

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА ПО ДАННЫМ ПРОГНОЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И РЕСУРСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 62–83:656.56

О.В. Крюков, АО «Гипрогазцентр» (Нижний Новгород, РФ), o.kryukov@ggc.nnov.ru

С.Е. Степанов, АО «Гипрогазцентр»

А.В. Серебряков, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, РФ)

В статье проводится анализ принципов организации обслуживания и ремонта приводных электродвигателей электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) на компрессорных станциях (КС) магистрального транспорта газа. Представлены данные статистики, отражающие техническое состояние (ТС) и уровень безопасности функционирования приводных турбокомпрессоров на объектах ПАО «Газпром». Рассмотрены эксплуатационные факторы, влияющие на надежность изоляции статорных обмоток высоковольтных электродвигателей. Представлены аппаратные, методологические и алгоритмические средства оперативного мониторинга ТС и прогнозирования безаварийной работы синхронных двигателей (СД). Показано, что внедрение современных и достоверных средств мониторинга ТС агрегатов и прогноза их ресурса на КС позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы и повысить безопасность и безаварийность работы в штатных режимах, а также осуществить переход к техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) по фактическому состоянию электроприводов ГПА.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: КОМПРЕССОРНАЯ СТАНЦИЯ, ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИЙ АГРЕГАТ, БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ, МОНИТОРИНГ, ПРИВОДНОЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ, ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ НАДЕЖНОСТИ.

В настоящее время все многообразие традиционных методов ТОиР оборудования на промышленно-энергетических предприятиях России, включая опасные производственные объекты (ОПО), можно разделить на две категории: эксплуатация энергоустановок до выхода оборудования из строя и планомерно-профилактическое обслуживание (по календарным срокам или ресурсу) [1–3]. При этом очевидно, что повышение надежности, технического уровня эксплуатации и энергетических характеристик всех агрегатов технологической цепочки сегодня во многом уже зависит от достоверности и превентивности средств технической диагностики [4–6].

В соответствии с Федеральным законом РФ от 21 июля 1997 г. № 116–ФЗ «О промышленной безопасности опасных производствен-

ных объектов» КС магистральных газопроводов (МГ), включая основные технологические агрегаты и системы электроснабжения, являются ОПО. Кроме того, большинство установок, эксплуатируемых на КС ПАО «Газпром», выработали нормативный срок эксплуатации или близки к этому [7, 8]. К оборудованию ОПО с истекшим нормативным сроком эксплуатации предъявляются особые требования по контролю ТС и продлению ресурса.

В ПАО «Газпром» активно ведутся работы по созданию и внедрению систем мониторинга и прогнозирования ТС, интегрированных в системы автоматизированного управления (САУ) КС. Такие системы развиты, например, для газотурбинных газоперекачивающих агрегатов (ГГПА) и в меньшей степени для ЭГПА [9, 10]. Существующие системы монито-

ринга и прогнозирования ТС ЭГПА построены по тем же принципам, что и системы для ГГПА. Основной акцент делается на механические узлы и элементы ЭГПА, практически отсутствуют системы мониторинга и современные методы оценки ТС приводных высоковольтных электрических машин.

Отмеченные обстоятельства определяют актуальность вопросов, связанных с развитием методов оценки показателей надежности ЭГПА, совершенствованием существующих и разработкой новых методов оценки их ТС с использованием независимых многокритериальных универсальных систем мониторинга [11, 12]. Актуальность этих задач подтверждается их соответствием приоритетным направлениям развития науки и техники, основным положениям Энергетической стратегии России на период до 2035 г.,

Kryukov O.V., Giprogascenter JSC (Nizhny Novgorod, RF), o.kryukov@ggc.nnov.ru

Stepanov S.E., Giprogascenter JSC

Serebryakov A.V., Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, RF)

Modern approach to the organization of repair according to the technical condition forecast and the resource of electrical equipment

The article analyses the principles of maintenance and repair organization of driving electric motors of electrically driven gas pumping units (EDGPU) at compressor plants (CP) of main pipeline gas transport. The presented statistics reflects the technical condition (TC) and the safety level of operation of driving turbo compressors at the facilities of Gazprom PJSC. Operation factors which influence the reliability of the insulation of primary windings of high-voltage electric motors are reviewed. Hardware, methodological and algorithmic tools of TC on-line monitoring and forecasting of fault-free operation of synchronous motors (SM) are presented. It is shown that the introduction of modern and reliable TC aggregate monitoring tools and the forecasting of their resource at CP allows significantly reducing operating costs and increasing the safety and fail-safety of work under normal conditions and shifting to technical maintenance and repair (TMR) based upon the actual condition of EDGPU.

