

# Эффективность электроприводных газоперекачивающих агрегатов

Онищенко Г. Б., доктор техн. наук

Московский государственный машиностроительный университет



Онищенко Г. Б.

Рассмотрены особенности и режимы работы электроприводов газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях магистрального транспорта газа. Представлены результаты реализации наиболее эффективных и наукоемких проектов с применением новых принципов и алгоритмов управления технологически связанных электроприводных агрегатов. Предложены перспективные направления совершенствования электроприводов нагнетателей при их модернизации с целью повышения надежности и энергоэффективности магистрального транспорта газа.

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат, электропривод, синхронный двигатель, модернизация, энергосбережение, эффективность.

**Развитие сети газопроводов в России.** В настоящее время газовая промышленность обеспечивает жизнедеятельность всех отраслей народного хозяйства и социальной сферы и во многом определяет формирование основных финансово-экономических показателей страны. И в дальнейшей перспективе природный газ останется важнейшим видом уникального топлива и ценного сырья для химической промышленности. Этому в значительной степени способствуют сосредоточение на территории России более 1/3 мировых запасов природного газа и создание уникального производственного потенциала.

Специфика газовой отрасли заключается в необходимости транспорта больших объемов газа на значительные расстояния от месторождений Крайнего Севера в разные регионы России. Техничко-экономическая эффективность процесса транспортировки в значительной степени определяет цену на газ у потребителей (сегодня — до 52 %). Как показывают исследования [1], резервы и возможности существующего снижения этого значения в отрасли есть, но необходим системный и взвешенный подход к проектированию и модернизации оборудования компрессорных станций (КС) и, в частности, газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Это связано с тем, что приоритетными задачами в газовой отрасли в соответствии с [2] являются:

полное и надежное обеспечение населения и промышленности страны энергоресурсами по доступным и в то же время стимулирующим развитие отрасли ценам;

максимально возможное снижение рисков и недопущение развития кризисных ситуаций на магистральных газопроводах (МГ);

динамичное уменьшение удельных затрат на производство и использование энергоре-

сурсов за счет сокращения потерь при добыче и транспортировке, применения энергосберегающих технологий и оборудования.

**Сопоставление газотурбинных и электроприводных агрегатов.** Оптимальный режим эксплуатации МГ заключается в максимальном использовании их пропускной способности (газоподачи) при минимальных энергозатратах на компримирование. В значительной степени он определяется работой КС, устанавливаемых по трассе газопровода через каждые 100 – 150 км, исходя из значения падения давления газа на одном участке не более чем на 1,6 – 2,5 МПа, а также из привязки КС к населенным пунктам и источникам электроэнергетики.

Характерный вид годовых графиков переменного режима работы газопровода при изменении его производительности показан на рис. 1, из которого видно, что наибольшее влияние на режим работы КС оказывают сезонные изменения, связанные с отопительным режимом. Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов выгодно поддерживать максимальное расчетное давление газа в трубопроводе, снижать его температуру за счет охлаждения, применять газопроводы большего диаметра с очисткой внутренней поверхности.

Оборудование и обвязка КС приспособлены к переменному режиму работы МГ, но это приводит к снижению загрузки ГПА и перерасходу энергопотребления из-за отклонения от оптимальных КПД оборудования. Повышение давления газа на КС осуществляется в одну, две и три ступени с помощью поршневых или центробежных нагнетателей, приводом которых могут служить поршневые

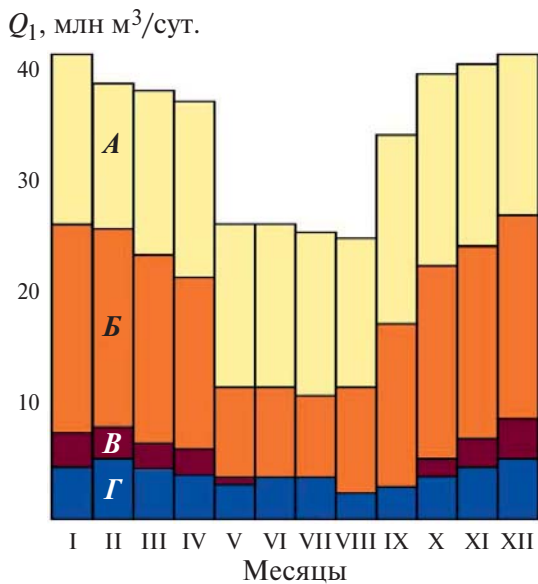


Рис. 1. Диаграмма сезонного колебания расхода газа крупного промышленного центра:

А — ТЭЦ; Б — промышленность; В — отопление; Г — ЖКХ

двигатели внутреннего сгорания, газотурбинные установки и электродвигатели.

