительной дисперсией их электромагнитных свойств. Объяснение этому факту лежит в особенностях технологий изготовления и обслуживания при ремонте пакета ротора. Также известно, что после ремонта существуют значительные вариации величины магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне активной части статора и ротора. Указанные выше обстоятельства позволяют предложить следующую гипотезу. ***Гипотеза*** исследования состоит в том, что в операционной партии пакетов ротора с короткозамкнутой обмоткой их электромагнитные параметры обладают значительной дисперсией. Взаимодействие и взаимовлияние таких пакетов ротора в сборке послеремонтного погружного электродвигателя между собой и с активной частью статора приводят к высокой вероятности формирования в магнитопроводе статора участков с локальным аномально высоким выделением энергии вихревых токов и энергии перемагничивания. Соответственно формируются участки с локальным аномально высоким выделением тепловой энергии в стали статора. Появление в стали статора областей, с указанными выше свойствами, приводит к ускоренной деградации прилегающих локальных участков изоляции обмотки статора. Указанное явление создает предпосылки к возникновению «пожара в стали» статора. Это, в свою очередь, становится предпосылкой для отказа всего погружного электродвигателя. ***Цель.*** Оценить влияние вариаций электромагнитных параметров пакетов ротора в сочетании с вариациями параметров цепи намагничивания на значения интегральных и локальных энергетических показателей погружного электродвигателя. ***Методы.*** Системный анализ, статистический анализ, теория электрических машин, теория многодвигательных электроприводов, методы планирования эксперимента, методы идентификации параметров электроприводов. ***Результаты и выводы.*** Предложена математическая модель асинхронного погружного электродвигателя как совокупности взаимодействующих и взаимовлияющих математических моделей элементарных электрических машин в рамках теории многодвигательного электропривода. Дано определение понятия элементарная электрическая машина. Показана вероятность появления вдоль расточки статора участков с локальным аномально высоким выделением энергии вихревых токов и энергии перемагничивания с последующим преобразованием в тепловую энергию. Определены условия появления этого эффекта. Показана принципиальная рассогласованность диапазонов локальных тепловыделений в активной части погружного электродвигателя и интегральных диапазонов, регистрируемых внешними устройствами, что приводит к ошибочному прогнозу состояний изоляции обмоток статора и «железа» статора и ротора.

Ключевые слова: асинхронный послеремонтный погружной электродвигатель, описательная статистика, методы идентификации систем, прогноз состояния изоляции обмоток статора, пожар в стали магнитопровода, элементарная электрическая машина, пакет ротора

Благодарности: Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема: «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент», код темы: FENG-2023-0001).

Для цитирования: Оценка влияния потерь в стали статора на энергетические показатели погружного электродвигателя при стохастической процедуре сборки послеремонтного погружного электродвигателя / В.З. Ковалев, А.С. Глазырин, О.В. Архипова, Э.И. Хусаинов, В.А. Копырин, Е.И. Попов, Р.Н. Хамитов, А.А. Филипас, С.С. Попов, Е.В. Боловин, Е.А. Беляускене // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 10. – С. 248–260. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5376

UDC 621.313:622.276.53
DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5376
Review article

Assessment of the impact of stator iron losses on the energy performance of a submersible electric motor under a stochastic assembly procedure of a post-repair submersible electric motor

V.Z. Kovalev[1]✉, A.S. Glazyrin[1,2], O.V. Arkhipova[1], E.I. Khusainov[1], V.A. Kopyrin[3], E.I. Popov[3], R.N. Khamitov[3], A.A. Filipas[2], S.S. Popov[2,4], E.V. Bolovin[2,3], E.A. Beliauskene[2,3]

[1] Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation
[2] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
[3] Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation
[4] «NPF Mechatronica-Pro» LTD, Tomsk, Russian Federation

✉vz_kovalev@mail.ru

Abstract. ***Relevance.*** In the Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra, there are more than 89 thousand units of the total operational fund of oil wells. This allows for stable production of about 41% of Russian oil. At present, a significant part of the exploited oil fields falls into the category of hard-to-recover reserves, which accounts for more than 70% of the total well fund. Most of the active production fund uses submersible electric motor units with induction submersible electric motor, as the tool for oil extraction. The technological challenges that have emerged at present require solutions for the renovation of the existing oil well fund. One such challenge is increasing the time between failures of post-repair submersible electric motor. Since currently after repair, the time between failures of an submersible electric motor usually decreases. In its turn, one of the main variable components of a post-repair submersible electric motor, namely rotor packages with a squirrel-cage winding, exhibit significant dispersion in their electromagnetic properties. The explanation for this lies in the specific manufacturing and maintenance technologies used during repairing rotor packages. It is known as well that post-repair show considerable variations in the magnetic flux density in the tooth-slot zone of the active part of their stator and rotor. The aforementioned circumstances allow us to propose the following hypothesis. ***Hypothesis.*** Within an operational batch of rotor packages with a short-circuited winding their electromagnetic parameters exhibit significant dispersion. The interaction and mutual influence of such rotor packages assemblies in a post-repair submersible electric motor, both among themselves and with the stator active part, lead to a high probability of forming areas in the stator core with locally abnormally high dissipation of eddy current and magnetization energy. Consequently, areas with locally abnormally high heat release develop in the stator iron. The appearance of areas with the above-mentioned properties in the stator iron leads to accelerated degradation of the adjacent local sections of the stator winding insulation. This phenomenon creates the conditions for the occurrence of a "fire in the stator iron". This, in its turn, creates the potential for the failure of the entire submersible electric motor. ***Aim.*** To assess the impact of variations in the electromagnetic parameters of rotor packages, combined with variations in the magnetizing circuit parameters, on the values of the integral and local energy indicators of the submersible electric motor. ***Methods.*** Systems analysis, statistical analysis, theory of electrical machines, theory of multi-motor electric drives, design of experiments, methods for identifying electric drive parameters. ***Results and conclusions***. The authors have proposed the mathematical model of the induction submersible electric motor as a set of interacting and interdependent mathematical models of elementary electrical machines within the framework of multi-motor electric drive theory. A definition of the concept of an elementary electrical machine is provided. The paper demonstrates the probability of occurrences along the stator bore of areas with locally abnormally high energy release from eddy currents and magnetization energy, subsequently converted into thermal energy in the stator iron. The authors determined the conditions under which this effect arises. The paper shows the fundamental discrepancy between the ranges of local heat release in the active part of the

submersible electric motor and the ranges detected by external devices. This leads to erroneous predictions of the insulation states of the stator windings and the stator and rotor «iron».

Keywords: induction post-repair submersible electric motor, descriptive statistics, system identification methods, forecast of stator winding insulation condition, fire in magnetic conductor iron, elementary electric machine, rotor package

Acknowledgments: This research was carried within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic "Predictive management of energy flows of electricity-generating complexes in the Arctic and the Far North, under stochastic characteristics of electricity consumption and generation: theory, synthesis, experiment", topic code FENG-2023-0001).

