

# 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

**Леонид Романович Романов**

ООО «ТСН-электро», аспирант, технико-коммерческий инженер, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: romanovl.r@yandex.ru

## Автоматизация мониторинга технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Компрессорные станции магистральных газопроводов относятся к объектам повышенной опасности. В качестве приводов газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях используются газотурбинные, поршневые и электроприводные установки. Но именно автоматизированный электропривод мощностью 4–25 МВт является наиболее перспективной системой благодаря низким капитальным и эксплуатационным затратам, высоким энергетическим показателям в совокупности с высокой надежностью и экологичностью. Однако требования обеспечения безаварийной работы агрегатов компрессорных станций постоянно ужесточаются в соответствии с отраслевой нормативной базой. На отечественном электротехническом рынке сегодня отсутствуют надежные и адекватные технические средства и методы превентивного прогнозирования состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов. В этой связи целью исследования является обеспечение теоретически обоснованной методологией оценки технического состояния электропривода в режиме *on-line* и среднесрочного прогноза его эксплуатационных параметров.

**Материалы и методы.** Данные о состоянии электропривода снимаются с датчиков и подаются на подсистему прогнозирования технического состояния. В случае формирования решения о наступающем отказе подсистема обслуживания выполняет действия по предотвращению отказов.

**Результаты.** Предлагается метод управления техническим состоянием на основе Байесовских моделей прогнозирования состояния по контролируемым параметрам и их соответствию заложенной базе знаний. Разработана и исследована автоматизированная система прогнозирования состояния электропривода газоперекачивающих агрегатов. Показано, что сокращение времени простоя и увеличение коэффициента технического использования системы достигается 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; 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 исключить тепловое действие токов, снизить стоимость капитальных ремонтов, снизить общие эксплуатационные расходы.

**Ключевые слова:** техническая диагностика, оперативное прогнозирование, электропривод, газоперекачивающие агрегаты, диагностическая экспертная система

**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**

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

**Leonid Romanovich Romanov**

LLC "TSN-Electro", Postgraduate Student, Technical and Commercial Engineer, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: romanovl.r@yandex.ru

## Automation of monitoring the technical condition of electric-driven gas pumping units

### Abstract

**Background.** Compressor stations of main gas pipelines are classified as high-risk facilities. Gas turbines, piston and electric drive units are used as drives of gas pumping units at compressor stations. But it is the automated electric drive with a capacity of 4–25 MW that is the most promising system due to low capital and operating costs, high energy performance combined with high reliability and environmental friendliness. However, the requirements to ensure trouble-free operation of compressor station units are constantly being tightened in accordance with the industry regulatory framework. In the domestic electrical engineering market today, there are no reliable and adequate technical means and methods of preventive forecasting of the condition of electric drive gas pumping units. 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 the on-line mode and a medium-term forecast of its operational parameters.

**Materials and methods.** Data on the condition of the electric drive is taken from the sensors and fed to the subsystem for predicting the technical condition. In case, a decision is made about an upcoming failure, the maintenance subsystem prevents failures.

**Results.** The authors have proposed a method of technical condition management based on Bayesian models of condition forecasting based on controlled parameters and their compliance with the embedded knowledge base. An automated system for forecasting the condition of an electric drive of gas pumping units is developed and studied. It is shown that a reduction in downtime and an increase of the utilization factor of the system is achieved due to forecasting as part of the electric drive technical condition management system, which allows us to initiate preventive actions or to prepare for repair.

**Conclusions.** The use of automated systems for predicting the technical condition of the electric drive of the gas pumping unit allows us to plan capital and routine repairs based on the actual condition, to eliminate the thermal effect of currents and reduce the cost of overhauls, to monitor the operation of the cooling system of powerful machines and maintain optimal modes that increase the insulation life; with the combined use of vibration analysis and FFT analysis of power consumption, accurately identify the causes of increased vibration levels, as well as to lower overall operating costs.

**Key words:** technical diagnostics, operational forecasting, electric drive, gas pumping units, diagnostic expert system

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2025.1.086-092

**Введение.** В настоящее время все магистральные газопроводы (МГ) Российской Федерации и стран ближнего зарубежья относятся к промышленным объектам повышенной опасности [1–3] и независимо от режимов работы электроприводных компрессорных станций (КС) с каждым годом федеральными и отраслевыми нормативно-техническими документами ужесточаются требования обеспечения повышенной надежности и безаварийности работы всего оборудования [4–6]. Это обусловлено не только объективными причинами

(устаревшее оборудование, ненадежное электроснабжение КС и т.п.), но и нередко наличием неквалифицированного обслуживания и попыток внешнего проникновения.

