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](mailto: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](mailto: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](mailto: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 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 обеспечение их теоретически обоснованной методологией оценки технического состояния электропривода в режиме *on-line* и автоматизированного прогнозирования его эксплуатационных параметров.

**Материалы и методы.** Предлагается эмпирический метод моделирования старения высоковольтной изоляции высоковольтной обмотки статора синхронной машины, состоящий из статистической обработки данных по аварийности приводов на компрессорных станциях, исследования режимов работы, влияющих на ресурс изоляции с оценкой диапа­зонов изменения эксплуатационных факторов и определения их корреляции с наработ­кой до отказа. Итогом моделирования является проект оптимальной встроенной системы прогнозирования режимов работы с алгоритмом ее адаптивного функционирования по эмпирическим уравнениям Монтзингера и метода парных сравнений Саати по на­работке до отказа.

**Результаты.** Предложенный подход позволяет в режиме реального времени контролировать техническое состояние приводных машин по характеристикам частичных разрядов, выявлять существенные изменения в трендах амплитуды и ин­тенсивности последних. При увеличении показателей в два и более раза при идентичных параметрах работы машин выполняется анализ фазового распределения импульсов частичных разрядов и выявляется при­чина с прогнозом. Сокращение времени простоя и увеличение коэффициента технического использования системы может быть достигнуто за счет применения прогнозирования в составе системы управления техническим состоянием электропривода, которое позволяет инициировать превентивные действия для предотвращения отказа или подготовки к ремонту.

**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 капремонтов, контролировать работу системы охлаждения мощных машин и поддерживать оптимальные режимы, позволяющие увеличить ресурс изоляции, при совместном использовании данных вибрационного анализа и FFT-анализа потребления мощности точно выявлять причины повышенных уровней вибрации, а также снизить общие эксплуатационные расходы.

**Ключевые слова:** компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, техническое обслуживание и ремонт, мониторинг, электропривод, прогнозирование, автоматизация.

**Alexey Rufimovich Kolganov**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin”, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Drive and Industrial Installations Automation, Russia, Ivanovo, phone (4932) 26-97-09, e-mail: klgn@drive.ispu.ru .

**Oleg Viktorovich Kryukov**

TСN-Electro LLC, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science, Russia, Nizhny Novgorod, phone (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru .

**Sergey Eugenievich Stepanov**

Gazprom Design LLC, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of the Technological Design Department, Nizhny Novgorod, Russia, phone (831) 428-28-63, e-mail: [stepanov55@yandex.ru](mailto: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 technological 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, is subject to continuous monitoring and resource forecasting in the medium term. The existing systems for monitoring the technical condition of drive electric motors are built according to outdated methods and do not provide reliable and automatic forecasting of the resource of high-power electric machines. The domestic electrotechnical market today lacks reliable and adequate technical means and methods of preventive forecasting 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 them with a theoretically sound methodology for assessing the technical condition of an electric appliance in on-line mode and automated forecasting of its operational parameters.

**Materials and methods.** An empirical method is proposed for modeling the aging of the high-voltage insulation of the high-voltage stator winding of a synchronous machine, consisting of statistical processing of data on drive failures at compressor stations, investigation of operating modes affecting the insulation life with an assessment of the ranges of operational factors and determining their correlation with operating time to failure. The result of the simulation is the design of an optimal integrated system for predicting operating modes with an algorithm for its adaptive functioning based on the empirical Montzinger equations and the Saati method of paired comparisons for operating time to failure.

**Results.** The proposed approach makes it possible to monitor the technical condition of the drive machines in real time based on the characteristics of partial discharges, and to identify significant changes in the amplitude and intensity trends of the latter. When the indicators increase by two or more times with identical machine operation parameters, the phase distribution of partial discharge pulses is analyzed and the cause with the forecast is identified. Reducing downtime and increasing the coefficient of technical utilization of the system can be achieved through the use of forecasting as part of the control system for the technical condition of the electric drive, which allows you to initiate preventive actions to prevent failure or prepare for repair.

