

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-52-83:656.56

Алексей Руфимович Колганов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: klgn@drive.ispu.ru .

Олег Викторович Крюков

ООО «ТСН-электро», доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru .

Сергей Евгеньевич Степанов

ООО «Газпром проектирование», кандидат технических наук, ведущий инженер отдела технологического проектирования, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 428-28-63, e-mail: stepanov55@yandex.ru .

Автоматизированное прогнозирование ресурса мощных электроприводов турбоустановок на компрессорных станциях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Прогнозирование технического состояния основных технологических установок компрессорных станций относится к приоритетным направлениям их совершенствования на основе интеллектуальных систем автоматизации. Электропривод турбокомпрессоров мощностью 4–25 МВт относится к опасным производственным объектам и, в соответствии с отраслевыми нормативно-техническими документами, подлежит непрерывному мониторингу и прогнозированию ресурса в среднесрочной перспективе. Существующие системы мониторинга технического состояния приводных электродвигателей построены по устаревшим методикам и не обеспечивают достоверный и автоматический прогноз ресурса электрических машин большой мощности. На отечественном электротехническом рынке сегодня отсутствуют надежные и адекватные технические средства и методы превентивного прогнозирования состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов, которые можно использовать для перехода к техническому обслуживанию по фактическому состоянию. В этой связи целью исследования является разработка теоретически обоснованной методологии оценки технического состояния электропривода в режиме *on-line* и автоматизированного прогнозирования его эксплуатационных параметров.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием эмпирического метода моделирования процесса старения изоляции высоковольтной обмотки статора синхронной машины, основанного на статистической обработке данных по аварийности приводов, исследовании режимов работы, влияющих на ресурс изоляции, на оценке диапазонов изменения эксплуатационных факторов и определении их корреляции с наработкой на отказ. Прогнозирование режимов работы турбоустановки и ее адаптивного функционирования осуществлено с применением эмпирических уравнений Монтзингера и метода парных сравнений Саати по наработке на отказ.

Результаты. Предложен подход интерактивного контроля технического состояния приводных машин по характеристикам частичных разрядов в изоляции электродвигателей. Разработана встроенная система мониторинга и прогнозирования режимов работы электроприводов турбоустановок, приводящих к ускоренному старению изоляции синхронных двигателей.

Выводы. Использование автоматизированных систем прогнозирования технического состояния электропривода газоперекачивающего агрегата позволяет планировать капитальные и текущие ремонты на основе фактического состояния, исключить тепловое действие токов и снизить стоимость капитальных ремонтов, контролировать работу системы охлаждения мощных машин и поддерживать оптимальные режимы, позволяющие увеличить ресурс изоляции, а также при совместном использовании данных вибрационного анализа и FFT-анализа потребления мощности точно выявлять причины повышенных уровней вибрации, что позволяет снизить общие эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, техническое обслуживание и ремонт, электропривод, мониторинг состояния синхронных двигателей, отказы изоляции

Alexey Rufimovich Kolganov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electric Drive and Industrial Installations Automation Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: klg@drive.ispu.ru

Oleg Viktorovich Kryukov

TCN-Electro LLC, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor, Deputy Director of Research, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

Sergey Evgenievich Stepanov

Gazprom Design LLC, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Leading Engineer of the Technological Design Department, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 428-28-63, e-mail: stepanov55@yandex.ru

Automated forecasting of the resource of powerful electric turbine drives at compressor stations

Abstract

Background. Forecasting the technical condition of the main processing installations of compressor stations is one of the priority areas of improvement based on intellectual automation systems. The electric drive of turbochargers with a capacity of 4–25 MW is classified as hazardous production facilities. And in accordance with industry regulatory and technical documents, it is subject to continuous monitoring and resource forecasting in the medium term. The existing systems to monitor technical condition of drive electric motors are based on outdated methods and do not provide reliable and automatic forecast of the resource of high-power electric machines. The domestic electrotechnical market today lacks reliable and adequate technical means and methods of preventive forecast of the condition of electric-driven gas pumping units, which can be used to switch to maintenance according to the actual condition. In this regard, the aim of the study is to provide a theoretically sound methodology to assess the technical condition of an electric drive in *on-line* mode and automated forecast of its operational parameters.