В системах оперативного мониторинга технического состояния (ТС) ответственных агрегатов газотранспортных систем наиболее эффективной процедурой является не традиционное диагностирование электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [7–10], а достоверное прогнозирование их ТС с оценкой остаточного ресурса агрегата. Это позволяет

предотвратить внезапные нештатные аварии и перейти от плано-предупредительных процедур технического обслуживания и ремонта (ТОиР) к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования [11–13].

Принцип управления техническим состоянием на основе прогнозирования иллюстрирует рис. 1 [14–16]. Данные о состоянии объекта снимаются с датчиков и подаются на подсистему прогнозирования технического состояния.

При условии формирования решения о наступающем отказе подсистема ТОиР выполняет действия, которые направлены:

- на предотвращение отказов, включая комплекс мероприятий по обеспечению функционирования системы без прерывания;
- минимизацию последствий отказа за счет подготовки к ожидаемому отказу, что позволяет сократить время ремонта, а следовательно, и продолжительность неработоспособного состояния.

Большинство известных методов (рис. 2) [17–20] основываются на определении объективных закономерностей развития дефектов и повреждений, статистической обработке данных, экстраполяции трендов до предельно допустимых значений и на вероятностной оценке значений показателей.

**Методология систем прогнозирования технического состояния ЭГПА.** В подсистеме прогнозирования определяется вероятность  $P(z=1/x)$  наступления отказа на рассматриваемом интервале времени. Здесь  $z$  – переменная, характеризующая состояние технического объекта,  $x$  – данные наблюдения, снимаемые с датчиков. В условиях априорной неопределенности используется оценка  $\hat{P}(z=1/x)$ , которая находится в результате структурно-параметрического синтеза (обучения) предиктора на основе эмпирических данных, составляющих обучающую выборку  $D$ .

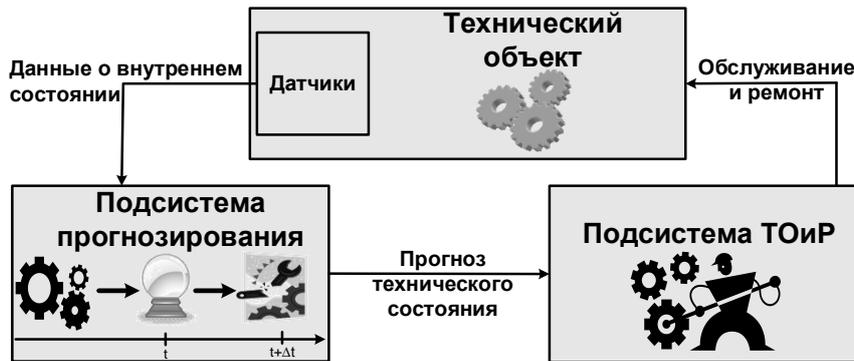


Рис. 1. Система управления состоянием ЭГПА на основе прогнозирования



Рис. 2. Классификация методов прогнозирования ЭГПА

Решение о формировании сигнала предупреждения о наступающем отказе выносится в результате сравнения с пороговым значением найденной вероятности наступления отказа на заданном интервале. Нахождение этого значения представляет отдельную задачу и связано с используемым критерием, который определяет эффективность прогнозов.

Применение прогнозирующего контроля направлено на сокращение издержек, вызванных простоем технического объекта. Эффект от внедрения прогнозирующего контроля можно оценить с помощью коэффициента технического использования, который определяется выражением

$$K = t_F / (t_F + t_R).$$

Для системы управления техническим состоянием с использованием прогнозирования можно записать аналогичную формулу:

$$K' = t'_F / (t'_F + t'_R),$$

где  $t_F$  и  $t'_F$  – среднее время наработки на отказ,  $t_R$  и  $t'_R$  – среднее время ремонта системы без применения и с применением прогнозирующего контроля соответственно.

