

## МОНИТОРИНГ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

О.В. Крюков (АО «Гипрогазцентр»)

*Рассмотрена современная трактовка постановки задачи исследования основных технологических агрегатов магистрального транспорта газа как объектов диагностирования. Представлена статистика повреждаемости узлов электроприводных газоперекачивающих агрегатов и анализ эксплуатационных факторов их надежности. Показано, что эффективность оценки технического состояния изоляции приводных электродвигателей достигается анализом частичных разрядов в обмотке статора машины.*

*Ключевые слова: опасный производственный объект, надежность, система мониторинга, электроприводной газоперекачивающий агрегат, изоляция статора, частичные разряды.*

### Введение

В настоящее время все магистральные газопроводы (МГ) РФ и стран ближнего зарубежья относятся к промышленным объектам повышенной опасности. С каждым годом федеральными и отраслевыми нормативно-техническими документами ужесточаются требования обеспечения повышенной надежности и безаварийности работы всего оборудования независимо от режимов работы электроприводных компрессорных станций (КС). 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 этой связи в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 г. и СТО Газпром 2-3.5-454-20-10, задачей первого приоритета по повышению надежности и безопасности систем энергетики является разработка универсальных систем мониторинга надежности нефтегазовых объектов. Последние действуют в режиме реального времени и позволяют осуществлять контроль и управление при различных уровнях и масштабах систем. Кроме того, п. 4.11.1, 4.11.2 и 4.11.6 правил СТО Газпром 2-3.5-454-2010 регламентируют осуществление контроля работоспособности, надежности и безопасности оборудования КС с помощью технических и программных средств мониторинга и диагностики. Они должны с требуемой достоверностью производить оценку технического состояния оборудования КС и прогнозировать его изменение не менее чем за период до следующего проведения измерений. Установка систем мониторинга и диагностики должна обеспечиваться при новом строительстве и реновации КС, а также в процессе модернизации эксплуатируемых КС. Вводимые в эксплуатацию полнофункциональные системы должны обеспечивать эксплуатацию КС с учетом фактического состояния каждого конкретного объекта диагностируемого оборудования.

В Программе ПАО «Газпром» содержатся основные положения по системам диагностики. В части электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) как основных агрегатов КС общим является проведение следующих видов работ:

1) полномасштабная комплексная многопараметрическая диагностика и обследование всего электрооборудования ЭГПА, включая вибродиагностику,

диагностику методом измерения (ЧР) в изоляции, термографию с целью определения фактического состояния и оценки остаточного ресурса, а также установление очередности проведения восстановительных работ по КС и отдельным агрегатам;

2) адаптация АСУ КС с системой постоянного мониторинга и диагностики элементов ЭГПА, систем постоянного тока и системы электроснабжения КС.

В стандарте ассоциации Росэкспертиза сформулированы основные технические требования к комплексным системам мониторинга, предназначенным для оценки технического состояния и прогноза ресурса оборудования опасных производственных объектов в реальном масштабе времени без их остановки, разборки и вывода из эксплуатации.

В настоящее время разработка и внедрение функций мониторинга и прогнозирования технического состояния в составе АСУ КС реализуется в основном для газотурбинных ГПА (ГТПА). Надежность ЭГПА в целом значительно выше ГТПА (средняя наработка на отказ ЭГПА составляет около 4 тыс. ч; ГТПА — 1,3 тыс. ч). Однако необходимо учитывать, что вынужденная или аварийная остановка любого агрегата ведет не только к большим затратам на ремонтно-восстановительные работы, но и к снижению при отсутствии необходимых резервов на КС производительности магистрального газопровода в целом, потерям пускового и топливного газа, электроэнергии, ГСМ и др.

В зависимости от типа ЭГПА имеют наработку 1500...3000 ч/г, и вывести их из работы для плановой диагностики не всегда представляется возможным. Поэтому необходим их оперативный контроль в режиме on-line. Однако все известные системы не рассчитаны на определение технического состояния приводного высоковольтного электродвигателя и иных наиболее ответственных частей оборудования ЭГПА.

### Структура ЭГПА как объекта мониторинга

На КС ЕСГ России эксплуатируется сегодня 725 ЭГПА различных типов и мощностей. Однако наиболее распространенной машиной до сих пор является синхронная — СТД-12500-2 Р [1–4].