**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, while combining data from vibration analysis and FFT analysis of consumption The ability to accurately identify the causes of increased vibration levels, as well as reduce overall operating costs.

**Key words:** compressor station, gas pumping unit, maintenance and repair, monitoring, electric drive, forecasting, automation.

**Введение**

В настоящее время многочисленными нормативно-техническими документами установлены требования по оснащению оборудования магистральных газопроводов (МГ) системами мониторинга для контроля состояния, диагностирования и прогнозирования ресурса [1-3]. В основном это относится к прогнозу коррозионного состояния труб МГ с оценкой влияния внешних воздействий и учете 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 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 их технического состояния (ТС) и продлению сроков эксплуатации. Поэтому в ПАО «Газпром» активно ведутся работы по созданию и вне­дрению систем монито­ринга и прогнозированию ТС интегрированных в системы автоматического управления газоперекачивающими агрегатами (ГПА). Такие системы развиты для газо­турбинных ГПА (ГГПА) 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 ГГПА. В них основной акцент делается на механические узлы и эле­менты ЭГПА, практически отсутствуют системы мониторинга и совре­менные методы оценки ТС приводных синхронных электродвигателей (СД) мощностью 4-25 МВт [11-15].

Отмеченные обстоятельства определяют актуальность вопросов, свя­занных с развитием методов оценки показателей надёжности 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 надёж­ности, 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 надёжности и мониторинга состояния мощных СД, рабо­тающих в со­ставе электротехнических комплексов, в полной мере не решена и за рубежом [21,22]. Несмотря на особую актуальность, 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 соответствии 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 их интенсивность в зависимости от наработки до отказа – на рис. 2.



Рис. 1. Классификация причин отказов ЭГПА

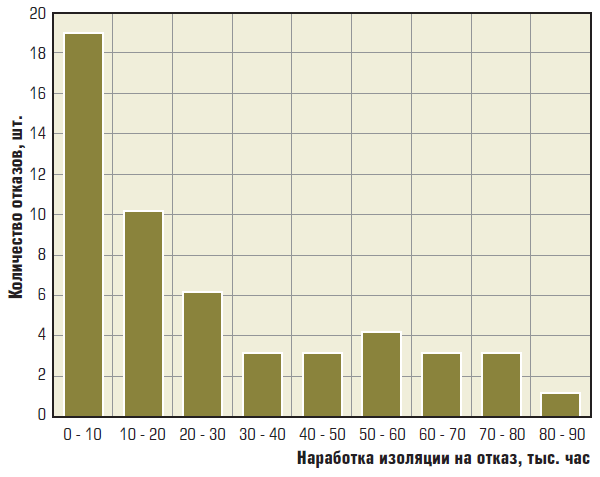
****

Рис. 2. Диаграмма частоты отказов изоляции статоров СД ЭГПА.

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

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

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

 (1)

где *P(t)* – вероятность безотказной работы, *a(t)* – частота отказов, λ – интенсивность отказов, *Т*ср – средняя наработка до отказа, *t* - интервал времени. При этом учитываем, что экспоненциаль­ный закон является однопараметрическим с неизменной интенсивностью отказов λ=const на ин­тервале нормальных режимов эксплуатации.

Для проверки гипотезы проведем расчет согласия экспоненциального распределения с тео­ретическим по критерию χ2

 (2)

где *k* – число интервалов (группы выборки); *hm, Nppm -* эмпирическое и теоретическое значе­ния абсолютной частоты отказов; *N*0 – общее число наблюдаемых электродвигателей ЭГПА. Ре­зультаты расчетов сведены в табл. 1.