For citation: Kovalev V.Z., Glazyrin A.S., Arkhipova O.V., Khusainov E.I., Kopyrin V.A., Popov E.I., Khamitov R.N., Filipas A.A., Popov S.S., Bolovin E.V., Beliauskene E.A. Assessment of the impact of stator iron losses on the energy performance of a submersible electric motor under a stochastic assembly procedure of a post-repair submersible electric motor *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 10, pp. 248–260. DOI: 10.18799/24131830/2025/10/5376

Введение

Анализ причин аварий погружных электродвигателей

Согласно статистическим исследованиям причин отказов асинхронных погружных электродвигателей (ПЭД) по числу отказов, на первом месте – пробой изоляции в пазу обмотки статора – 45 %, на втором – пробой изоляции в токовводе – 19,7 %, на третьем – пробой изоляции в лобовой части обмотки статора – 6,8 % [1].

Как правило, данное явление вызвано превышением допустимой температуры эксплуатации изоляции обмотки статора. Под воздействием высоких температур ускоряется термическая деградация изоляции, что приводит к ухудшению ее изоляционных свойств, а в наиболее тяжелых случаях – к ее расплавлению [1–3].

Известна зависимость, в соответствии с которой увеличение температуры изоляции на каждые 8 °С приводит к ускорению термической деградации изоляции вдвое. Данная закономерность носит название «Правило 8 градусов», или «Правило Монтзингера» [4].

Отказ ПЭД приводит к большим экономическим и экологическим издержкам, связанным с подъемом погружного оборудования на поверхность, сопровождающимся временной потерей герметичности скважины, ремонтом и наладкой, а также простоем скважины [1, 5, 6]. При этом наработка на отказ (ННО) ПЭД после ремонта, как правило, снижается [7–9].

Соответственно, снижение количества отказов ПЭД является актуальной, важной народнохозяйственной задачей, решение которой позволит существенно снизить экономические и экологические издержки в процессе нефтедобычи.

Термограмма сборки послеремонтного погружного электродвигателя

В ходе выяснения структуры внутренних (локальных) распределений температур в асинхронном погружном электродвигателе в работе [10] описан следующий эксперимент.

1. Испытанию подвергся ПЭД 117-го габарита, который содержит шесть короткозамкнутых пакетов ротора на валу.
2. Режим работы – холостой ход погружного асинхронного электродвигателя.
3. Короткозамкнутые пакеты ротора (ПР) подбирались с существенным разбросом электромагнитных параметров.
4. Установка, на которой проводилось испытание ПЭД, типового исполнения, применяемая в условиях ремонтного предприятия.
5. После работы в режиме холостого хода ротор ПЭД в сборе извлекался из машины, и производилась его тепловизионная съемка (рис. 1).

На термограмме ротора ПЭД (рис. 1) отчетливо наблюдается неравномерный нагрев ПР на валу.

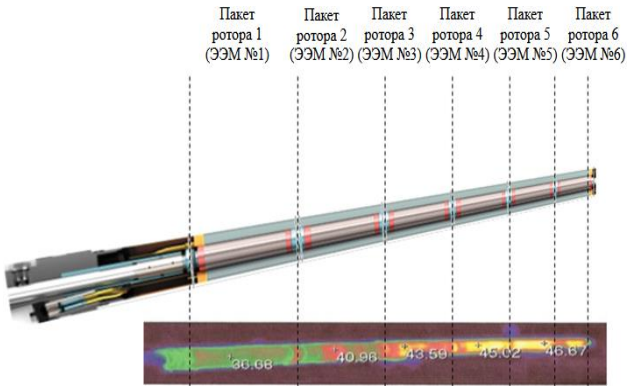


Рис. 1. *Термограмма ротора ПЭД в сборе*
Fig. 1. *Thermogram of the submersible electric motor (SEM) rotor assembly*

Рассмотрим крайний случай нагрева ПР на термограмме ПЭД (рис. 1). Самой высокой температурой обладает пакет № 6 – 46,67 °С (рис. 1), самой низкой – пакет № 1 – 36,68 °С, средняя температура по 6 пакетам ротора составляет 42,38 °С. Разница температур между пакетами № 1 и 6 составляет 10 °С, или 25 % от средней по сборке. Можно

предположить, что в силу идентичности материалов магнитопроводов статора и ротора, схожих принципов и технологий построения конструкции, общего магнитного потока статора и ротора аналогичные тепловые и другие эффекты будут присутствовать и для статора.

Приняв во внимание условия проведения эксперимента можно сделать вывод, что температура ПР обусловлена тепловыделением соответствующей элементарной электрической машины (ЭЭМ), которое, как уже было доказано, зависит от разброса электромагнитных параметров ПР. Под ЭЭМ в данном эксперименте понимается участок активной части ПЭД, ограниченный длинной ПР и включающий в себя соответствующую длине ПР активную часть статора [11]. В дальнейшем будет дано определение ЭЭМ, отвечающее целям настоящего исследования.

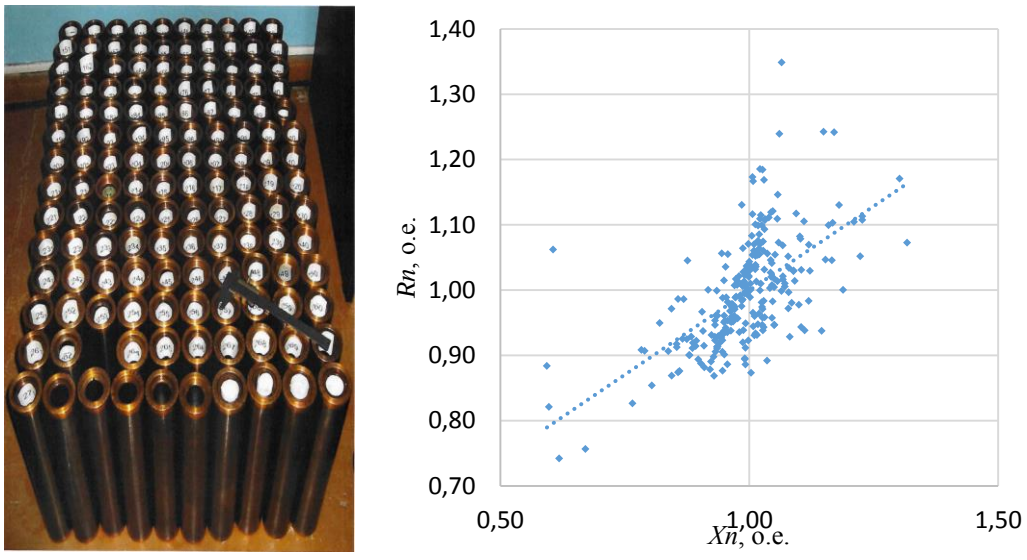
В сборках послеремонтных ПЭД, подобных описанных выше, в процессе эксплуатации возможно нарушение теплового режима ПЭД, вызванного локальным перегревом, и возрастает риск преждевременного выхода из строя ПЭД из-за преждевременной деградации изоляции обмоток статора. Отметим, что ПЭД оборудованы системой погружной телеметрии, которая измеряет интегральную температуру элементов ПЭД (лобовая часть обмотки статора, охлаждающая жидкость или иное, в зависимости от расположения, физического принципа действия чувствительных элементов и конструктивной компоновки датчиков температуры). Интегральный характер получаемых в этом случае данных усложняет задачу своевременного выявления и предупреждения локальных перегревов.