Materials and methods. The study has been conducted using an empirical method for modeling the aging process of the insulation of the high-voltage stator winding of a synchronous machine. It is based on statistical processing of data on drive failures, a study of operating modes that affect the insulation resource, an assessment of the variation ranges of operational factors and determination of their correlation with the mean time between failures. Forecasting the operating modes of the turbine unit and its adaptive functioning has been carried out using the empirical Montzinger equations and the Saaty paired comparison method for mean time between failures.

Results. The authors have proposed an approach to interactive monitoring of the technical condition of drive machines based on the characteristics of partial discharges in the insulation of electric motors. An integrated system to monitor and forecast the operating modes of electric drives of turbo plants that lead to accelerated aging of the insulation of synchronous motors is developed.

Conclusions. The use of automated systems for predicting the technical condition of the electric drive of a gas pumping unit makes it possible to plan capital and routine repairs based on the actual condition, eliminate the thermal effect of currents and reduce the cost of capital repairs, monitor the operation of the cooling system of powerful machines and maintain optimal modes to increase insulation life. By combining vibration analysis data with FFT power consumption analysis, it is possible to identify the causes of increased vibration levels, thereby reducing overall operating costs.

Key words: compressor station, gas pumping unit, maintenance and repair, electric drive, monitoring the condition of synchronous motors, insulation failures

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.073-079

Введение. В настоящее время многочисленными нормативно-техническими документами установлены требования по оснащению оборудования магистральных газопроводов (МГ) системами мониторинга для контроля состояния, диагностирования и прогнозирования

их ресурса [1–3]. В основном это относится к прогнозу коррозионного состояния труб МГ с оценкой влияния внешних воздействий и учету электроизолирующих защитных покрытий. Однако не менее актуальным является достоверный *on-line* прогноз технического состояния основных

технологических установок компрессорных станций и площадочного оборудования [4–6].

В соответствии с Федеральным законом РФ «О промышленной безопасности», компрессорные станции (КС) МГ являются опасными производственными объектами (ОПО). Большинство газоперекачивающих агрегатов (ГПА), эксплуатируемых на КС ПАО «Газпром», выработали нормативный срок эксплуатации или близки к этому. К оборудованию ОПО с истекшим нормативным сроком эксплуатации предъявляются особые требования по контролю его технического состояния (ТС) и продлению сроков эксплуатации. В связи с этим в ПАО «Газпром» активно ведутся работы по созданию и внедрению систем мониторинга и прогнозирования ТС, интегрированных в системы автоматического управления ГПА. Такие системы развиты для газотурбинных ГПА (ГТПА) и в меньшей степени для электроприводных ГПА (ЭГПА) [7–10]. Существующие системы мониторинга и прогнозирования ТС ЭГПА построены по тем же принципам (и, как правило, теми же разработчиками), что и системы для ГТПА. В них основной акцент делается на механические узлы и элементы ЭГПА. Системы мониторинга и современные методы оценки ТС приводных синхронных электродвигателей (СД) мощностью 4–25 МВт практически отсутствуют [11–15].

Отмеченные обстоятельства определяют актуальность вопросов, связанных с развитием методов оценки показателей надежности ЭГПА, совершенствованием существующих и разработкой новых методов оценки их технического состояния с использованием независимых многокритериальных универсальных систем мониторинга [16–20]. Актуальность этих задач подтверждается их соответствием приоритетным направлениям развития науки и техники, а также основными положениям энергетической стратегии России на период до 2030 года, Программой повышения надежности работы и эффективности КС с ЭГПА и вопросами, связанными с проблемами развития энергетики ПАО «Газпром».

При этом особое внимание уделяется именно дорогостоящим мощным СД ЭГПА, требующим анализа, оценки и мониторинга показателей надежности, а также исследованию работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях, включая безопасную и эффективную эксплуатацию электротехнических комплексов и систем.