Современный ЭГПА как объект диагностирования представляет собой сложную и пространственно-распределенную техническую систему. Он состоит из большого множества различных взаимосвязанных узлов и механизмов (электронных, электротех-

нических, механических и гидравлических), отличающихся принципами действия, типоразмерами и уровнями надежности. Однако независимо от этого выход из строя любого элемента, как правило, приводит к возникновению аварийной ситуации и выходу из строя ЭГПА в целом. В таблице приведена классификация основных причин отказов ЭГПА в процессе эксплуатации [5–7].

Наиболее тяжелым отказом ЭГПА является выход из строя статора приводного синхронного электродвигателя (СД), аварии которого в большинстве случаев возникают вследствие пробоя корпусной или пазовой изоляции. В связи с этим разработка новых методов неразрушающего контроля, диагностики и прогнозирования эксплуатационной надежности высоковольтных СД с учетом электрических и механических свойств изоляции и изменения их под воздействием различных факторов представляет наибольший практический интерес.

Поэтому работа всех элементов ЭГПА, отличающихся значительной установленной мощностью, стоимостью и массогабаритными показателями, должна контролироваться встроенной системой мониторинга и прогнозирования (ВСМП) технического состояния (ТС) в режиме on-line. При этом проектирование ее должно производиться параллельно с проектированием всех остальных систем диагностики КС. Ведущие в настоящее время разработки в области технической диагностики ЭГПА не отвечают пока требованиям оперативности обнаружения и принятия решений и не предполагают единого теоретически обоснованного подхода ко всем элементам электрооборудования и поэтому не адекватны на практике. Это, как правило, переносные или автономные однопараметрические системы, фиксирующие наличие уже самого факта неисправностей или отказов. Данные локальные средства контроля и диагностики решают только частные задачи, не обеспечивая функций достоверного предупреждения наступления аварий, автоматического выявления их причин и быстрого восстановления штатных режимов, а также

комплекса проблем автоматизации современного дорогостоящего оборудования КС. Анализ крупнейших аварий и нештатных ситуаций электроэнергетического оборудования в последнее время и принятые нормативные акты РФ дополнительно стимулируют поиск инновационных технологий мониторинга и достоверности прогноза технического состояния приводов нагнетателей для повышения надежности и удобства обслуживания ЭГПА и в целом КС и линейных участков магистральных газопроводов.

Для выявления наиболее существенных эксплуатационных факторов, влияющих на надежность СД, необходимо предварительно выполнить комплексный анализ условий эксплуатации ЭГПА на характерных и типичных КС, включающий систематический сбор и обработку достоверной информации о повреждаемости основных узлов СД; анализ режимов его работы в номинальных режимах работы и при режимных возмущениях питающей сети на КС магистральных газопроводов России.

#### Общий анализ эксплуатационной надежности ЭГПА

В настоящее время на компрессорных станциях МГ ОАО «Газпром» используется периодическое диагностирование выведенных в ремонт ЭГПА. По программе диагностирования проводятся следующие испытания:

— визуальный осмотр состояния статора и ротора СД;

— оценка состояния изоляции листов активной стали и выявление местных коротких замыканий в сердечнике статора электромагнитным методом;

— оценка вибрационного состояния электродвигателя путем измерения размаха колебаний, среднеквадратического состояния виброскорости и виброускорения на подшипниках, фундаментной плите и середине статора;

— оценка состояния изоляции обмотки статора на основе визуального и инструментального обследования, а также измерения уровня частичных разрядов в изоляции при подаче переменного напряжения от постороннего источника (0,7...1,0)Уф;

— тепловизионный контроль состояния паек стержней обмотки в лобовых частях при подаче тока от постороннего источника.