**Таблица 1.**

**Теоретические расчеты наработки электродвигателей ЭГПА**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  инт | Граница ин­тервала, тыс.час | Абсолютная частота | Относит. частота | Интервальная вероятность отказа | Эмпириче­ская час­тота | Теоретическая частота | Отношение частот |
| *k* | Δ*ti* | *hm* | e-λ*ti* | *pm* | *N*0· *pm* | *(hm - N*0· *pm)*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 |  |  |  | χ2расч. | **7,057** |
|  | ***Т*ср, час** | 26.153 |  |  |  | χ2табл. | **14,10** |
|  | **λ** | 3,82Е-05 |  |  |  |  |  |

В результате расчета для доверительной вероятности нор­мального распределения   
β = 0,95 и числа степеней свободы *r* = *k* − 2, получено значение χ2 = 7,0573. Расчетное значение χ2расч2< χ2табл2 = 14,1 и гипотеза об экспоненциальном распределении наработки на отказ СД не отвергается. Многочисленными исследованиями, приведенными выше, установлены зависимости старе­ния изоляции от температуры:

* эмпирические уравнения Монтзингера, в соответствии с которыми сроки службы изоля­ции (*Т*1 и *Т*2) при различных температурах (**1 и **2) связаны соотношением

 (3)

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

* закон Аррениуса, описывающий процесс старения изоляции на основе кинетики химиче­ских реакций:

 (4)

где *k* – коэффициент скорости химической реакции, *Wa* – энергия активации, *R* – универсальная газовая постоянная, *Т* – 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:

 (5)

где *T0* – средний срок службы; θ – среднегодовая температура изоляции, К; *В* = 0,99 ∙ 104 К, для микалентной изоляции *G*=14,33.

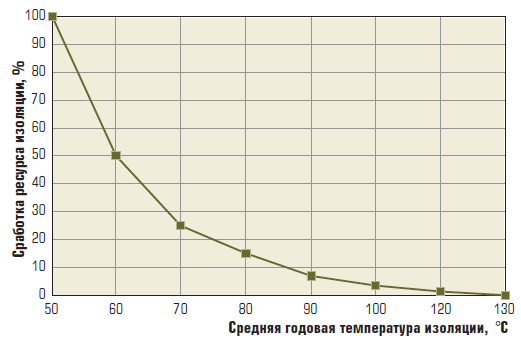


Рис. 3. Зависимость ресурса изоляции от среднегодовой температуры обмотки

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 до отказа. В ре­зультате проведенных измерений частичных разрядов (ЧР) в обмотках статоров на семи ЭГПА было 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 час до 720 час, а также значительно снизить затраты на его ремонт путем замены капитального ре­монта текущим, что позволило снизить затраты на 2,5 млн. руб.

**Выводы.**

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

Внедрение разработанных мероприятий по мониторингу технического состояния приводных машин по­зволяет сократить время простоя ЭГПА в среднем до 2160 час/год. При этом вероятность срыва планового задания, составит Рнпз = 0,08, что приводит к снижению ожидаемого ущерба в 1,9 раза (Унпз= 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. **Пужайло А.Ф. и др.** Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография // Н.Новгород: Вектор ТиС, 2010. 570с.

3. **Saushev A., Shergina O., Butsanets A.** Electromagnetic compatibility of multifunctional automation systems for electrical equipment using the example of electric drives // В сборнике: E3S Web of Conferences. 22. "22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies, EMMFT 2020" 2021. С. 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 // В сборнике: 2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 - Proceedings. 11. 2020. С. 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. Т. 17. № 3. С. 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. Т. 83. С. 516-520.

9. **Babichev S.A., Titov V.G.** Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. 2010. Т. 81. № 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. Т. 81. С. 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. T. 72. No. 6. C. 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 // В сборнике: 2018 10th ICEPDS - Conference Proceedings. 10. 2018. С. 8571670.

22. **Serebryakov A.V.** Active and adaptive algorithms of autonomous power plants control and monitoring // В сборнике: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings. 2016. С. 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. Т. 90. № 7. С. 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 2020this link is disabled, 2020, с. 918–922, 9280637.

**References**

1. **Repin D.G.** Koncepty sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya KS // Kontrol'. Diagnostika. 2017. № 12. S. 30-35.

2. **Puzhajlo A.F. i dr.** Energosberezhenie i av-tomatizaciya elektrooborudovaniya kompressornyh stancij: monografiya // N.Novgorod: Vektor TiS, 2010. 570s.