Проблема оценки показателей надежности и мониторинга состояния мощных СД, работающих в составе электротехнических комплексов, в полной мере не решена и за рубежом [21, 22]. Несмотря на особую актуаль-

ность, перечисленные задачи решаются медленно, так как процессы деградации элементов крупных электрических машин достаточно сложно поддаются точному математическому описанию и зависят от многочисленных факторов [23–25]. Кроме того, исследования надежности мощных СД связаны с необходимостью проведения натурных испытаний (в том числе, и разрушающих) на дорогостоящем действующем оборудовании.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

1) выполнить обзор и критический анализ современных средств и методов оперативной диагностики и мониторинга ТС СД;

2) произвести сбор, обработку и анализ исходных данных по аварийности СД на КС эксплуатационных организаций;

3) исследовать режимы работы СД, влияющие на ресурс изоляции, с оценкой диапазонов изменения основных эксплуатационных факторов и определить их корреляции с наработкой до отказа;

4) разработать оптимальную встроенную систему мониторинга и прогнозирования (ВСМП) режимов работы ЭГПА, приводящих к ускоренному старению изоляции СД, алгоритм ее функционирования и компьютерную модель наработки до отказа.

Модель старения высоковольтной изоляции статора СД. Классификация причин отказов изоляции статоров СД приведена на рис. 1, а зависимость частоты отказов изоляции в форме диаграммы – на рис. 2.

Анализ приведенной на рис. 2 диаграммы позволяет выдвинуть гипотезу об экспоненциальном законе распределения отказов. Для обоснования данной гипотезы и определения числовых характеристик надежности выполнена статистическая обработка результатов с решением следующих задач:

- определен вид функции плотности распределения;
- вычислены параметры полученного распределения;
- с помощью критерия согласия установлена степень совпадения эмпирического распределения с теоретическим.

Распределение вероятности безотказной работы во времени и средняя наработка для экспоненциального закона распределения описываются уравнениями:

$$P(t) = \exp[-\lambda t], \quad T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda};$$

$$a(t) = \lambda \exp[-\lambda t],$$
(1)

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $a(t)$ – частота отказов; λ – интенсивность отказов; $T_{\text{ср}}$ – средняя наработка на отказ; t – интервал времени.