Данное представление ПЭД хорошо согласуется с подходами теории многодвигательных электроприводов [12]. Отличие ПЭД, интерпретируемого как совокупность ЭЭМ, от известных многодвигательных электроприводов состоит в наличии общего корпуса, общего вала, общей обмотки статора, общей охлаждающей системы и в отсутствии отдельного источника питания для «выделенных» ЭЭМ.

Введем понятие «локальные энергетические показатели ПЭД». Это энергетические показатели отдельных ЭЭМ, работающих в составе ПЭД. Интегральные энергетические показатели – результирующие энергетические показатели ПЭД в целом, определяемые взаимодействием и взаимовлиянием ЭЭМ, доступные для измерения существующими средствами телеметрии в штатных режимах работы ПЭД [10, 13, 14].

Анализ операционной партии пакетов ротора

В работе [10] представлены данные испытаний операционной партии ПР в количестве 271 штуки, предназначенных для послеремонтного асинхронного погружного электродвигателя 117-го габарита. Под операционной партией ПР (ОППР) понимаем имеющийся набор ПР, достаточный для выполнения суточной программы сборки ПЭД на ремонтном предприятии. В результате установлен значительный разброс электромагнитных параметров ПР – реактивных сопротивлений рассеяния *Xn* и активных сопротивлений *Rn* (рис. 2).



а/a *б/b*

Рис. 2. *Операционная партия пакетов ротора; а) часть пакетов ротора из ОППР; б) диаграмма рассеяния электромагнитных параметров в ОППР*

Fig. 2. *Operational batch of rotor packages (OBRP); a) part of the rotor packages from the OBRP; b) scattering diagram of electromagnetic parameters in the OBRP*

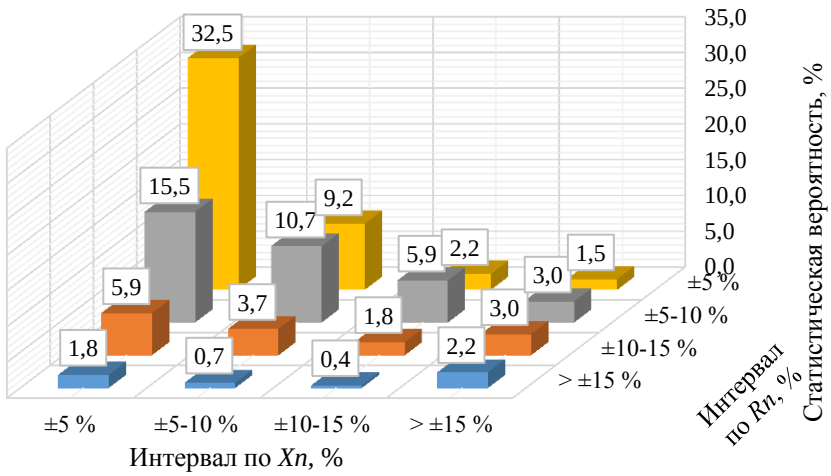


Рис. 3. *Гистограмма двумерного эмпирического распределения Xn и Rn из генеральной совокупности (ОППР)*
Fig. 3. *Histogram of the two-dimensional empirical distribution of Xn and Rn from the general population (OBRP)*

При этом проверка ПР в данной операционной партии по геометрическим критериям показала их соответствие существующим требованиям качества. Примененные методика и программно-аппаратный комплекс идентификации электромагнитных параметров ПР описаны в работах [15–17].

Как отмечено авторами [10, 11], разброс электромагнитных параметров ПР в сборке ПЭД может привести к существенной вариации локальных энергетических показателей ПЭД. При этом интегральные энергетические показатели ПЭД могут находиться в допустимых пределах. Авторы [11] отмечают, что наиболее опасным для ПЭД является наличие значительного размаха в значениях активных сопротивлений ПР между ЭЭМ, имеющимися в сборке ПЭД. Одним из следствий значительного разброса параметров ПР (рис. 2, *б*) становится возможное превышение активных потерь в ЭЭМ – свыше 50 % относительно номинальных всего ПЭД [11].

Статистический анализ электромагнитных параметров ОППР в виде двумерной совокупности позволяет получить статистическую оценку вероятности (рис. 3) разброса *Xn* и *Rn* ПР [18].

В результате анализа установлено, что:

- с вероятностью 32,5 % в ОППР имеется пакет ротора с разбросом по *Xn* и *Rn* не превышающий ±5 %;
- с вероятностью 35,2 % – превышающий ±5 %, но меньше ±10 %;
- с вероятностью 32,3 % – превышающий ±10 %.

Соответственно, при стохастическом алгоритме формирования сборочных комплектов высока вероятность наличия в нем существенного разброса электромагнитных параметров ПР.

Оценка влияния разброса электромагнитных параметров ПР в сборке послеремонтного ПЭД на вариации его локальных и интегральных энергетических показателей требует построения его математической модели.

Математическая модель погружного электродвигателя как многодвигательного электропривода

Строим математическую модель ПЭД как совокупность взаимодействующих и взаимовлияющих математических моделей ЭЭМ. За основу принимаем Т-образную схему замещения для каждой отдельной ЭЭМ [11, 16]. В свою очередь, последовательность взаимосвязанных Т-образных схем замещения ЭЭМ составляют схему замещения всего ПЭД (рис. 4). Далее эту схему замещения ПЭД называем «синтетическая схема замещения» (ССЗ) ПЭД. Построение ССЗ асинхронного ПЭД основано на следующих допущениях:

- рассматривается послеремонтный ПЭД;
- электромагнитные параметры ПР (реактивные сопротивления рассеяния *Xn* и активные сопротивления *Rn*) имеют значительный разброс;
- ЭЭМ представляет собой участок активной части ПЭД, ограниченный условными плоскостями, проходящими ортогонально оси ПЭД через середины подшипников, расположенных по сторонам ПР и середины немагнитных вставок пакетов статора, причем энергетические показатели ЭЭМ в полной мере соответствуют понятию и свойствам электрической машины в многодвигательном электроприводе;
- ПЭД в рамках теории цепей с сосредоточенными параметрами обладает всеми свойствами многодвигательного электропривода;
- количество ЭЭМ в ПЭД равно количеству пакетов ротора *K* в сборке;
- вал ПЭД считается абсолютно жестким, соответственно скольжение принято равным для

всех K ЭЭМ, входящих в состав ПЭД: $s_1=s_2=\ldots.=s_K$;

- токи обмотки статора элементарных машин приняты равными $I_1=I_{1.1}=I_{1.2}=\ldots.=I_{1.K}$;
- эффект насыщения магнитопровода пренебрежимо мал;
- эксцентриситет ПР в воздушном зазоре ЭЭМ пренебрежимо мал;
- эффекты вытеснения тока в короткозамкнутой обмотке пренебрежимо малы;
- потери в стали ротора в режимах, близких к номинальным, пренебрежимо малы;
- параметры цепей статора ЭЭМ синтетической схемы замещения ПЭД (рис. 4) считаются постоянными и равными $R_{1.1}=R_{1.2}=\ldots.=R_{1.K}$, $X_{1.1}=X_{1.2}=\ldots.=X_{1.K}$;
- тепловое сопротивление ЭЭМ в радиальном направлении намного меньше теплового сопротивления в аксиальном направлении [19–21];
- активные сопротивления соответствующих частей ПЭД моделируются с учетом зависимости от температуры [2, 22, 23].