KEY WORDS: COMPRESSOR PLANT, GAS PUMPING UNIT, TECHNICAL CONDITION SAFETY, MONITORING, DRIVING ELECTRIC MOTOR, OPERATING RELIABILITY FACTORS.

а также 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.

Несмотря на большую актуальность, перечисленные задачи решаются медленно, так как процессы деградации элементов крупных электрических машин достаточно сложно поддаются точному математическому описанию и зависят от многочисленных факторов. 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:

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

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

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

- разработать оптимальную структуру встроенной системы мониторинга и прогнозирования (ВСМП) режимов работы СД, приводящих к ускоренному старению изоляции, алгоритм ее функционирования и компьютерную модель наработки до отказа [13, 14].

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА СТАРЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРА СД ЭГПА

Классификация причин и тяжести отказов изоляции статоров СД ЭГПА [14–16] приведена в табл. 1.

Анализ характера гистограмм частоты отказов ЭГПА от наработки агрегатов позволяет выдвинуть гипотезу об экспоненциальном законе распределения отказов

[4, 14]. 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.

Исследования, отраженные в [6, 7], установили зависимости старения изоляции от температуры:

- эмпирические уравнения Монтзингера, в соответствии с которыми сроки службы изоляции при различных температурах связаны соотношением вида показательных функций;

- закон Аррениуса, описывающий процесс старения изоляции на основе кинетики химических реакций, также носит экспоненциальный характер.

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

На рис. 1 приведена зависимость отработки ресурса изоляции СД от среднегодовой температуры, полученная на основе уравнения Вант-Гоффа – Аррениуса.

Поскольку в ходе проведения исследований установлено, что отказы изоляции чаще происходят на электродвигателях, имеющих более высокую среднегодовую температуру обмотки, прогнозные значения ресурса необходимо скорректировать с учетом статистического распределения среднегодовых температур обмоток статоров СД на различных КС и распределения их средней наработки на отказ.

ФАКТОРЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОВЫШЕННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ЭГПА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

За счет применения преобразователя частоты (ПЧ) и электромагнитного подвеса роторов повышаются показатели надежности и ресурса ЭГПА нового поколения (рис. 2) [16–19], уменьшаются затраты на ТОиР, в частности наблюдаются:

- уменьшение износа механического и электротехнического оборудования благодаря снятию ограничений на число пусков и остановов (использование ПЧ в качестве устройства мягкого пуска);
- снижение вероятности возникновения поломок благодаря плавному изменению режимов работы КС;
- прямое соединение «электродвигатель – нагнетатель» за счет

Таблица 1. Сводные данные по отказам ЭГПА

Тип отказавшего оборудования в ЭГПА	% от общего числа отказов	Время устранения отказа, ч	Тяжесть последствий отказа, балл
Внешнее электроснабжение	15	До 0,5	1
Высоковольтная ячейка в ЗРУ – 10 кВ	5	4–40	2–3
Пробой изоляции статора приводного СД	3	80–8000	5
Система возбуждения приводного СД	25	4–16	2
АЩСУ (щит 0,4 кВ для нужд ЭГПА)	10	4–16	2
ЩАВР (щит 0,4 кВ АВР возбудителя)	2	4–16	2
Подшипники скольжения двигателя	8	17–40	3
Насосы масляного уплотнения нагнетателя	2	4–40	2–3
САУ ЭГПА (отказ датчиков, сбой ПО и др.)	30	4–16	2

применения высокоскоростных двигателей;

- исключение мультипликатора из компоновки ЭГПА;
- исключение системы смазки подшипников двигателя и компрессора и, соответственно, необходимости в запасах масла, отсутствие возможности возгорания;
- повышение готовности агрегата к пуску, сокращение времени пуска;
- исключается выработка шеек вала ротора электродвигателя и компрессора за счет применения магнитных подшипников;
- за счет применения САУ ЭГПА и САУ компрессорных цехов (КЦ) повышается точность управления, обеспечивается дистанционное управление ЭГПА, КЦ или КС, что позволяет перейти к безлюдной технологии обслуживания оборудова-

ния, сокращаются затраты на обслуживающий персонал.