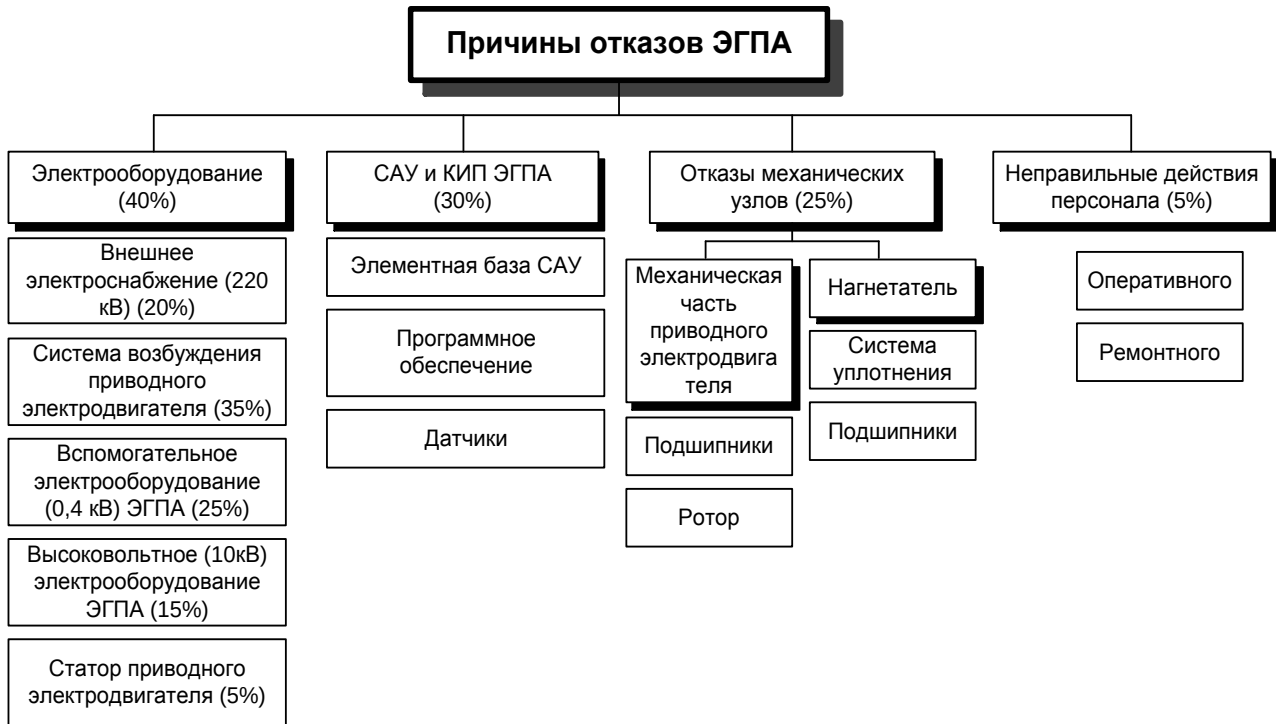


Рис. 1. Классификация причин отказов ЭГПА

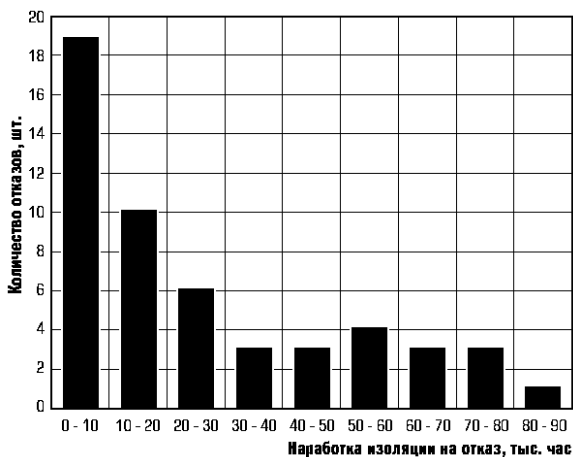


Рис. 2. Диаграмма частоты отказов изоляции статоров СД ЭГПА

При этом учитываем, что экспоненциальный закон является однопараметрическим с неизменной интенсивностью отказов $\lambda = \text{const}$ на интервале нормальных режимов эксплуатации.

Для проверки гипотезы проведем расчет согласия экспоненциального распределения с теоретическим по критерию χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{m=1}^k \frac{(h_m - N_0 p_m)^2}{N_0 p_m}, \quad (2)$$

где k – число интервалов (группы выборки); h_m , $N_0 p_m$ – эмпирическое и теоретическое значения абсолютной частоты отказов; N_0 – общее число наблюдаемых электродвигателей ЭГПА.

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Теоретические расчеты наработки электродвигателей ЭГПА

№ интервала	Граница интервала, тыс. ч	Абсолютная частота	Относительная частота	Интервальная вероятность отказа	Эмпирическая частота	Теоретическая частота	Отношение частот
k	Δt_i	h_m	$e^{-\lambda t_i}$	p_m	$N_0 \cdot p_m$	$(h_m - N_0 \cdot p_m)^2$	χ
1	0–10	19,000	1,000	0,318	16,523	6,137	0,371
2	10–20	10,000	0,682	0,217	11,273	1,620	0,144
3	20–30	6,000	0,465	0,148	7,691	2,859	0,372
4	30–40	3,000	0,318	0,101	5,247	5,050	0,962
5	40–50	3,000	0,217	0,069	3,580	0,336	0,094
6	50–60	4,000	0,148	0,047	2,442	2,426	0,993
7	60–70	3,000	0,101	0,032	1,666	1,779	1,067
8	70–80	3,000	0,069	0,022	1,137	3,471	3,053
9	80–90	1,000	0,047	0,015	0,776	0,050	0,065
	N_0, шт.	52,000				$\chi^2_{\text{расч.}}$	7,057
	$T_{\text{ср}}$, час	26,153				$\chi^2_{\text{табл.}}$	14,10
	λ	3,82E-05					

В результате расчета для доверительной вероятности нормального распределения $\beta = 0,95$ и числа степеней свободы $r = k - 2$ получено значение $\chi^2 = 7,0573$. Расчетное значение $\chi^2_{\text{расч}} < \chi^2_{\text{табл}} = 14,1$ и гипотеза об экспоненциальном распределении наработки на отказ СД не отвергается. Многочисленными исследованиями установлены зависимости старения изоляции от температуры:

- в соответствии с эмпирическими уравнениями Монтзингера, сроки службы изоляции T_1 и T_2 при различных температурах t_1 и t_2 связаны соотношением

$$\frac{T_1}{T_2} = 2^{\frac{t_1 - t_2}{\Delta v}}, \quad (3)$$

где Δv – постоянная, равная изменению температуры, вызывающему сокращение срока службы изоляции данного класса в 2 раза;

- в соответствии с законом Аррениуса, процесс старения изоляции описывается на основе кинетики химических реакций:

$$k = k_{\text{макс}} \exp\left(-\frac{W_a}{RT}\right), \quad (4)$$

где k – коэффициент скорости химической реакции; W_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

В результате проведенных исследований, получены статистические данные о наиболее характерных диапазонах изменения температуры обмотки, охлаждающего воздуха в различных режимах.