Известно, что численное определение критических параметров и постоянный контроль над ними позволяет повысить эффективность диагностирования и прогнозировать изменение технического состояния СД. Однако в условиях реальной эксплуатации не всегда удается выполнить весь комплекс испытаний и измерений, кроме того, периодичность выполнения диагностики на одном ЭГПА составляет 3...4 г. Поэтому необходим анализ эксплуатационной надежности,

Таблица. Основные причины выхода из эксплуатации ЭГПА

Электрооборудование 40%				САУ и КИП 30%			Механические узлы, 25%			Действия персонала, 5%		
Внешнее электроснабжение 220кВ, 20%	Система возбуждения, 35%	Вспомогательное электрооборудование 0,4 кВ, 25%	Высоковольтные узлы, 15%	Статор приводного СД, 5%	Элементная база САУ	Программное обеспечение	Датчики	Подшипники	Ротор СД	Система уплотнения	Оперативного	Ремонтного

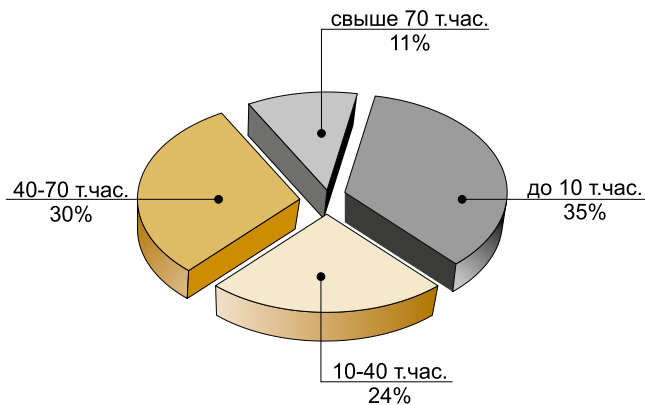


Рис. 1. Статистика повреждаемости статоров приводных электродвигателей ЭГПА в зависимости от наработки на отказ

результат которого может установить наиболее уязвимые элементы СД.

Для выявления наиболее существенных эксплуатационных факторов, влияющих на надежность электродвигателей, выполнен комплексный анализ условий эксплуатации ЭГПА, включающий: сбор и обработку информации о повреждаемости двигателей; анализ режимов работы электродвигателей в номинальных режимах работы; анализ режимов работы электродвигателей при режимных возмущениях питающей сети.

Наработку на отказ статоров электродвигателей ЭГПА можно определить, исходя из повреждаемости в процессе эксплуатации (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что повреждаемость приводных СТД не зависит от их наработки в процессе эксплуатации, а определяется в основном условиями их эксплуатации. С момента ввода в эксплуатацию на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» зафиксировано 62 случая выхода из строя электродвигателей типа СТД-12500-2 и СДГ-12500-2 при средней аварийности СД из-за повреждений обмоток статора составляет 2,7 ед./г.

Для контроля электрической части высоковольтного электрооборудования и электрических машин

в зарубежной и отечественной практике успешно используются методы локации разрядных явлений. В первую очередь — это определение состояния изоляции электрических машин методом измерения амплитуды и интенсивности частичного разряда (ЧР).

Частичный разряд — это искровой разряд малой мощности, который образуется внутри изоляции или на ее поверхности в оборудовании среднего и высокого напряжения. С течением времени периодически повторяющиеся ЧР разрушают изоляцию, приводя в конечном итоге к ее пробое. Таким образом, регистрация ЧР, оценка их мощности и повторяемости, а также локализация места их возникновения позволяют своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения.

Измерение ЧР в электрических машинах производится несколькими методами [5], для реализации которых выпускаются различные системы мониторинга ЧР, такие как IRIS POWER (Канада), «ВиброЦентр» (г. Пермь), «ДИАКС» (Москва) и др. Но, несмотря на все многообразие существующих методов определения технического состояния приводных электродвигателей, организация мониторинга должна быть оптимальной с точки зрения числа вводимых дополнительных датчиков и оборудования, определяющих в конечном итоге стоимость этих систем.

В условиях реальной эксплуатации ЭГПА, практически без дополнительных датчиков, предлагается использовать метод функциональной диагностики, основанный на анализе взаимодействия основных параметров работы электродвигателя. Основными факторами, влияющими на ресурс изоляции электрических машин, являются рабочая температура обмоток, напряжения в нормальных и переходных режимах работы электродвигателя и сети, механические и термомеханические нагрузки на обмотку.