В соответствии с текущими регламентами по объемам ТОиР ЭГПА, один из примеров которых приведен в табл. 2 и 3, отмечается значительное и часто необоснованное время простоя агрегатов при всех уровнях обслуживания. Подобные издержки естественно отсутствуют при обслуживании по фактическому состоянию ЭГПА при прогнозировании состояния и ресурса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕХОДА НА ТОиР ЭГПА ПО ФАКТИЧЕСКОМУ ТС СД

Для расчета функций принадлежности СД ЭГПА используется метод парных сравнений Саати [4, 20], суть которого состоит в том,

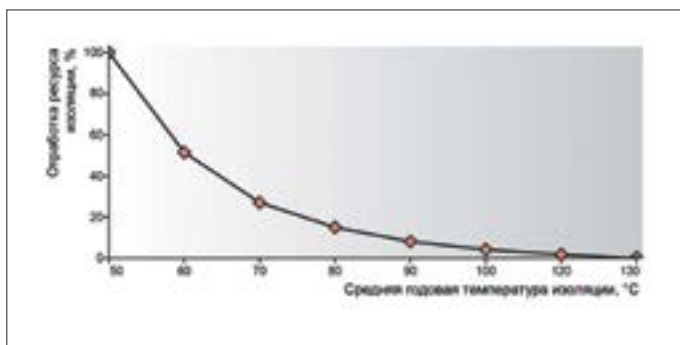


Рис. 1. Зависимость ресурса изоляции от среднегодовой температуры обмотки



Рис. 2. Технологическая компоновка моноблочных ЭГПА

Таблица 2. Объем технического обслуживания ЭГПА 12,5/9000-75/1,35-«Лысьва-МБМ»

Годы эксплуатации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Число дней простоя	3	5	3	5	3	5	3	18	3	5	3	5	3	5	3	18
Уровень 1	Ж		Ж		Ж		Ж		Ж		Ж		Ж		Ж	
Уровень 2		С		С		С			С		С		С		С	
Уровень 3								К								К

Закрашенные цветом ячейки соответствуют необходимости плановых ремонтов ЭГПА при эксплуатации: желтые говорят о необходимости проверок и осмотров с простоем три дня в нечетные годы эксплуатации ЭГПА (1, 3, 5 и т. д.); синие – при инспекции компрессора в четные годы (2, 4, 6 и т. д.); красные – годы капремонтов с необходимостью остановки ЭГПА до 18 сут.

Таблица 3. Стандартные объемы ТОиР на объекте эксплуатации

Уровень 1. Проверки и осмотр	Визуальный осмотр, проверка сопротивления изоляции, проверка и очистка фильтров, проверка датчиков, аккумулятора, фланцевых соединений, настройки АМП. Выполняется: шеф-инженер – 2 чел.
Уровень 2. Инспекция компрессора	Визуальный осмотр рабочих колес, проверка сопротивления изоляции, проверка и очистка фильтров, проверка датчиков, аккумулятора, фланцевых соединений, настройки АМП, проверка настроек ПЧ, замена деталей с ограниченным ресурсом, опрессовка ЭГПА технологическим газом. Выполняется: шеф-инженер – 3 чел.
Уровень 3. Капитальный ремонт	Демонтаж ротора электродвигателя-компрессора, очистка, проверка на отсутствие трещин, инспектирование, измерения, балансировка ротора, сборка, проверка сопротивления изоляции, проверка и очистка фильтров, датчиков, кабелей, фланцевых соединений, настройки АМП, настроек ПЧ, замена аккумулятора, деталей с ограниченным ресурсом, элементов АМП, опрессовка ЭГПА технологическим газом. Выполняется: шеф-инженер – 4 чел.

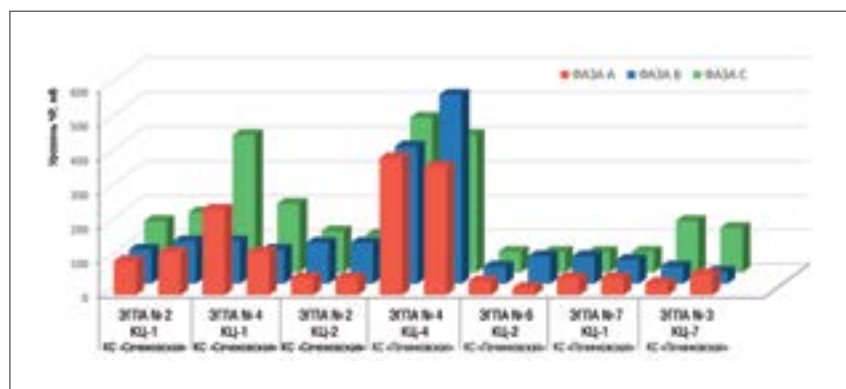


Рис. 3. Статистика измерений уровней ЧР на семи СД ЭГПА

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 системе MATLAB 7.11 со-

здана модель прогнозирования отказов изоляции СД, позволяющая вычислять значение наработки до отказа. В результате проведенных измерений на семи ЭГПА было определено текущее состояние изоляции обмоток статоров приводных электродвигателей