На рис. 3 приведена зависимость выработки ресурса изоляции СД от среднегодовой температуры, полученная на основе уравнения Вант-Гоффа-Аррениуса:

$$\ln T_0 = \frac{B}{\theta} - G, \quad (5)$$

где T_0 – средний срок службы; θ – среднегодовая температура изоляции, К; $B = 0,99 \cdot 10^4$ К; $G = 14,33$ для микалентной изоляции.

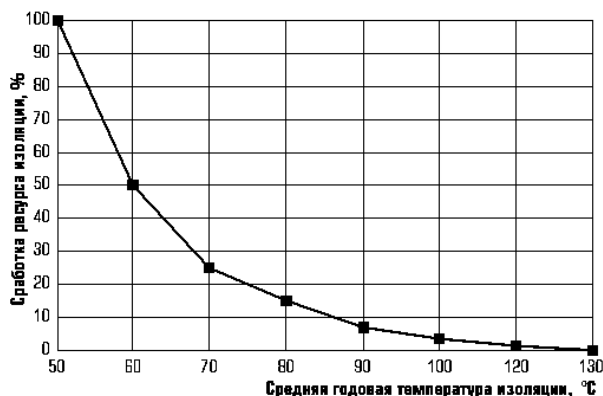


Рис. 3. Зависимость ресурса изоляции от среднегодовой температуры обмотки

Поскольку в ходе проведения исследований установлено, что отказы изоляции чаще происходят на электродвигателях, имеющих более высокую среднегодовую температуру обмотки, выражение (5) скорректировано с учетом статистического распределения среднегодовых температур обмоток статоров СД на различных КС и распределения их средней наработки на отказ.

Экспериментальное обоснование перехода на ТОиР ЭГПА по фактическому ТС СД.

Для расчета функций принадлежности СД ЭГПА используется метод парных сравнений Саати. Суть его заключается в том, что для каждой пары элементов универсального множества эксперт оценивает преимущество одного элемента над другим по отношению к свойству нечеткого множества.

На основе методики прогнозирования в программном комплексе MATLAB создана модель прогнозирования отказов изоляции СД, позволяющая вычислять значение наработки на отказ. В результате проведенных измерений частичных разрядов (ЧР) в обмотках статоров на семи ЭГПА определено текущее состояние изоляции обмоток статоров приводных электродвигателей СТД-12500-2.

Исследования показывают, что относительно высокие значения уровней ЧР обмотки статора СТД-12500-2 имеют ЭГПА №4 КЦ «Уренгой-Центр-2» и КС-25 «Починковская»

Для выявления причин повышенной разрядности обмоток при помощи программы PD-View (Iris Power) проведен детальный анализ фазового распределения частичных разрядов в обмотке электродвигателя ЭГПА №4 КЦ «Уренгой-Центр-2» и КС-25 «Починковская». За счет своевременного мониторинга ТС СД ЭГПА удалось избежать повреждения обмотки и снизить время простоя с 8760 часов до 720 часов, а также уменьшить на 2,5 млн руб. затраты на ремонт за счет замены капитального ремонта текущим.

Выводы. Рассмотренная выше методика позволяет в режиме реального времени контролировать техническое состояние приводных электродвигателей по характеристикам частичных разрядов, выявлять существенные изменения амплитуды и интенсивности последних. При увеличении показателей в 2 раза и более при идентичных параметрах работы машин выполняется анализ фазового распределения импульсов частичных разрядов, выявляется причина и делается прогноз их возникновения.

Внедрение разработанных мероприятий по мониторингу технического состояния приводных машин позволяет сократить время простоя ЭГПА в среднем до 2160 ч/год. При этом вероятность срыва планового задания, составит $R_{\text{нпз}} = 0,08$, что приводит к снижению ожидаемого ущерба в 1,9 раза ($У_{\text{нпз}} = 24$ млн руб./год). Внедрение разработанных методов мониторинга технического

состояния позволяет в среднем в 4 раза сократить время нахождения газоперекачивающих агрегатов в ремонте и на 30–50 % затраты на капитальный ремонт приводных машин.