В результате проведения анализа работы высоковольтных синхронных электродвигателей ЭГПА на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» в различных режимах была составлена функциональная схема взаимодействия основных рабочих

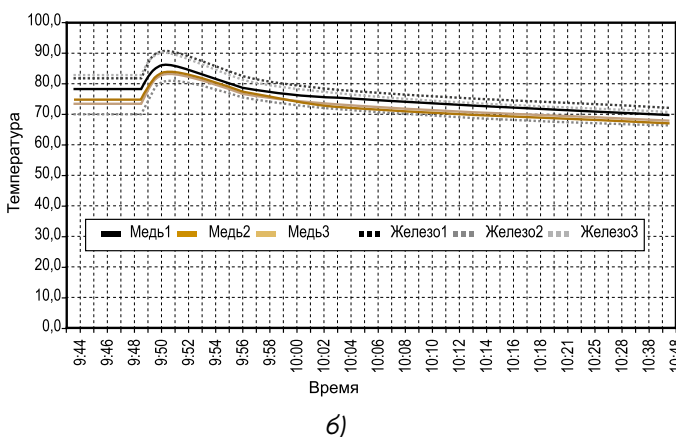
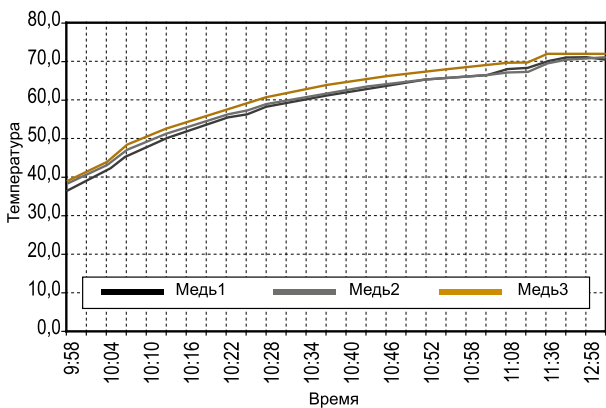


Рис. 2. Изменение температуры обмоток статора: а) после пуска ЭГПА №6 КЦ «Ямбург-Елец-2» КС 25 «Починковская»; б) после останова ЭГПА №1 КЦ «Ямбург-Елец-1» КС-25 «Починковская»