СТД-12500-2. На рис. 3 представлены диаграммы обработанных результатов экспериментальных замеров по частичным разрядам (ЧР) в высоковольтных обмотках приводных СД.

Сравнительный анализ диаграмм показывает, что уровни ЧР обмотки статора СТД-12500-2 ЭГПА № 4 КЦ «Уренгой-Центр-2» КС-25 «Починковская» имеют относительно более высокие значения.

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

ВЫВОДЫ

Рассмотренная методика позволяет в режиме реального времени контролировать ТС СД по характеристикам ЧР, выявлять существенные изменения в трендах амплитуды и интенсивности ЧР. При увеличении показателей в 2 и более раз при идентичных параметрах работы СД выполняется анализ фазового распределения импульсов ЧР и выявляется причина с прогнозом.

Внедрение разработанных мероприятий по мониторингу ТС СД позволяет сократить время простоя ЭГПА в среднем до 2160 ч/год. При этом вероятность срыва планового задания составит $P_{\text{нпз}} = 0,08$, что приводит к снижению ожидаемого ущерба в 1,9 раза ($Y_{\text{нпз}} = 24$ млн руб/год). Внедрение разработанных методов мониторинга ТС позволяет в среднем в 4 раза сократить время нахождения ЭГПА в ремонте и на 30–50 % снизить затраты на капитальный ремонт СД. ■

ЛИТЕРАТУРА

- Milov V.R., Suslov B.A. Intellectual Management Decision Support in Gas Industry. Automation and Remote Control, 2011, Vol. 72, No. 5, P. 1095–1101.
- Kiyanov N.V., Pribytkov D.N., Gorbatushkov A.V. A Concept for the Development of Invariant Automated Electric Drives for the Water Recycling Systems with Fan Cooling Towers. Russian Electrical Engineering, 2007, Vol. 78, No. 11, P. 621–627.
- Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных ГПА // Электромеханічні енергозберігаючі системи. 2012. № 3 (19). С. 209–212.
- Крюков О.В., Серебряков А.В. Искусственные нейронные сети прогнозирования технического состояния электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. 2016. Т. 16. № 1. С. 66–74.
- Крюков О.В., Серебряков А.В. Система оперативной диагностики технического состояния ветроэнергетических установок // Электротехника. 2015. Т. 86. № 4. С. 208–212.
- 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.
- Babichev S.A., Zakharov P.A. Automated Monitoring System for Drive Motors Of Gas-Compressor Units. Automation and Remote Control, 2011, Vol. 72, No. 1, P. 175–180.
- Степанов С.Е., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газокomppressorных станций // Автоматизация в промышленности. 2010. № 6. С. 29–31.
- Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15. М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2015. С. 368–386.
- Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: В 2-х т. Саранск, 2014. Т. 2. С. 157–163.
- Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. 2010. № 10. С. 50–53.
- Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. № 2. С. 5–10.
- Серебряков А.В. Универсальная система мониторинга электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Известия вузов. Электромеханика. 2016. № 4 (546). С. 74–81.
- Kryukov O.V. Electric Drive Systems in Compressor Stations with Stochastic Perturbations. Russian Electrical Engineering, 2013, Vol. 84, P. 135–138.
- Kadin S.N., Kazachenko A.P., Reunov A.V. Questions Related to the Development of Metrological Assurance in the Design of Gazprom Facilities. Measurement Techniques, 2011, Vol. 54, No. 8, P. 944–952.
- Пужайло А.Ф., Рубцова И.Е. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода // Наука и техника в газовой промышленности. 2012. № 2 (50). С. 98–106.
- Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности электроприводных ГПА // Газовая промышленность. 2014. № 6 (707). С. 86–89.
- Крюков О.В. Регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов преобразователями частоты // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 3. С. 21.
- Крюков О.В. Частотное регулирование производительности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 6. С. 39–43.
- 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, Issue 9, P. 516–520.