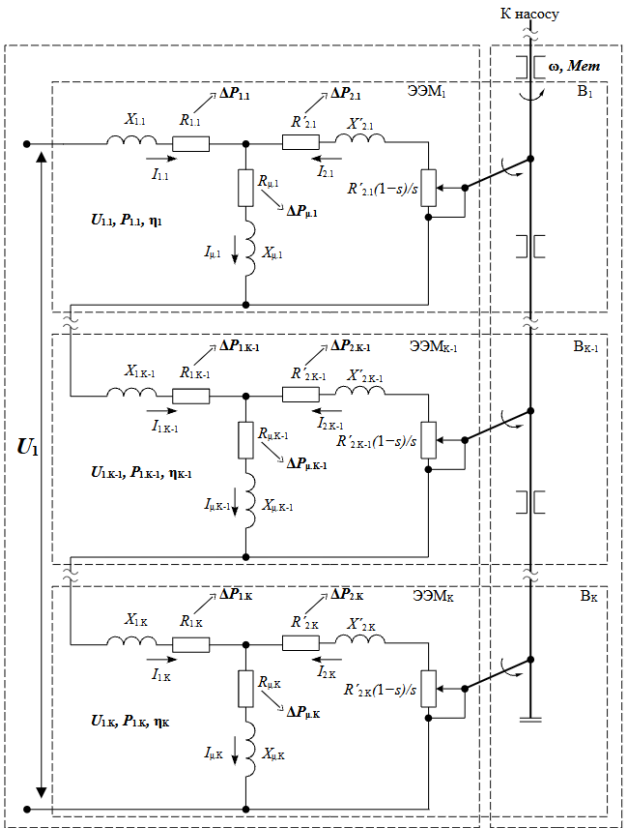


Рис. 4. *Синтетическая схема замещения ПЭД*
Fig. 4. *Synthetic equivalent circuit for a SEM*

Приведем алгоритм расчета локальных (для ЭЭМ) и интегральных энергетических показателей ПЭД в соответствии с рис. 4.

Интегральное напряжение питания U послеремонтных ПЭД принимается в соответствии с протоколом испытаний равным номинальному $U_{\text{ном}}$:

$$U = U_{\text{ном}}. \quad (1)$$

Полное комплексное сопротивление цепи статора k-й ЭЭМ:

$$\dot{Z}'_{2.k} = R'_{2.k}/s + jX'_{2.k}. \quad (2)$$

Полное комплексное сопротивление цепи обмотки ротора k-й ЭЭМ:

$$Z_{2.k} = R'_{2.k}/s + jX'_{2.k}\ . \quad (3)$$

Полное комплексное сопротивление цепи намагничивания k-й ЭЭМ:

$$Z_{\mu.k} = R_{\mu.k} + jX_{\mu.k}\ . \quad (4)$$

Полное комплексное сопротивление цепи намагничивания и цепи ротора k-й ЭЭМ:

$$Z_{\mu 2.k} = \frac{Z'_{2.k}\cdot Z_{\mu.k}}{Z'_{2.k}+Z_{\mu.k}}. \quad (5)$$

Интегральный ток обмотки статора:

$$I_1 = U/\left(\sqrt{3}\times Z\right), \quad (6)$$

где Z – полное комплексное сопротивление схемы замещения ПЭД:

$$Z\ = \sum Z_{1.k}\ +\ \sum Z_{\mu 2.k}\ . \quad (7)$$

Локальное падение напряжения на цепи намагничивания k-й ЭЭМ:

$$U_{\mu 2.k} = I_1 \cdot Z_{\mu 2.k}. \quad (8)$$

Локальный ток в цепи обмотки ротора k-й ЭЭМ:

$$I_{2.k} = U_{\mu 2.k}/Z'_{2.k}. \quad (9)$$

Ток в цепи намагничивания k-й ЭЭМ:

$$I_{\mu.k} = U_{\mu 2.k}/Z_{\mu.k}, \quad (10)$$

Интегральный коэффициент мощности ПЭД:

$$\cos\varphi = I_{1,a}/I_1, \quad (11)$$

где $I_1(a)$ – активная составляющая интегрального тока I_1.

Интегральная активная мощность, потребляемая ПЭД:

$$P_1 = 3\cdot U_1\cdot I_1\cdot\cos\varphi. \quad (12)$$

Локальная механическая мощность k-й ЭЭМ:

$$P_{\text{мх}.k} = 3\cdot {I_{2.k}}^2\cdot R_{2.k}\cdot(1-s)/s. \quad (13)$$

Локальные активные потери в обмотке статора k-й ЭЭМ:

$$\Delta P_{1.k} = 3\cdot {I_{1.k}}^2\cdot R_{1.k}. \quad (14)$$

Локальные активные потери в короткозамкнутой обмотке ротора k-й ЭЭМ:

$$\Delta P_{2.k} = 3 \cdot {I_{2.k}}^2 \cdot R'_{2.k}. \quad (15)$$

Локальные активные потери в цепи намагничивания k-й ЭЭМ:

$$\Delta P_{\mu.k} = 3 \cdot {I_{\mu.k}}^2 \cdot R_{\mu.k}. \quad (16)$$

Локальные активные потери в статоре k-й ЭЭМ:

$$\Delta P_{ст.k} = \Delta P_{1.k} + \Delta P_{\mu.k}. \quad (17)$$

Интегральный коэффициент полезного действия ПЭД:

$$\eta = (\sum P_{мх.k} - \Delta P_{мх})/P_1, \quad (18)$$

где $\Delta P_{мх}$ – механические потери ПЭД.

Анализ энергетических характеристик партии послеремонтных ПЭД

Сводные данные протоколов приемо-сдаточных испытаний девяти однотипных послеремонтных ПЭД 45-117 приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Сводные данные из протоколов приемо-сдаточных испытаний девяти послеремонтных ПЭД 45-117**

Table 1. *Summary data from the acceptance protocols of nine post-repair SEM 45-117**

Наименование величины Value name*	Обозначение Designation	Ед. изм. Units	Интервал результатов приемо-сдаточных испытаний Range of acceptance test results
Активное сопротивление фазы обмотки статора Active impedance of the stator winding phase	R_1	Ом/Ohm	1,932–2,042
Скольжение/Slip	s	%	4,5–5,1
Произведение КПД на коэффициент мощности Product of efficiency and power factor	η·cosφ	о.е./p.u.	0,67–0,71
Линейный ток фазы обмотки статора Phase current of the stator winding	Iн	А	26,7–27,7

**тип электрической машины – асинхронная, номинальное напряжение $U_{ном}$=1400 В, частота напряжения питания f=50 Гц, мощность на валу P_2=45 кВт, значения всех активных сопротивлений приведены к t=115 °С, в сборках ПЭД 45-117 количество ПР – 11 шт.*

**type of electric machine – induction, nominal voltage $U_{ном}$=1400 V, supply voltage frequency f=50 Hz, output shaft power P_2=45 kW, values of all active resistances are given at t=115°C, in SEM 45-117 assemblies the number of rotor packages units is 11.*

Характерные для данной группы послеремонтных ПЭД параметры синтетической схемы замещения ПЭД (рис. 4) приняты следующими: активное сопротивление обмотки статора $R_{1.K}$=0,1756 Ом; реактивное сопротивление обмотки статора $X_{1.K}$=0,2018 Ом; активное сопротивление цепи намагничивания $R_{\mu.K}$=0,4112 Ом; реактивное сопротивление цепи намагничивания $X_{\mu.K}$=6,5075 Ом; приведенное активное сопротивление цепи ротора $R'_{2.K}$=0,1756 Ом; приведенное реактивное сопротивление цепи ротора $X'_{2.K}$=0,2378 Ом. Принятые здесь параметры учитывают высокую степень расхода ресурса активной части ПЭД, свойственную послеремонтным ПЭД [24, 25].