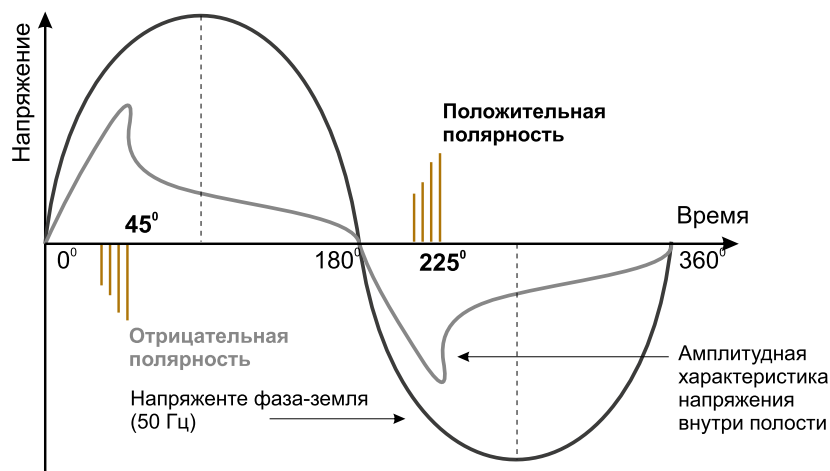


Рис. 3. Положение импульсов ЧР относительно фазы напряжения



Рис. 4. Порядок выделения импульсов ЧР

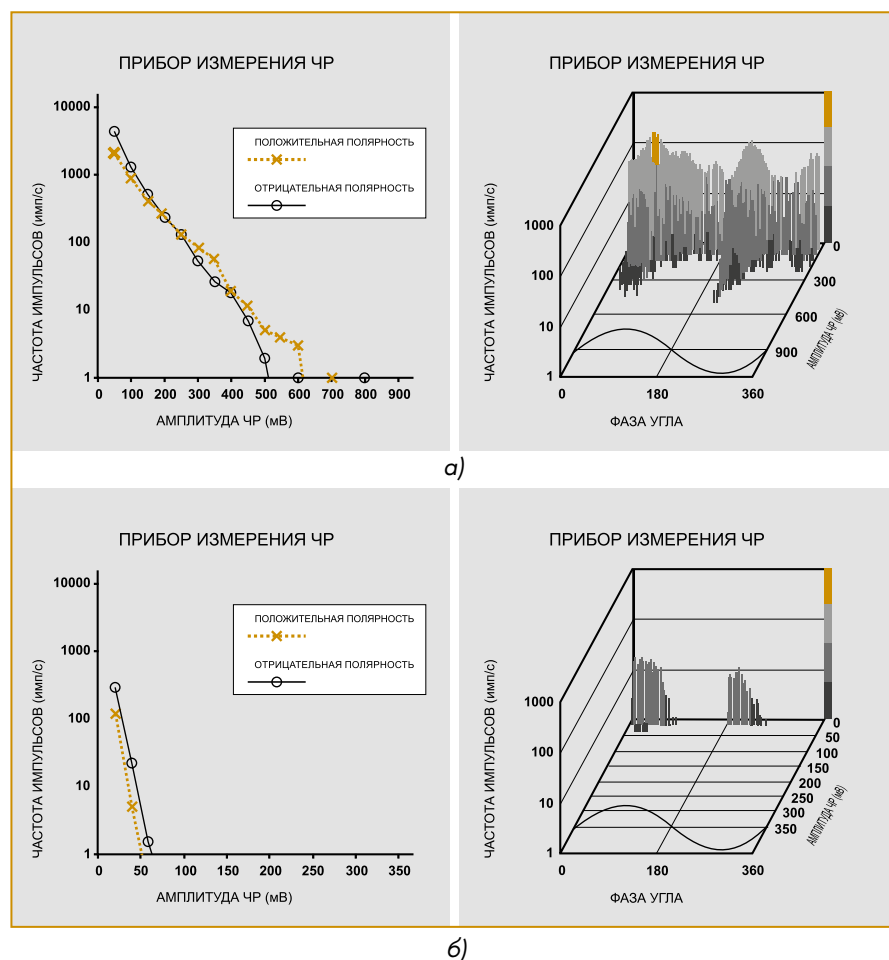


Рис. 5. Сопоставление результатов замеров параметров ЧР до (а) и после (б) перемотки статорной обмотки СТД

параметров на ресурс изоляции обмотки статора. На основе логических взаимосвязей этих параметров разработаны алгоритмы, позволяющие оперативно определять техническое состояние электродвигателя ЭГПА.

Установлено, что основным фактором деградации изоляции обмотки статора является ее температура. Измерения распределения температуры вдоль сердечника статора ПЭВД, выполненные на работающих ЭГПА, показали, что средняя точка сердечника имеет температуру на 54,7% выше, чем крайние точки. По статистическим данным, около 90% всех пробоев изоляции статора происходит именно в этой наиболее нагретой части сердечника.

Для определения максимальных отклонений в температуре статора при изменении режимов работы ЭГПА выполнены измерения температуры при пуске и останове, а также изменении потребляемой мощности при перестроении режима работы газопровода. Измерения выполнены с интервалом 2 ч, в течение 6 сут. на КС «Починковская» и КС «Сеченовская» (рис. 2).

Анализ результатов измерений показал, что колебания температуры статора в летнее время связано с суточными изменениями температуры охлаждающего воздуха. Зимой же перепады температуры наружного воздуха не оказывают влияния на изменение температуры СД, и его температура в основном зависит от числа одновременно работающих ЭГПА в КС. При останове ЭГПА за короткий промежуток времени происходит рост температуры обмоток на 10...15 °С, значение температуры в этот момент может превышать максимально допустимые для данного класса изоляции.

Основными параметрами импульсов ЧР являются:

- время нарастания импульса порядка 1...5 нс, соответствующее частоте в диапазоне 50...250 МГц;
- амплитуда импульсов прямо пропорциональна размерам полости, а число ЧР соответствует числу пустот и полостей, то есть степени разрушения высоковольтной изоляции;
- полярность и фаза импульсов ЧР по отношению к первой гар-

мониторинга питающего напряжения позволяет определить место их возникновения в расточке статора и, соответственно, доминирующий разрушающий механизм (рис. 3);

- ЧР начинают проявляться при напряжениях  $>3$  кВ/мм; для пробоя наиболее опасна динамика увеличения амплитуды и частоты ЧР.