REFERENCES

- Milov V.R., Suslov B.A. Intellectual Management Decision Support in Gas Industry. Automation and Remote Control, 2011, Vol. 72, No. 5, P. 1095–1101.
- Kiyanov N.V., Pribytkov D.N., Gorbatushkov A.V. A Concept for the Development of Invariant Automated Electric Drives for the Water Recycling Systems with Fan Cooling Towers. Russian Electrical Engineering, 2007, Vol. 78, No. 11, P. 621–627.
- Kryukov O.V., Stepanov S.E. Ways to Modernize Electrically Driven GPU. Elektromekhanicheskie I energosberegayutshie sistemy = Electromechanical and Energy Saving Systems, 2012, No. 3 (19), P. 209–212. (In Russian)
- Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Artificial Neural Networks for Forecasting the Technical Condition of Electric Motors of Gas Pumping Units. Vestnik Yuzhno-Uralskogo universiteta = Bulletin of Yuzno-Uralsk State University, 2016, Vol. 16, No. 1, P. 66–74. (In Russian)
- Kryukov O.V., Serebryakov A.V. On-Line Diagnostics System of the Technical Condition of Wind-Driven Power Plants. Electrotehnika = Electrical Engineering, 2015, Vol. 86, No. 4, P. 208–212. (In Russian)
- 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.
- Babichev S.A., Zakharov P.A. Automated Monitoring System for Drive Motors Of Gas-Compressor Units. Automation and Remote Control, 2011, Vol. 72, No. 1, P. 175–180.
- Stepanov S.E., Plekhov A.S. Principles of Automatic Actuation Control of Synchronous Motors of Gas Compressor Plants. Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in the Industry, 2010, No. 6, P. 29–31. (In Russian)
- Kryukov O.V. Strategies of Non-Variant Control Systems of Electric Motors of the Facilities of Gazprom OJSC. In: System Identification and Control Tasks of SICPRO'15. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, 2015, P. 368–386. (In Russian)
- Kryukov O.V. Experience of Creating Energy Efficient Electric Motors of Gas Pumping Units. In: Works of the 8th International (19th All-Russian) Conference on Automated Electric Motor АЭП-2014: In 2 Volumes, Saransk, 2014, Vol. 2, P. 157–163. (In Russian)
- Kryukov O.V. Analysis and Technical Implementation of Energy Efficiency Factors of Innovative Solutions in Electrically Driven Turbo Compressors. Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in the Industry, 2010, No. 10, P. 50–53. (In Russian)
- Stepanov S.E., Titov V.G. Embedded Monitoring Systems of the Technical Condition of Electric Motors for the Energy Safety of Gas Transport. Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy Safety and Energy Saving, 2012, No. 2, P. 5–10. (In Russian)
- Serebryakov A.V. Universal Monitoring System of Electric Motors of Gas Pumping Units. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika = Bulletin of Higher Education Institutions. Electromechanics, 2016, No. 4 (546), P. 74–81. (In Russian)
- Kryukov O.V. Electric Drive Systems in Compressor Stations with Stochastic Perturbations. Russian Electrical Engineering, 2013, Vol. 84, P. 135–138.
- Kadin S.N., Kazachenko A.P., Reunov A.V. Questions Related to the Development of Metrological Assurance in the Design of Gazprom Facilities. Measurement Techniques, 2011, Vol. 54, No. 8, P. 944–952.
- Puzhaylo A.F., Rubtsova I.E. Energy Saving in the Aggregates of Compressor Plants with the Use of a Variable-Frequency Electric Drive. Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti = Science and Engineering in the Gas Industry, 2012, No. 2 (50), P. 98–106. (In Russian)
- Krasnov D.V. Prospects of Using Frequency Converters to Regulate the Capacity of Electrically Driven Gas Pumping Units. Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry, 2014, No. 6 (707), P. 86–89. (In Russian)
- Kryukov O.V. Regulating the Capacity of Electrically Driven Gas Pumping Units with the Use of Frequency Converters. Kompessornaya tekhnika i pnevmatika = Compressor Machinery and Pneumatics, 2013, No. 3, P. 21. (In Russian)
- Kryukov O.V. Frequency Regulation of the Capacity of Electrically Driven Gas Pumping Units. Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont = Electrical Equipment: Operation and Repair, 2014, No. 6, P. 39–43. (In Russian)
- 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, Issue 9, P. 516–520.