Эффект от применения прогнозирующего контроля охарактеризуем величиной

$$v = \frac{1 - K'}{1 - K} = \frac{(t_F + t_R)t'_R}{(t'_F + t'_R)t_R}, \quad (1)$$

которая показывает, во сколько раз изменяется среднее время неработоспособного состояния технического объекта. Эффект от применения прогнозирующего управления техническим состоянием имеет место при  $v < 1$  и возрастает по мере уменьшения неотрицательной величины  $v$ . Для проведения анализа эффективности применения процедур прогнозирования в составе системы управления техническим состоянием охарактеризуем подсистему ТОиР вероятностью  $P_P$  возникновения (не предотвращения) отказа при условии правильного предсказания и вероятностью  $P_E$  привнесения отказа при условии ошибочного предсказания (ложной тревоги).

Подсистема прогнозирования отказов может быть охарактеризована вероятностью ложной тревоги (ошибки первого рода)  $\alpha$  и вероятностью пропуска наступающего неисправного состояния технического объекта (ошибки второго рода)  $\beta$ .

Если выполненные превентивные действия при правильном предсказании не позволили предотвратить отказ, то, как правило, устранение отказа выполняется за меньшее время. Соответствующее среднее время ремонта с подготовкой обозначим  $t_{PR}$ , а изменение (сокращение) среднего времени ремонта за счет подготовки охарактеризуем коэффициентом

$$K_R = t_{PR} / t_R. \quad (2)$$

Среднее время ремонта, вызванного привнесенным отказом, обозначим  $t_{RE}$  и, аналогично (2), введем коэффициент

$$K_E = t_{RE} / t_R. \quad (3)$$

После преобразований (1)–(3) получаем выражение для оценки эффекта от применения прогнозирования:

$$v = K_P + \alpha K_E (1 - P_F) / P_F + \beta (1 - K_P), \quad (4)$$

где  $P_F$  – априорная вероятность возникновения неисправного состояния за анализируемый интервал времени;  $K_P = k_P P_P$ ;  $K_E = k_E P_E$ .

Согласно (4), эффективность прогнозирования технического состояния возрастает (величина  $v$  уменьшается) при уменьшении  $K_P$  и  $K_E$ . Для идеальной подсистемы ТОиР  $K_P = 0$  и  $K_E = 0$ , что может быть обеспечено, если  $P_P = 0$  и  $P_E = 0$ . При этом все правильно предсказанные отказы предотвращаются, а обработка ложных тревог не приводит к дополнительному простоему. В этом случае величина выигрыша  $v = \beta$  полностью определяется вероятностью пропуска при прогнозировании отказа.

Выигрыш от применения прогнозирования технического состояния возрастает при уменьшении  $\alpha$  и  $\beta$ . При высокой точности прогнозирования ( $\alpha \approx 0$ ,  $\beta \approx 0$ ) величина выигрыша составляет  $v \approx K_P$ . Однако уменьшение одной из вероятностей  $\alpha$  или  $\beta$  сопровождается увеличением другой в соответствии с рабочей характеристикой предиктора. При этом возникает необходимость синтеза решающего правила для принятия решений о наступающем отказе из условия минимизации целевой функции (4).

Анализ выражения (4) свидетельствует о том, что целевая функция представляет собой взвешенную сумму вероятностей ошибок первого и второго рода и по своей структуре близка к выражению для среднего риска. Применяя критерий минимума среднего риска, приходим к следующему правилу принятия решения о наступающем отказе:

$$\hat{z} = H(\Lambda(\mathbf{x}) - h), \quad (5)$$

где  $H(a)$  – функция Хевисайда такая, что  $H(a) = 1$  при  $a \geq 1$  и  $H(a) = 0$  при  $a < 0$ ;  $\Lambda(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}) / f_0(\mathbf{x})$  – отношение правдоподобия ( $f_1(\mathbf{x})$  и  $f_0(\mathbf{x})$  – плотности вероятности признаков для прогнозируемого исправного и неисправного состояний соответственно);  $h$  – порог, определяемый выражением

$$h = \frac{(1 - P_F) K_E}{P_F (1 - K_P)}. \quad (6)$$

Переходя к использованию апостериорных вероятностей, решающее правило (5) представим в виде

$$\hat{z} = H(P(z=1|\mathbf{x}) - h_p), \quad (7)$$

где  $h_p$  – порог, определяемый с учетом (6) выражением

$$h_p = \frac{K_E}{1 - K_P + K_E}. \quad (8)$$

**Эффект от перехода к прогнозированию ТС.** Выигрыш от применения прогнозирования уменьшается при уменьшении априорной вероятности  $P_F$  отказа на анализируемом интервале времени. При этом повышаются требования к точности прогнозирования. В то же время при использовании оптимального решающего правила (7), (8) не происходит снижения эффективности по отношению к системе ТОиР без прогнозирования технического состояния, т. е.  $v_L \leq 1$ .