Отметим следующее обстоятельство: изложение методики усреднения расчетных параметров, принимаемых в дальнейшем за базовые, для анализируемой группы послеремонтных ПЭД представляет собой отдельную статистическую задачу и не входит в цели данной статьи. Задача идентификации параметров ПЭД для Т-образной схемы замещения по данным опытов холостого хода и короткого замыкания решена в соответствии с типовым подходом [26].

Пример оценки вариаций потерь в стали статора при стохастической процедуре сборки послеремонтного погружного электродвигателя по методу планирования эксперимента

Синтезируем виртуальную сборку ПЭД 45-117, содержащую 11 ПР в каждой. Причем только короткозамкнутый пакет ротора № 11 имеет варьируемые параметры цепи ротора $R'_{2.11}$ и $X'_{2.11}$, и для содержащей его ЭЭМ № 11 также варьируем параметры цепи намагничивания $R_{\mu.11}$, $X_{\mu.11}$ (табл. 2). Соответственно, имеем четыре варьируемых параметра. Электромагнитные параметры остальных (№ 1–10) ЭЭМ $R_{\mu.1}$–$R_{\mu.10}$, $X_{\mu.1}$–$X_{\mu.10}$, $R'_{2.1}$–$R'_{2.10}$ и $X'_{2.1}$–$X'_{2.10}$, а также параметры $R_{1.11}$ и $X_{1.11}$ приняты постоянными. Минимальный диапазон варьирования принят равным ±20 % относительно базовых параметров ССЗ, что соответствует подходам работы [10].

В соответствии с теорией методов планирования эксперимента при четырех варьируемых параметрах необходимо провести 16 вычислительных экспериментов [27, 28]. В каждом эксперименте под номером h по порядку от 1 до 16 варьируются значения $R_{\mu.11}$, $X_{\mu.11}$, $R'_{2.11}$ и $X'_{2.11}$. В соответствии с разработанной выше (1)–(18) математической моделью ПЭД рассчитывается ряд локальных и интегральных энергетических показателей послеремонтного ПЭД. Отметим, что дополнительно проводится вычислительный эксперимент № 17 (табл. 2), в котором электромагнитные параметры ЭЭМ не варьируются. При этом локальные энергетические показатели ПЭД эксперимента № 17 считаем базовыми: $\Delta P_{1.б}$=$\Delta P_{1.11(h=17)}$, $\Delta P_{2.б}$=$\Delta P_{2.11(h=17)}$, $\Delta P_{\mu.б}$=$\Delta P_{\mu.11(h=17)}$ и $\Delta P_{ст.б}$=$\Delta P_{ст.11(h=17)}$. В табл. 2 это соответствует позиции h=17.

Таблица 2. *Фрагменты вычислительного эксперимента, интегральные энергетические показатели ПЭД*

Table 2. *Fragments of a computational experiment, SEM integral energy parameters*

Номер фрагмента эксперимента/Number of experiment fragment, h		1	3	5	7	9	15	17
Варьируемые параметры, ЭЭМ № 11 Variable parameters, elementary electrical machines (EEM) no. 11	$R_{\text{м.11}}$, о.е./p.u	1,2	0,8	0,8	1,2	1,2	1,2	1
	$X_{\text{м.11}}$, о.е./p.u	1,2	0,8	0,8	0,8	0,8	1,2	1
	$R'_{2.11}$, о.е./p.u	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1
	$X'_{2.11}$, о.е./p.u	1,2	0,8	1,2	0,8	1,2	0,8	1
Измеримые интегральные энергетические показатели ПЭД Measurable integral energy parameters of SEM	I_1, А	26,0	26,2	26,2	26,2	26,3	25,9	26,0
	P_1, кВт/kW	54,9	55,0	55,0	55,1	55,1	54,9	54,9
	η·cosφ, о.е./p.u.	0,715	0,708	0,708	0,707	0,707	0,716	0,713
	ΔP_1, Вт/W	3905	3979	3987	3988	3996	3894	3923

Таблица 3. *Фрагмент вычислительного эксперимента, локальные энергетические показатели ПЭД*

Table 3. *A fragment of a computational experiment, local energy parameters of a SEM*

Номер фрагмента эксперимента/Number of experiment fragment, h		1	3	5	7	9	15	17 (базовый/basic)
Неизмеримые локальные энергетические показатели ПЭД, (ЭЭМ № 11) Unmeasurable local energy parameters of SEM (EEM no. 11)	$U_{\text{ЭЭМ.11}}$, В/V	85	79	79	78	78	86	73
	$\Delta P_{1.11}$, Вт/W	355	362	362	363	363	354	357
	$\Delta P_{2.11}$, Вт/W	320	270	264	264	259	325	266
	$\Delta P_{\text{м.11}}$, Вт/W	151	190	186	277	272	153	130
	$\Delta P_{\text{ст.11}}$, Вт/W	506	552	549	640	636	507	487
	$\delta P_{1.11}$, %	–0,5	1,4	1,6	1,6	1,9	–0,7	0
	$\delta P_{2.11}$, %	20,2	1,3	–0,8	–0,8	–2,9	22,1	0
	$\delta P_{\text{м.11}}$, %	15,8	45,9	43,4	113,1	109,4	17,5	0
	$\delta P_{\text{ст.11}}$, %	3,9	13,3	12,8	31,4	30,6	4,1	0

В табл. 2 приведены наиболее характерные вычислительные эксперименты, выполненные в соответствии с теорией методов планирования эксперимента. Анализ данных табл. 2 позволяет сделать вывод, что вариации электромагнитных параметров в ЭЭМ № 11 не оказывают существенного влияния на интегральные энергетические показатели всего послеремонтного ПЭД. Локальные энергетические показатели данной группы сборок ПЭД (табл. 2) приведены в табл. 3.

В табл. 3 представлены отклонения локальных активных потерь $\delta P_{1.11}$, $\delta P_{2.11}$, $\delta P_{\text{ст.11}}$ и $\delta P_{\text{м.11}}$ элементарной электрической машины № 11 (11 ПР) в сборке ПЭД, определяемые по формулам:

$$\delta P_{1.11} = \frac{(\Delta P_{1.11} - \Delta P_{1.\text{б}})}{\Delta P_{1.\text{б}}} \cdot 100\ \%,$$

$$\delta P_{2.11} = \frac{(\Delta P_{2.11} - \Delta P_{2.\text{б}})}{\Delta P_{2.\text{б}}} \cdot 100\ \%,$$

$$\delta P_{\text{м.11}} = \frac{(\Delta P_{\text{м.11}} - \Delta P_{\text{м.б}})}{\Delta P_{\text{м.б}}} \cdot 100\ \%,$$

$$\delta P_{\text{ст.11}} = \frac{(\Delta P_{\text{ст.11}} - \Delta P_{\text{ст.б}})}{\Delta P_{\text{ст.б}}} \cdot 100\ \%.$$

Как видно из табл. 3, вариации электромагнитных параметров ПР в сочетании с вариациями параметров цепи намагничивания приводят к существенному изменению локальных энергетических показателей ЭЭМ, входящих в ПЭД.