Для выделения истинного значения импульсов ЧР и отделения их от шумов по частоте производится (рис. 4):

- выделение полосы спектра, содержащей импульсы ЧР с помощью емкостных датчиков;

- разделение импульсов ЧР и шума методом установки и калибровки датчиков на основе анализа параметров импульса;

- цифровая обработка информации с помощью приборов-анализаторов и специализированного ПО.

Эффективность оценки технического состояния изоляции СД методом анализа ЧР доказывается сопоставлением результатов замеров параметров ЧР до (а) и после (б) перемотки статорной обмотки одного из двигателей СТД-12500, приведенное на рис. 5 с помощью аппаратуры фирмы IRIS POWER с оксидно-слюдяными датчиками 80 пФ на напряжение 16 кВ.

#### Выводы

Таким образом, использование системы мониторинга ЧР высоковольтной изоляции СД ЭГПА в режиме on-line позволяет:

- адекватно оценить техническое состояние машины;

- автоматизировать процесс регистрации и локализации повреждений,

- интегрировать результаты мониторинга ЧР в АСУ КС,

- организовать удаленное управление сбором данных о состоянии СД.

Для реализации эффективных и адекватных систем оперативной диагностики и прогнозирования технического состояния приводных двигателей ЭГПА были разработаны структура и алгоритмы обработки информации о параметрах рассмотренных эксплуатационных факторов в реальном времени.

Последние послужили основой для создания компьютерной системы оперативного мониторинга и прогнозирования технического состояния приводного электродвигателя ЭГПА. Подобная система может интегрироваться в качестве подсистемы в комплекс САУ ЭГПА.

**Крюков Олег Викторович** – д-р техн. наук, главный специалист ОТД и НТИ АО «Газпром газцентр». Контактный телефон (831) 428-25-84, факс (831) 433-95-37. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Результаты, представленные в статье, использованы при разработке и внедрении автоматизированных систем мониторинга и управления ЭГПА для КС «Сеченовская» и КС «Починковская» ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород».

Реализация мероприятий по совершенствованию методов оценки технического состояния электродвигателей на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» привела к замене на одном из ЭГПА капитального ремонта СД на текущий и сокращению времени простоя более чем в 10 раз.

Внедрение разработанных методов мониторинга технического состояния позволяет в среднем в 4 раза сократить время нахождения ЭГПА в ремонте и на 30...50% затраты на капитальный ремонт СД.

#### Список литературы

1. *Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V.* Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. 2011. Т. 72. № 5. С. 1095-1101.
2. *Крюков О.В.* Анализ аварийности приводных электродвигателей магистральных ГПА // Приводная техника. 2012. №1. С.2-11.
3. *Крюков О.В.* Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 3. С. 45-50.
4. *Крюков О.В.* Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // В сб.: Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15. М.: ИПУ РАН. 2015. С.368-386.
5. *Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V.* Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units // Automation and Remote Control. 2011. Т.72. №1. С. 175-180.
6. *Серебряков А. В., Крюков О. В., Васенин А. Б.* Нечеткие модели и алгоритмы управления энергетическими установками // Тр. конференции «Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах». Под ред. С. Н. Васильева. 2012. С. 467-469.
7. *Бабичев С.А., Бычков Е.В., Крюков О.В.* Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. 2010. № 9. С. 30-36.
8. *Крюков О.В.* Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. 2012. №9. С.52-57.
9. *Крюков О.В., Ретин Д.Г.* Системы оперативного мониторинга технического состояния энергоустановок для энергетической безопасности компрессорных станций // Газовая промышленность. 2014. № 712. С. 84-87.
10. *Крюков О.В.* Комплексная система мониторинга и управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Тр. МНПК «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях». АИТА-2011. М.: ИПУ РАН. 2011. С. 329-350.

**Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:**

через каталоги "Роспечать" **81874** и "Пресса России" **39206** • сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакцию

**Адрес редакции:** 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97 E-mail: info@avtprom.ru