В общем случае информация о состоянии технического объекта может быть получена на основе обработки показаний интеллектуальных датчиков или результатов тестов. В случае использования вероятностной модели сложной системы элементарное действие по сбору информации заключается в определении значения одной из переменных  $y_i$ . Такие действия характеризуются определенной стоимостью  $c_i$  (затратами на проведение теста) и ценностью.

Величина  $v_L$ , обеспечиваемая при принятии решений о наступающих отказах с помощью (7), (8), зависит от множества переменных, значения которых доступны на момент принятия решения. Так, после проведения  $i$ -го теста решение о состоянии системы принимается с использованием результатов теста  $y_i$  на основе распределения вероятностей  $P(z|\mathbf{x}, y_i)$ .

Однако на момент вынесения решения о целесообразности проведения некоторого теста его результат является неизвестным, поэтому ожидаемый эффект от проведения теста

определяются с использованием усреднения по множеству возможных исходов:

$$v_L(y_i, \mathbf{x}) = \sum_{y_j \in Y_j} P(y_j, \mathbf{x}) v_L(y_j, \mathbf{x}). \quad (9)$$

Проведение теста позволяет получить дополнительную информацию о состоянии технического объекта и, следовательно, приводит к меньшим значениям  $\bar{v}_L(y_j, \mathbf{x})$  по сравнению с величиной  $\bar{v}_L(\mathbf{x})$ , обеспечиваемой при использовании показаний датчиков.

Сопоставляя сокращение издержек, вызванных простоем оборудования, и стоимость теста, можно определить ценность теста. Проведение дополнительных тестов завершается, если для любого из тестов его стоимость превышает ценность получаемой информации.

**Алгоритм системы принятия решений по прогнозированию ТС ЭГПА.** Процедуру принятия решений о проведении процедур ТОиР представим с помощью сети принятия решений (рис. 3), которая содержит три типа вершин и может рассматриваться как расширение байесовской сети.

Для упрощения на рис. 3 показана сеть принятия решений, соответствующая единственному тесту. Вершины жеребьевки, обозначенные овалами, как и в байесовских сетях, представляют переменные (случайные величины). Вершины принятия решений (прямоугольники) представляют возможность лица, принимающего решение, выбрать одно из доступных действий на основе рассчитываемых значений целевой функции. В сетях принятия решений, основанных на критерии минимума среднего риска, вершины, обозначенные ромбами, содержат значения элементов матрицы потерь. В рамках развиваемого подхода последствия ошибочных решений и, соответственно, значения целевой функций (4) зависят от характеристик подсистемы ТОиР  $K_P$  и  $K_E$ .