Рост $\delta P_{\text{ст.11}}$ показывает, что активные потери в ЭЭМ сосредотачиваются в статоре, в режимах близких к номинальным. Увеличение теплового потока, обусловленного потерями в обмотке и в стали статора, непосредственно вокруг изоляции обмотки, приводит к тому, что появляются условия для ускоренной термической деградации изоляции обмотки статора.

О перераспределении энергетических потоков активной зоны статора

Значительное изменение доли потерь в стали статора (до 113,1 %) приводит к перераспределению энергетических потоков, движущихся через участок изоляции статорной обмотки. Суммарно эти потоки, в принятой нами модели, увеличиваются в некоторых случаях более чем на 30 % (табл. 3, эксперимент 7, 9). В соответствии с правилом Монтзингера и другими аналогичными методиками оценки срока службы изоляции электрических машин [29, 30], это приводит к существенному снижению ресурса изоляции на конкретном локальном участке послеремонтного ПЭД. При этом, как следует из данных табл. 2, измеряемые с помощью приборов учета, а также телеметрических систем [31–33] интегральные энергетические показатели ПЭД не сигнализируют о фактическом наличии существенных локальных отклонений энергетических показателей. Что в целом подтверждает принятую в настоящей работе гипотезу о высокой вероятности формирования вдоль расточки статора отдельных участков с локальным аномально высоким выделением тепловой энергии в стали статора и ее влиянии на ресурс активной части ПЭД.

Указанные выше обстоятельства требуют детализированного анализа процессов энергопреобразования в таком сложном объекте, как асинхронный ПЭД, применяемый в составе установки электроцентробежного насоса нефтедобычи, включая в моделирование взаимодействия тепловых [2, 19], электромагнитных [16, 34, 35], электромеханических [36–38] процессов и процессов деградации изоляции [39, 40].

Заключение

1. Предложена синтетическая схема замещения асинхронного погружного электродвигателя, отличающаяся структурой, вводящей в рассмотрение элементарные схемы замещения, в соответствии с предложенным набором допущений, соответствующих понятию «элементарная электрическая машина».
2. На базе синтетической схемы замещения построена математическая модель асинхронного погружного электродвигателя, учитывающая как интегральные, так и локальные энергетические показатели, в том числе такие, как коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, потери в стали статора, потери в обмотках статора и пакетов ротора и другие.
3. Показано, что вариации электромагнитных параметров пакетов ротора в составе сборки асинхронного послеремонтного погружного электродвигателя приводят к высокой вероятности появления локальных потерь в стали статора, существенно превышающих базовые. Причем указанные локальные превышения мощности потерь в стали приводят к предпосылкам ускоренной деградации локальной изоляции обмоток статора.
4. Показана высокая вероятность несовпадения интегральных и локальных показателей погружного электродвигателя.
5. Показана необходимость детализированного моделирования процессов энергопреобразования в таком сложном объекте, как асинхронный погружной электродвигатель, применяемый в составе установки электроцентробежного насоса нефтедобычи, включая моделирование взаимодействия тепловых, электромеханических и электромагнитных процессов на уровне понятия «элементарная электрическая машина».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Сенько В.В. Управление ресурсами и жизненными циклами погружного электрооборудования нефтедобычи на основе технической диагностики и динамики изменения его текущего состояния // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64. – № 4–5. – С. 46–52. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-46-52.
2. Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока компрессорных станций магистральных газопроводов / А.М. Зюзев, О.В. Крюков, В.П. Метельков, С.Г. Михальченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 88–96. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3002.
3. Review on advance monitoring of electrical and mechanical failure in submersible pump / T.S.N.F.T. Mohamad, N. Afrizal, M.Z. Daud, M.R. Awal // 2022 4th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE). – Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. – P. 1–8. DOI: 10.1109/ICECIE55199.2022.10000291.
4. Ежова М.С., Полевой В.Е. Анализ методов расчёта показателей надёжности асинхронных двигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 9-1. – С. 31–35.
5. Гареев А.А. Об экономической эффективности добычи нефти электроцентробежными насосами // Нефтяное хозяйство. – 2025. – № 1. – С. 60–63. DOI: 10.24887/0028-2448-2025-1-60-63.
6. Экспериментальные исследования электродвигателей привода погружных центробежных насосов / А.В. Железняков, А.М. Трунаев, А.А. Воробьев, М.С. Вахитов // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2020. – № 58. – С. 27–35.
7. Буторин В.А., Саплин Л.А., Гусейнов Р.Т. Выбор задаваемых параметров для оценки соответствия восстановленных погружных электродвигателей требованиям на капитальный ремонт // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26. – № 5. – С. 53–58. DOI: 10.26897/2687-1149-2024-5-53-58.
8. Abulfaz H.I., Malik A.S. Evaluation of the inter-repair operation period of electric submersible pump units // Eureka: Physics and Engineering. – 2020. – № 1. – P. 79–86. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001105.
9. Joseph A.A., Adeoti A.O. Impact of fluid properties on electric submersible pumps (ESP) performance and run life in a well // Journal of Applied Sciences and Environmental Management. – 2021. – Vol. 25. – № 2. – P. 140–143. DOI: 10.4314/jasem.v25i2.
10. Хусаинов Э.И., Ковалев В.З., Архипова О.В. Подход к сборке ПЭД в целях повышения МРП // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 472–476. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-472-473.
11. Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю., Аникин В.В. Энергетические показатели погружного асинхронного электродвигателя при вариациях электромагнитных параметров пакета ротора // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 58–62. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-58-62.
12. Ключев В.И. Теория электропривода. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 704 с.
13. Разработка наблюдателя с оперативным мониторингом угловой скорости ротора и момента сопротивления на валу погружного асинхронного двигателя / А.С. Глазырин, С.С. Попов, Е.И. Попов, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.А. Филипас, В.В. Тимошкин, Е.А. Беляускене, Ю.О. Кулеш, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, М.В. Денеко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 203–219. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826.