Несмотря на все многообразие типоразмеров ГПА различных фирм-изготовителей, вид привода нагнетателей КС и их мощность в основном определяются пропускной способностью газопровода. В настоящее время в ОАО «Газпром» России общая доля газотурбинных приводов составляет 85,3 %, а электроприводных (ЭГПА) — 14,1 %. В развитых странах Запады согласно статистике использование газотурбинных и электрических приводов для центробежных нагнетателей осуществляется в равных долях на основе требований, предъявляемых к конкретным КС. Сравнительные показатели ГПА основных типов по данным [1, 3] приведены в табл. 1.

Как правило, современный приводной агрегат турбокомпрессоров — это уникальная система по мощности (до 64 МВт), стоимости, набору вспомогательных устройств и функциональным возможностям. Поэтому надежная и безаварийная работа всех агрегатов — главный фактор экономичности и стабильности поставок газа в рамках Единой системы газоснабжения (ЕСГ) России. Сегодня в 706 компрессорных цехах, входящих в состав 263 компрессорных цехов, в эксплуатации находится более 4000 ГПА суммарной мощностью 44 млн кВт.

Количество газа, перекачиваемого через КС, можно регулировать путем включения и отключения числа работающих ГПА, изменения частоты вращения вала ГПА и т. п. Од-

нако во всех случаях необходимо стремиться к использованию наименьшего числа агрегатов для перекачки требуемого объема газа, так как это позволяет расходовать меньше топливного газа и электроэнергии, и как следствие — увеличивать подачу товарного газа по газопроводу и снижать его себестоимость.

Анализ показателей, характеризующих работу ЕСГ страны сегодня, свидетельствует о значительном износе и снижении производительности основных агрегатов КС. Средний возраст газопроводов ЕСГ России составляет 22 года, причем у большей их части (около 80 %) он достигает 15–40 лет. Поэтому следует принимать меры для предотвращения дальнейшего ухудшения технического состояния и снижения производительности основного оборудования объектов ЕСГ, повышения эксплуатационных показателей и уменьшения энергозатрат при транспорте газа. Этого можно достичь только путем реконструкции, модернизации и оптимизации режимов эксплуатации основного оборудования.

#### Обоснование областей применения ЭГПА.

С целью системного исследования работы ЭГПА в штатных режимах необходим комплексный подход к синтезу системы с анализом характеристик основных элементов центробежных нагнетателей и синхронных двигателей (СД) и их взаимовлияния. Для основных типов ЭГПА, представленных в табл. 2, разработаны и успешно функционируют отраслевые и зарубежные системы регулирования на основе тиристорных пускорегулирующих устройств и высоковольтных преобразователей частоты на базе непосредственных преобразователей частоты или автономных инверторов тока. Как видно, всего на КС ОАО «Газпром» эксплуатируется 721 ЭГПА разных типов и единичной мощности, из них 328 — наиболее распространенные с синхронными двигателями СТД-12,5. ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» является третьим по объемам транспортируемого газа и единственным в системе ОАО «Газпром» газотранспортным предприятием, в котором доля ЭГПА, участвующих в транспорте газа, составляет более 50 % (130 шт.).

Структурная схема ЭГПА-12,5 представлена на рис. 2. Ее основные элементы: центробежный полнонапорный нагнетатель *Н* типа Н-235-21-3; повышающая передача *Р*; синхронный двигатель *ЭД* типа СТД-12500-2Р с тиристорной щеточной системой возбуждения *ТВУ*, щеточно-контактным аппаратом *ЩКА* и