Список литературы

1. Репин Д.Г. Концепты системы мониторинга технического состояния КС // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 12. – С. 30–35.
2. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, В.И. Воронков и др. – Н.Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.
3. Kryukov O., Saushev A., Shergina O., Butsanets A. Electromagnetic compatibility of multifunctional automation systems for electrical equipment using the example of electric drives // E3S Web of Conferences. "22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies, EMMFT 2020". – 2021. – Vol. 244. – P. 09007.
4. Серебряков А.В., Титов В.Г. Прогнозирование технического состояния энергетических установок // Электротехника. – 2017. – № 1. – С. 60–65.
5. Ziuzev A., Metelkov V. Analysis and simulation of thermodynamic processes in high-powered AC electric motors // 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). – Saint-Petersburg, 2020. – P. 9249327. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249327.
6. Serebryakov A.V. Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives // Bulletin of South Ural State University. Ser.: Power Engineering. – 2017. – Vol. 17, No. 3. – P. 102–110.
7. Васенин А.Б., Степанов С.Е. Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58.
8. Kryukov O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – P. 516–520.
9. Babichev S.A., Titov V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81, No. 12. – P. 649–655.
10. Babichev S.A., Bychkov E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81. – P. 489–494.
11. Крюков О.В. Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С. 50–58.
12. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Титов В.Г. Реализация капсулированных электроприводных ГПА на объектах «Газпром» // Известия вузов. Электромеханика. – 2020. – Т. 63, № 1. – С. 31–37.
13. Крюков О.В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы синхронных электроприводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 43–46.
14. Крюков О.В. Оценка эксплуатационных факторов электроприводных ГПА по нормативным требованиям мониторинга // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 11. – С. 50–57.

15. Babichev S.A., Zakharov P.A. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // Automation and Remote Control. – 2011. – Vol. 72, No. 6. – P. 175–180.
16. Серебряков А.В. Универсальная система мониторинга электродвигателей ГПА // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 4(546). – С. 74–81.
17. Крюков О.В. Подход к прогнозированию технического состояния ЭГПА // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 9. – С. 30–34.
18. Леонов В.П., Федоров О.В. Применение микропроцессорной техники в нагружающих устройствах // Двигателестроение. – 1987. – № 7. – С. 37–43.
19. Крюков О.В. Автоматизированное нагружающее устройство для комплексных испытаний поршневых двигателей // Двигателестроение. – 2016. – № 2(264). – С. 30–35.
20. Макриденко Л.А., Сарычев А.П. Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики. – М.: АО «ВНИИЭМ», 2017.
21. Blagodarov D.A., Dulnev N.N. Intelligent control of electric machine drive systems // 10th ICEPDS – Conference Proceedings. – 2018. – P. 8571670.
22. Serebryakov A.V. Active and adaptive algorithms of autonomous power plants control and monitoring // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 – Proceedings. – 2016. – P. 7911445.
23. Gulyaev I.V., Teplukhov D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 7. – P. 473–478.
24. Степанов С.Е., Васенин А.Б. Моделирование и мониторинг термодинамических процессов в синхронных электродвигателях // Контроль. Диагностика. – 2020. – № 4. – С. 28–35.
25. Valtchev S., Belousov A.S. Comparative Analysis of Electric Drives Control Systems Applied to Two-Phase Induction Motors // Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020 this link is disabled. – 2020. – P. 918–922, 9280637.

References

1. Repin, D.G. Kontsepty sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya KS [Concepts of the system for monitoring the technical condition of the compressor station]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 30–35.
2. Puzhaylo, A.F., Spiridovich, E.A., Voronkov, V.I., Kadin, V.I., Kryukov, O.V., Rubtsov, I.E., Stepanov, S.E., Titov, V.G., Papkov, B.V., Baranov, V.G., Milov, V.R., Sokolova, E.S., Bychkov, E.V., Zakharov, P.A., Mel'nikov, V.L., Babichev, S.A., Kryukov, A.O., Kiyarov, N.V., Ermolaev, A.I. *Energosberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations]. N.Novgorod: Vektor TiS, 2010. 570 p.
3. Kryukov, O., Saushev, A., Shergina, O., Butsanets, A. Electromagnetic compatibility of multifunctional automation systems for electrical equipment using the example of electric drives. *E3S Web of Conferences* «22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable

Energy Technologies, EMMFT 2020», 2021, vol. 244, p. 09007.