14. Kusmantoro A. Real-time microgrid for submersible pump energy consumption based on fuzzy logic controller // 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA). – Surabaya, Indonesia, 2023. – P. 948–953. DOI: 10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427800.
15. Хамитов Р.Н., Аникин В.В. Методика идентификации параметров схемы замещения погружного электродвигателя с интегральным преобразованием характеристики затухания тока статора // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2019. – № 1. – С. 109–113. DOI:10.25206/2310-4597-2019-1-109-113.
16. Определение эксплуатационных параметров погружных асинхронных электродвигателей по идентификационным параметрам Т-образной схемы замещения / В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов, Е.М. Кузнецов, В.В. Аникин, В.О. Бессонов // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 36–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-36-40.
17. Идентификация параметров схемы замещения погружных асинхронных двигателей / В.З. Ковалев, А.Г. Щербаков, А.В. Архипов, А.Ю. Ковалев, В.В. Аникин // Промышленная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 38–41.
18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Книга по Требованию, 2024. – 576 с.
19. Уразаков К.Р., Рукин М.В., Борисов А.О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 62–71. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959.
20. Гизатуллин Р.Р., Пещеренко С.Н., Шиверский А.В. Тепловой расчет погружных электродвигателей // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 12 (108). – С. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2020-12-2036.
21. Xu Y.M., Liu F., Zhang F. Analysis of heat transfer based on fluid network decoupling in submersible motor // 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). – Shanghai, China, 2015. – P. 81–82. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453476.
22. Ершов М.С., Феоктистов Е.А. Аналитическое решение для шестимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя закрытого исполнения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 53–61. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3331.
23. Indirect determination of the temperature of induction-motor windings based on evaluation of rotor resistance / A.A. Pugachev, S.V. Morozov, A.N. Marikin, V.A. Kruchek // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 92. – № 10. – P. 568–571. DOI: 10.3103/S1068371221100151.
24. Хомутов С.О., Рыбаков В.А. Прогнозирование ресурса асинхронных двигателей в зависимости от величины остаточных послеремонтных повреждений // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 197–205.
25. Железняков А.В., Караван И.А. Эксцентриситет ротора в погружных асинхронных двигателях // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2021. – № 60. – С. 4–9.
26. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Питер, 2010. – 350 с.
27. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 185 с.
28. Montgomery D.C. Design and analysis of experiments. 8th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 757 p.
29. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair / G.C. Stone, E.A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani. – New Jersey: IEEE Computer Society Press, 2004. – 252 p.
30. Fundamentals of a motor thermal model and its application in motor protection / B. Venkataraman, B. Godsey, W. Premerlani, E. Shulman, M. Thakur, R. Midence // Protective Relay Engineers, 58th Annual Conference. – USA, 2005. – P. 11–28.
31. Сушков В.В., Сухачев И.С., Сидоров С.В. Оценка и способы повышения остаточного ресурса изоляции погружных электродвигателей электротехнического комплекса добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 12. – С. 50–55.
32. Feng X., Shu Y., Zheng X. Design of downhole parameter measurement system for electric submersible pump // 2023 4th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM). – Nanjing, China, 2023. – P. 70–73. DOI: 10.1109/ICMTIM58873.2023.10246503.
33. Cho J.Ho. A study on the operation status monitoring, diagnosis and failure prediction algorithm of smart ESP // The Journal of Next-generation Convergence Technology Association. – 2022. – Vol. 6. – № 5. – P. 775–780. DOI: 10.33097/jncta.2022.06.05.775.
34. Вероятностная модель надежности погружных электродвигателей скважинных насосных агрегатов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания / А.А. Ефремов, К.К. Кадыров, М.Д. Носков, А.А. Филипас, А.А. Щипков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 253–264. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721.
35. Кулеш Ю.О., Щипков А.А. Концепция автоматизированной системы контроля температуры активной зоны погружных асинхронных двигателей на основе динамической идентификации параметров схемы замещения // Инновации в атомной отрасли: проблемы и решения: Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 65-летию СТИ НИЯУ МИФИ. – Северск, 16–20 декабря 2024. – Северск: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024. – С. 56.
36. Badria A., Kamel H., Hacene M. Simulation of the thermal behavior of an asynchronous motor with various types of rotors // Studies in engineering and exact sciences. – 2024. – Vol. 5. – P. 1–23. DOI: 10.54021/seesv5n2-579.
37. Gani M. Winding fault detection in motor using near infra-red sensor signal based DYWT and TDYWT analysis // Journal of Information Systems Engineering and Management. – 2025. – V. 10. – P. 284–294. DOI: 10.52783/jisem.v10i53s.10872.
38. Digital twin-enabled predictive thermal modeling for stator temperature monitoring in induction motors / K. Zhang, J. Qing, H. Jin, H. Jin // Electronics. – 2025. – Vol. 14. – P. 2814. DOI: 10.3390/electronics14142814.
39. Jalbert J., Lessard M-C., Mohamed R. Cellulose chemical markers in transformer oil insulation. part 1: temperature correction factors // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – Vol. 20 (6). – P. 2287–2291.
40. Odegard G., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymersand their composites // Journal of Polymer Science Part B: PolymerPhysics. – 2011. – Vol. 49. – № 24. – P. 1695–1716.

Информация об авторах

Владимир Захарович Ковалев, доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; vz_kovalev@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4512-6868

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

Ольга Владимировна Архипова, старший преподаватель Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; arkh82@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8773-8846

Эмиль Ильшатович Хусаинов, инженер Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; husainov-e@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-1370-5972

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой кибернетических систем, 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, аспирант кафедры кибернетических систем, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; popovei72@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2088-4280

Рустам Нуриманович Хамитов, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; apple_27@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9876-5471

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

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, 634513, 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; доцент кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; orange@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-8483-8999

Евгения Александровна Беляускене, старший преподаватель отделения математики и математической физики, Инженерная школа ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; аспирант кафедры кибернетических систем Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; eam@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-1638-4366

Поступила в редакцию: 24.03.2025
Поступила после рецензирования: 01.07.2025
Принята к публикации: 14.07.2025

REFERENCES

1. Romanov V.S., Goldstein V.G., Senko V.V. Management of resources and life cycles of submersible electrical oil production equipment based on technical diagnostics and dynamics of changes in its current state. *News of higher educational institutions. Electromechanics*, 2021, vol. 64, no. 4–5, pp. 46–52. (In Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-46-52.
2. Ziuzev A.M., Kryukov O.V., Metelkov V.P., Mikhalchenko S.G. Estimation of thermal state of ac electric motors of trunk gas pipelines compressor stations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 88–96. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3002.
3. Mohamad T.S.N.F.T., Afrizal N., Daud M.Z., Awal M.R. Review on advance monitoring of electrical and mechanical failure in submersible pump. *2022 4th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. pp. 1–8.
4. Ezhova M.S., Polevoy V.E. Analysis of methods of calculation of reliability indices of induction motors. *Proceedings of the Tula State University. Technical sciences*, 2013, no. 9-1, pp. 31–35. (In Russ.)
5. Gareev A.A. On the economic efficiency of oil production by electric centrifugal pumps. *Oil industry*, 2025, no. 1, pp. 60–63. (In Russ.) DOI: 10.24887/0028-2448-2025-1-60-63.
6. Zheleznyakov A.V., Trunaev A.M., Vorobyov A.A., Vakhitov M.S. Experimental studies of electric motors for driving submersible centrifugal pumps. *Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport*, 2020, no. 58, pp. 27–35. (In Russ.)
7. Butorin V.A., Saplin L.A., Guseynov R.T. Selection of preset parameters to assess the compliance of restored submersible electric motors with the overhaul requirements. *Agroengineering*, 2024, vol. 26, no. 5, pp. 53–58. (In Russ.) DOI: 10.26897/2687-1149-2024-5-53-58.
8. Abulfaz H.I., Malik A.S. Evaluation of the inter-repair operation period of electric submersible pump units. *Eureka: Physics and Engineering*, 2020, no. 1, pp. 79–86.
9. Joseph A.A., Adeoti A.O. Impact of fluid properties on electric submersible pumps (ESP) performance and run life in a well. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2021, vol. 25, no. 2, pp. 140–143.