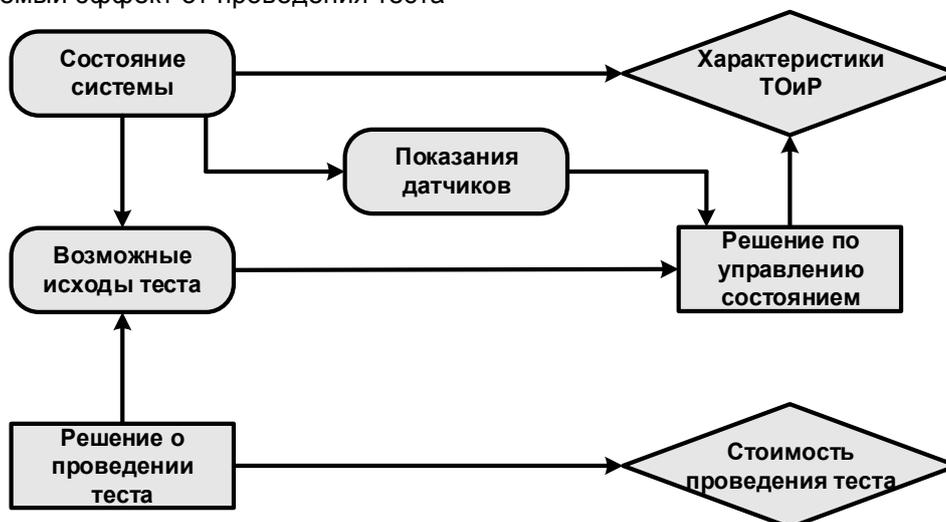


Рис. 3. Сеть принятия решений диагностической экспертной системы

В качестве примера возможного применения развиваемого подхода для управления техническим состоянием рассмотрим систему ЭГПА, информация о состоянии которой регистрируется датчиками. Выделим три состояния технической системы: исправное, предотказное и неработоспособное. Если выносится решение, что система исправна, то действия по управлению состоянием системы не предпринимаются и функционирование системы продолжается. В предотказном состоянии для предотвращения перехода системы в неработоспособное состояние выполняется автоматическое отключение с последующим восстановлением исправного состояния. При наличии существенной неопределенности относительно состояния системы может быть вынесено решение о проведении теста, результаты которого позволяют существенно повысить достоверность определения состояния системы.

**Выводы.** Достоверное прогнозирование технического состояния особо ответственных технологических агрегатов с оценкой остаточного ресурса позволяет заблаговременно предотвратить внезапные нештатные аварии на объектах повышенной опасности и перейти от планово-предупредительных ТОиР к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования со значительным экономическим эффектом.

В общем случае информация о техническом состоянии газоперекачивающих агрегатов получается на основе обработки показаний интеллектуальных датчиков и результатов тестов. При этом выигрыш от применения процедур прогнозирования увеличивается при росте априорной вероятности отказов на анализируемом интервале времени и повышении требований к точности прогнозирования.

#### Список литературы

1. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, С.В. Савченко, Е.А. Спиридович и др. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 570 с.
2. **Babichev S.A., Titov V.G.** Automated safety system for electric driving gas pumping units // *Russian Electrical Engineering*. – 2010. – Т. 81, № 12. – Р. 649–655.
3. **Milov V.R., Suslov B.A.** Intellectual management decision support in gas industry // *Automation and Remote Control*. – 2011. – Vol. 72, no. 5. – С. 1095–1101.
4. **Крюков О.В.** Оценка эксплуатационных факторов электроприводных ГПА по нормативным требованиям мониторинга // *Контроль. Диагностика*. – 2018. – № 11. – С. 50–57.
5. **Репин Д.Г.** Концепты системы мониторинга технического состояния КС // *Контроль. Диагностика*. – 2017. – № 12. – С. 30–35.
6. **Диагностика** и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики / Н.И. Сычев, М.Н. Сычев, В.А. Ипполитов, С.В. Воробьев. – Вологда, 2021.

7. **Макриденко Л.А., Волков С.Н., Сарычев А.П.** Мониторинг и прогнозирование технического состояния электромеханических систем энергетики. – М.: АО «ВНИИЭМ», 2017.

8. **Крюков О.В.** Мониторинг условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // *Контроль. Диагностика*. – 2016. – № 12. – С. 50–58.

9. **Крюков О.В.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2005. – № 6. – С. 43–46.

10. **Intelligent control of electric machine drive systems / D.A. Blagodarov, N.N. Dulnev, Y.M. Safonov, et al.** // 2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018, Novocherkassk, 03–06.10.2018 г. – Novocherkassk, 2018. – P. 8571670.

11. **Babichev S.A., Vyckov E.V.** Analysis of technical condition and safety of gas-pumping units // *Russian Electrical Engineering*. – 2010. – Т. 81. – С. 489–494.

12. **Степанов С.Е.** Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // *Газовая промышленность*. – 2017. – № 8(756). – С. 84–89.

13. **Зюзов А.М., Метельков В.П., Михальченко С.Г.** Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока КС МГ // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332, № 1. – С. 88–96.

14. **Крюков О.В.** Подход к прогнозированию технического состояния ЭГПА // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2016. – № 9. – С. 30–34.

15. **Serebryakov A.V.** Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors // *Вестник ЮУрГУ. Энергетика*. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 66–74.

16. **Милов В.Р., Шалашов И.В.** Процедуры прогнозирования и принятия решений системе ТОиР // *Автоматизация в промышленности*. – 2010. – № 8. – С. 47–49.

17. **Васенин А.Б., Степанов С.Е.** Сравнительная оценка методов прогнозирования технического состояния электроприводов опасных производственных объектов // *Контроль. Диагностика*. – 2020. – Т. 23, № 11(269). – С. 54–62.

18. **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.

19. **Степанов С.Е., Васенин А.Б.** Моделирование и мониторинг термодинамических процессов в синхронных электродвигателях // *Контроль. Диагностика*. – 2020. – № 4. – С. 28–35.