3. **Saushev A., Shergina O., Butsanets A.** Elec-tromagnetic compatibility of multifunctional automation systems for electrical equipment using the example of electric drives // V sbornike: E3S Web of Conferences. 22. \"22nd International Scientific Conference on Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies, EMMFT 2020\" 2021. S. 09007.

4. **Serebryakov A.V., Titov V.G.** Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya energeticheskih ustanovok // Elektrotekhnika. 2017. № 1. S. 60-65.

5. **Ziuzev A., Metelkov V.** Analysis and simulation of thermodynamic processes in high-powered AC electric motors // В сборнике: 2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 - Proceedings. 11. 2020. С. 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. Т. 17. № 3. С. 102-110.

7. **Vasenin A.B., Stepanov S.E.** Metodologiya i sredstva operativnogo monitoringa elektrodvigate-lej na KS // Kontrol'. Diagnostika. 2016. № 12. S. 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. Т. 83. С. 516-520.

9. **Babichev S.A., Titov V.G.** Automated safety system for electric driving gas pumping units // Russian Electrical Engineering. 2010. Т. 81. № 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. Т. 81. С. 489-494.

11. **Kryukov O.V.** Monitoring uslovij eksplua-tacii elektrodvigatelej gazoperekachivayushchih agre-gatov // Kontrol'. Diagnostika. 2016. № 12. S. 50-58.

12. **Vasenin A.B., Stepanov S.E., Titov V.G.** Realizaciya kapsulirovannyh elektroprivodnyh GPA na ob"ektah «Gazprom» // Izvestiya VUZov. Elektromekhanika. 2020. T. 63. № 1. S. 31-37.

13. **Kryukov O.V.** Vstroennaya sistema diagno-stirovaniya i prognozirovaniya raboty sinhronnyh elektroprivodov // Izvestiya VUZov. Elektromekhani-ka. 2005. № 6. S. 43-46.

14. **Kryukov O.V.** Ocenka ekspluatacionnyh faktorov elektroprivodnyh GPA po normativnym trebovaniyam monitoringa // Kontrol'. Diagnostika. 2018. № 11. S. 50-57.

15. **Babichev S.A., Zakharov P.A.** Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // Automation and Remote Control. 2011. T. 72. No. 6. C. 175-180.

16. **Serebryakov A.V.** Universal'naya sistema monitoringa elektrodvigatelej GPA // Izvestiya VU-Zov. Elektromekhanika. 2016. № 4 (546). S. 74-81.

17. **Kryukov O.V.** Podhod k prognozirovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya EGPA // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2016. № 9. S. 30-34.

18. **Leonov V.P., Fedorov O.V.** Primenenie mikroprocessornoj tekhniki v nagruzhayushchih ustroj-stvah // Dvigatelestroenie. 1987. № 7. S. 37-43.

19. **Kryukov O.V.** Avtomatizirovannoe nagruzha-yushchee ustrojstvo dlya kompleksnyh ispytanij porsh-nevyh dvigatelej // Dvigatelestroenie. 2016. № 2 (264). S. 30-35.

20. **Makridenko L.A., Sarychev A.P.** Monitoring i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya elek-tromekhanicheskih sistem energetiki // M.: AO «VNIIEM», 2017.

21. **Blagodarov D.A., Dulnev N.N.** Intelligent control of electric machine drive systems // В сборнике: 2018 10th ICEPDS - Conference Proceedings. 10. 2018. С. 8571670.

22. **Serebryakov A.V.** Active and adaptive algorithms of autonomous power plants control and monitoring // В сборнике: 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016 - Proceedings. 2016. С. 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. Т. 90. № 7. С. 473-478.

24. **Stepanov S.E., Vasenin A.B.** Modelirovanie i monitoring termodinamicheskih processov v sinhronnyh elektrodvigatelyah // Kontrol'. Diagnostika. 2020. № 4. S. 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 2020this link is disabled, 2020, с. 918–922, 9280637.