10. Khusainov E.I., Kovalev V.Z., Arkhipova O.V. Approach to SEM assembling to improve inter-repair operation period. *Proceedings of the Tula State University. Technical sciences*, 2024, no. 5, pp. 472–476. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-472-473.
11. Kuznetsov E.M., Kovalev A.Yu., Anikin V.V. Energy parameters of a submersible induction electric motor with variations in the electromagnetic parameters of the rotor package. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2017, vol. 5, no. 3, pp. 58–62. (In Russ.) DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-58-62.
12. Klyuchev V.I. *Theory of electric drive*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 704 p. (In Russ.)
13. Glazyrin A.S., Popov S.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Filipas A.A., Timoshkin V.V., Beliauskene E.A., Kulesh Yu.O., Bolovin E.V., Kovalev V.Z., Deneko M.V. Desing of an observer with real time monitoring speed and load torque for submersible induction motors. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 203–219. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4826.
14. Kusmantoro A. Real-time microgrid for submersible pump energy consumption based on fuzzy logic controller. *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA).* Surabaya, Indonesia, 2023. pp. 948–953, DOI: 10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427800.
15. Khamitov R.N., Anikin V.V. Method of identification of parameters of the replacement circuit of a submersible electric motor with integrated conversion of the stator current attenuation characteristics. *Molodaya Rossiya: advanced technologies in industry*, 2019, no. 1, pp. 109–113. (In Russ.) DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-109-113.
16. Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kuznetsov E.M., Anikin V.V., Bessonov V.O. Determination of operational parameters of submersible induction motors by identification parameters of t-shaped equivalent circuit. *Omsk Scientific Bulletin*, 2018, no. 6 (162), pp. 36–40. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-36-40.
17. Kovalev V.Z., Shcherbakov A.G., Arkhipov A.V., Kovalev A.Yu., Anikin V.V. Identification of parameters of the equivalent circuit scheme of submersible induction motors. *Industrial power engineering*, 2012, no. 1, pp. 38–41. (In Russ.)
18. Ventzel E.S. *Probability theory* Moscow, Book on Demand Publ., 2024. 576 p. (In Russ.)
19. Urazakov K.R., Rukin M.V., Borisov A.O. Simulation of thermal processes in a submersible motor of an electric centrifugal pump operating in a periodic mode. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 62–71. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3959.
20. Gizatullin R.R., Pescherenko S.N., Shiversky A.V. Thermal calculation of submersible motors. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, no. 12 (108), p. 1. (In Russ.) DOI: 10.18698/2308-6033-2020-12-2036.
21. Xu Y.M., Liu F., Zhang F. Analysis of heat transfer based on fluid network decoupling in submersible motor. *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD).* Shanghai, China, 2015. pp. 81–82. DOI: 10.1109/ASEMD.2015.7453476.
22. Ershov M.S., Feoktistov E.A. Analytical solution for a six-mass thermodynamic model of a TEFC induction motor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 53–61. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3331.
23. Pugachev A.A., Morozov S.V., Marikin A.N., Kruchek V.A. Indirect determination of the temperature of induction-motor windings based on evaluation of rotor resistance. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 10, pp. 568–571. DOI: 10.3103/S1068371221100151.
24. Khomutov S.O., Rybakov V.A. Forecasting the life of induction motors depending on the magnitude of residual post-repair damage. *Polzunovskiy vestnik*, 2007, no. 4, pp. 197–205. (In Russ.)
25. Zheleznyakov A.V., Karavan I.A. Rotor eccentricity in submersible induction motors. *Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport*, 2021, no. 60, pp. 4–9. (In Russ.)
26. Voldek A.I., Popov V.V. E*lectric machines. Alternating current machines.* St. Petersburg, Piter Publ., 2010. 350 p. (In Russ.)
27. Ivobotenko B.A., Ilyinsky N.F., Kopylov I.P. *Experimental planning in electromechanics*. Moscow, Energiya Publ., 1975. 185 p. (In Russ.)
28. Montgomery D.C. *Design and analysis of experiments*. 8th ed. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2012. 757 p.
29. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. New Jersey, IEEE Computer Society Press, 2004. 252 p.
30. Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E., Thakur M., Midence R. Fundamentals of a motor thermal model and its application in motor protection. *Protective Relay Engineers, 58th Annual Conference.* USA, 2005. pp. 11–28.
31. Sushkov V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. Evaluation and methods of increasing of submersible electric motor insulation residual resource in oil production electrotechnical complex under the influence of impulse overvoltages. *Electrical equipment: operation and repair*, 2017, no. 12, pp. 50–55. (In Russ.)
32. Feng X., Shu Y., Zheng X. Design of downhole parameter measurement system for electric submersible pump. *2023 4th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM).* Nanjing, China, 2023. pp. 70–73. DOI: 10.1109/ICMTIM58873.2023.10246503.
33. Cho J.Ho. A study on the operation status monitoring, diagnosis and failure prediction algorithm of smart ESP. *The Journal of Next-generation Convergence Technology Association*, 2022, vol. 6, no. 5, pp. 775–780. DOI: 10.33097/jncta.2022.06.05.775.
34. Efremov A.A., Kadyrov K.K., Noskov M.D., Filipas A.A., Shchipkov A.A. Probabilistic reliability model of electrical motors in submersible well pumping units used in the uranium mining by in-situ leaching. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 253–264. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4721.
35. Kulesh Yu.O., Shchipkov A.A. The concept of an automated core temperature control system for submersible induction motors based on dynamic identification of replacement circuit parameters. *Innovations in the nuclear industry: problems and solutions. Proc. of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists dedicated to the 65th anniversary of the National Research Nuclear University MEPhI*. Seversk, December 16–20, 2024. Seversk, National Research Nuclear University "MEPhI" Publ., 2024. pp. 56. (In Russ.)

36. Badria A., Kamel H., Hacene M. Simulation of the thermal behavior of an asynchronous motor with various types of rotors. *Studies in engineering and exact sciences*, 2024, vol. 5, pp. 1–23.
37. Gani M. Winding fault detection in motor using near infra-red sensor signal based DYWT and TDYWT analysis. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 2025, vol. 10, pp. 284–294.
38. Zhang K., Qing J., Jin H., Jin H. Digital twin-enabled predictive thermal modeling for stator temperature monitoring in induction motors. *Electronics*, 2025, vol. 14, pp. 2814.
39. Jalbert J., Lessard M-C., Mohamed R. Cellulose chemical markers in transformer oil insulation. part 1: temperature correction factors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, vol. 20 (6), pp. 2287–2291.
40. Odegard G., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymersand their composites. *Journal of Polymer Science Part B: PolymerPhysics*, 2011, vol. 49, no. 24, pp. 1695–1716.

Information about the authors

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; vz_kovalev@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4512-6868
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
Olga V. Arkhipova, Senior Lecturer, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; arkh82@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8773-8846
Emil I. Khusainov, Engineer, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; husainov-e@mail.ru; https://orcid.org/0009-0000-1370-5972
Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; kopyrinva@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-7515-4018
Evgeniy I. Popov, Assistant, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; popovei72@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2088-4280
Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; apple_27@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-9876-5471
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
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, Russian Federation; Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; orange@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-8483-8999
Evgeniia A. Beliauskene, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Postgraduate Student, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; eam@tpu.ru; https://orcid.org/0000-0002-1638-4366

Received: 24.03.2025
Revised: 01.07.2025
Accepted: 14.07.2025