20. **Степанов С.Е.** Выбор методов мониторинга и прогнозирования технического состояния автоматизированных электроприводов энергетических объектов // *Контроль. Диагностика*. – 2018. – № 11. – С. 32–39.

#### References

1. Puzhaylo, A.F., Savchenko, S.V., Spiridovich, E.A. *Energoberezhnie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations]. N.Novgorod: Vector TiS, 2010. 570 p.

2. 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.
3. Milov, V.R., Suslov, B.A. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 5, pp. 1095–1101.
4. Kryukov, O.V. Otsenka ekspluatatsionnykh faktorov elektroprivodnykh GPA po normativnym trebovaniyam monitoringa [Evaluation of operational factors of electric drive GPA according to the regulatory requirements of monitoring]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 11, pp. 50–57.
5. Repin, D.G. Kontsepty sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya KS [Concepts of the CS technical condition monitoring system]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2017, no. 12, pp. 30–35.
6. Sychev, N.I., Sychev, M.N., Ippolitov, V.A., Vorob'ev, S.V. *Diagnostika i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya elektrotekhnicheskikh sistem energetiki* [Diagnostics and forecasting of the technical condition of electrotechnical energy systems]. Vologda, 2021.
7. Makridenko, L.A., Volkov, S.N., Sarychev, A.P. *Monitoring i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskikh sistem energetiki* [Monitoring and forecasting the technical condition of electromechanical energy systems]. Moscow: AO «VNIIEМ», 2017.
8. Kryukov, O.V. Monitoring usloviy ekspluatatsii elektrodvigateley gazoperekachivayushchikh agregatov [Monitoring the operating conditions of electric motors of gas pumping units]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2016, no. 12, pp. 50–58.
9. Kryukov, O.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya raboty asinkhronnykh elektroprivodov [Built-in system for diagnosing and predicting the operation of asynchronous electric drives]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2005, no. 6, pp. 43–46.
10. Blagodarov, D.A., Dulnev, N.N., Safonov, Y.M., Fedortsov, N.N., Kostin, A.A. Intelligent control of electric machine drive systems. *2018 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018, Novocherkassk, 03–06.10.2018 g.* Novocherkassk, 2018, p. 8571670.
11. 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.
12. Stepanov, S.E. Sovremennyy podkhod k organizatsii remonta po dannym prognoza tekhnicheskogo sostoyaniya i resursa elektrooboru-dovaniya [A modern approach to the organization of repairs according to the forecast of the technical condition and resource of electrical equipment]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2017, no. 8(756), pp. 84–89.
13. Zyuzev, A.M., Metel'kov, V.P., Mikhail'chenko, S.G. Otsenka teplovogo sostoyaniya elektrodvigateley peremennogo toka KS MG [Assessment of the thermal state of AC electric motors KS MG]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurosov*, 2021, vol. 332, no. 1, pp. 88–96.
14. Kryukov, O.V. Podkhod k prognozirovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya EGPA [Approach to forecasting the technical condition of the EGPA]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2016, no. 9, pp. 30–34.
15. Serebryakov, A.V. Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors. *Vestnik YuUrGU. Energetika*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 66–74.
16. Milov, V.R., Shalashov, I.V. Protsedury prognozirovaniya i prinyatiya resheniy sisteme TOiR [Procedures for forecasting and decision-making in the MRO system]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2010, no. 8, pp. 47–49.
17. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E. Sravnitel'naya otsenka metodov prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodov opasnykh proizvod-stvennykh ob"ektov [Comparative assessment of methods for predicting the technical condition of electric drives of hazardous production facilities]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, vol. 23, no. 11(269), pp. 54–62.
18. 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.
19. Stepanov, S.E., Vasenin, A.B. Modelirovaniye i monitoring termodinamicheskikh protsessov v sinkhronnykh elektrodvigateleyakh [Modeling and monitoring of thermodynamic processes in synchronous electric motors]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2020, no. 4, pp. 28–35.
20. Stepanov, S.E. Vychor metodov monitoringa i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomatizirovannykh elektroprivodov energeticheskikh ob"ektov [The choice of methods for monitoring and forecasting the technical condition of automated electric drives of energy facilities]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2018, no. 11, pp. 32–39.

## ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

### Выпуск 1

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 11.02.2025. Выход в свет 28.02.2025. Формат 60x84 1/8.  
Усл. печ. л. 10,69. Уч.-изд. л. 11,35. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
Ивановский государственный энергетический университет  
Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8