4. Serebryakov, A.V., Titov, V.G. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya energeticheskikh ustanovok [Forecasting the technical condition of power plants]. *Elektrotekhnika*, 2017, no. 1, pp. 60–65.

5. Ziuzev, A., Metelkov, V. Analysis and simulation of thermodynamic processes in high-powered AC electric motors. *11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS*. Saint-Petersburg, 2020. P. 9249327. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249327.

6. Serebryakov, A.V. Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 102–110.

7. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E. Metodologiya i sredstva operativnogo monitoringa elektrodvigatelay na KS [Methodology and means of operational monitoring of electric motors at compressor stations]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 50–58.

8. Kryukov, O.V. Methodology and tools for neuro-fuzzy prediction of the status of electric drives of gas-compressor units. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, pp. 516–520.

9. Babichev, S.A., Titov, V.G. Automated safety system for electric driving gas pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 12, pp. 649–655.

10. Babichev, S.A., Bychkov, E.V. Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, pp. 489–494.

11. Kryukov, O.V. Monitoring usloviy ekspluatatsii elektrodvigatelay gazoperekachivayushchikh agregatov [Monitoring the operating conditions of electric motors of gas pumping units]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 50–58.

12. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E., Titov, V.G. Realizatsiya kapsulirovannykh elektroprivodnykh GPA na ob"ektakh «Gazprom» [Implementation of encapsulated electric drive GPA at Gazprom facilities]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 31–37.

13. Kryukov, O.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya raboty sinkhronnykh elektroprivodov [Built-in system for diagnostics and forecasting of synchronous electric drives]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2005, no. 6, pp. 43–46.

14. Kryukov, O.V. Otsenka ekspluatatsionnykh faktorov elektroprivodnykh GPA po normativnym trebovaniyam monitoringa [Assessment of operational factors of electric-driven gas pumping units according to regulatory monitoring requirements]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 11, pp. 50–57.

15. Babichev, S.A., Zakharov, P.A. Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 6, pp. 175–180.

16. Serebryakov, A.V. Universal'naya sistema monitoringa elektrodvigatelay GPA [Universal system for monitoring GPA electric motors]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2016, no. 4(546), pp. 74–81.

17. Kryukov, O.V. Podkhod k prognozirovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya EGPA [Approach to forecasting the technical condition of EGPA]. *Pribery i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2016, no. 9, pp. 30–34.

18. Leonov, V.P., Fedorov, O.V. Primenenie mikroprotssornoy tekhniki v nagruzhayushchikh ustroystvakh [Application of microprocessor technology in loading devices]. *Dvigatelistroenie*, 1987, no. 7, pp. 37–43.

19. Kryukov, O.V. Avtomatizirovannoe nagruzhayushchee ustroystvo dlya kompleksnykh ispytaniy porshnevnykh dvigateley [Automated loading device for complex tests of piston engines]. *Dvigatelistroenie*, 2016, no. 2(264), pp. 30–35.

20. Makridenko, L.A., Sarychev, A.P. *Monitoring i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskikh sistem energetiki* [Monitoring and forecasting the technical condition of electromechanical power systems]. Moscow: AO «VNIIE», 2017.

21. Blagodarov, D.A., Dulnev, N.N. Intelligent control of electric machine drive systems. *10th ICEPDS – Conference Proceedings*, 2018, p. 8571670.

22. Serebryakov, A.V. Active and adaptive algorithms of autonomous power plants control and monitoring. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM*, 2016, p. 7911445.

23. Gulyaev, I.V., Teplukhov, D.Y. Method for stabilizing the operation of synchronous machines using a virtual load sensor. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no. 7, pp. 473–478.

24. Stepanov, S.E., Vasenin, A.B. Modelirovanie i monitoring termodinamicheskikh protsessov v sinkhronnykh elektrodvigatelayakh [Modeling and monitoring of thermodynamic processes in synchronous electric motors]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, no. 4, pp. 28–35.

25. Valtchev, S., Belousov, A.S. Comparative Analysis of Electric Drives Control Systems Applied to Two-Phase Induction Motors. *Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020* this link is disabled, 2020, pp. 918–922, 9280637.