Таблица 1

Показатель	Электропривод		Газотурбинный привод
	Высокоскоростной двигатель	Двигатель с мультипликатором	
Условия электроснабжения	Преимущественно в регионах с дешевой электроэнергией от АЭС, ГЭС, ТЭЦ при расстояниях до 100 км		Преимущественно в отдаленных регионах добычи и переработки газа
Категория электроприемника	Обеспечение электроснабжения от двух независимых взаиморезервируемых источников питания		Электроэнергия используется только для аппаратов воздушного охлаждения газа, масла и периферии
КПД и затраты на энергоресурсы	Общий КПД от ТЭЦ с преобразованием — 36 – 37 %	Дополнительные потери снижают КПД на 1,5 %	КПД равен 26 – 28 %, т. е. на 26 – 30 % ниже, чем при ЭГПА (авиационные — до 32 %)
Расход транспортируемого газа	Отсутствует, что позволяет сберечь полезный и ценный продукт для нужд промышленности		Сжигается до 7,5 % от транспортируемого газа
Первоначальная стоимость, отн. ед.	2,5	1,0	6,0 – 9,0
Надежность:			
средняя наработка на отказ	25 – 27 тыс. ч	27 тыс. ч	40 тыс. ч
отказы привода относительно общего числа	8 – 10 %	35 – 48 %	в 2,2 – 2,5 раз выше, чем у ЭГПА
Срок службы	15 – 20 лет		15 – 20 лет (авиационные двигатели — 40 – 50 тыс. ч)
Затраты на ТО и ремонт	4 % эксплуатационных расходов		ТО — до 12 – 15 % стоимости нового привода (ремонт — до 30 % цены двигателя)
Трудоемкость ремонта, чел.-ч	ТР — 440 (по РД-39-095-91) СР — 1800 КР — 2750		ТР — 960 СР — 2560 КР — 3200
Экология	Вредные выбросы отсутствуют		Выбросы NO <sub>x</sub> , CO <sub>x</sub> . Шумовибрационные воздействия на природу

Примечание. ТО — техническое обслуживание; ТР, СР, КР — текущий, средний и капитальный ремонты соответственно.

согласующим трансформатором *СТР*; токоограничивающий реактор *РБУ*; подшипники скольжения электродвигателя ПСЭД № 1 и 2; высоковольтный выключатель *ВВ*; системы маслосмазки низкого *МСНД* и высокого *МСВД* давления; система автоматического управления и защит *САУ* и *ТЭЗ*.

Электроприводные ГПА нового поколения должны обеспечивать высокий уровень эксплуатационных показателей, включая энергетические и пускорегулировочные характеристики, высокую надежность, безаварийность

и живучесть основных агрегатов. С этой целью разработаны современные промышленные системы ЭГПА отечественного и зарубежного производства [1, 4]. Вместе с тем до сих пор не решены актуальные проблемы реализации инновационных технологий и теоретических разработок, обеспечивающих надежное и оптимальное функционирование ЭГПА в условиях КС [3]:

1) разработка алгоритмов плавного гарантированного пуска СД под нагрузкой или из “горячего” состояния в режимах скалярного,

Таблица 2

Тип агрегата	Мощность, МВт	Число ЭГПА	Общая мощность
СТМ (СТД)-4000	4	338	1352
СТД-12,5	12,5	328	4100
СДГ-12,5	12,5	20	250
ЭГПА-25	25	6	150
ЭГПА-Ц-6,3	6,3	20	126
ЭГПА-Ц-6,3К	6,3	9	56,7

векторного частотного или квазичастотного формирования пусковых характеристик;

2) инвариантное автоматическое регулирование частоты вращения электродвигателя ЭГПА для стабилизации оптимального давления газа на выходе из КС в условиях действия внешних возмущений технологического и климатического характера;

3) выбор оптимальной топологии высоковольтных преобразователей частоты для питания двигателей;

4) обеспечение электрохимической и электромагнитной совместимости приводных электродвигателей с нагнетателями и питающей сетью при групповой работе ЭГПА в рамках КС на одну магистраль;

5) создание новых методик расчета оптимальных параметров давления, температуры и расхода газа для новых и модернизируемых ЭГПА с целью анализа реальной работы центробежных нагнетателей как объекта привода;

6) разработка программно-аппаратного комплекса встроенной системы непрерывного мониторинга и прогнозирования технического состояния ЭГПА с применением технических средств интеллектуальных датчиков, нейроконтроллеров и алгоритмов нечеткой логики с перспективой перехода к техническому обслуживанию и ремонту по фактическому состоянию оборудования;

7) обеспечение стабильного и устойчивого функционирования приводного СД ЭГПА во всех возможных режимах работы путем оперативного контроля угла нагрузки машины с помощью бездатчиковой системы автоматического регулирования (САР) возбуждения на базе цифровых тиристорных возбудителей;

8) реализация безмасляных и безредукторных технологий на основе систем электромагнитного подвешивания валов и роторов высокоскоростных двигателей и нагнетателей в едином конструктивном исполнении;

9) согласование рабочих параметров всех технологических агрегатов КС (нагнетателей, аппаратов воздушного охлаждения газа, масла и т. п.) с целью минимизации энергопотребления в рамках каждой КС;

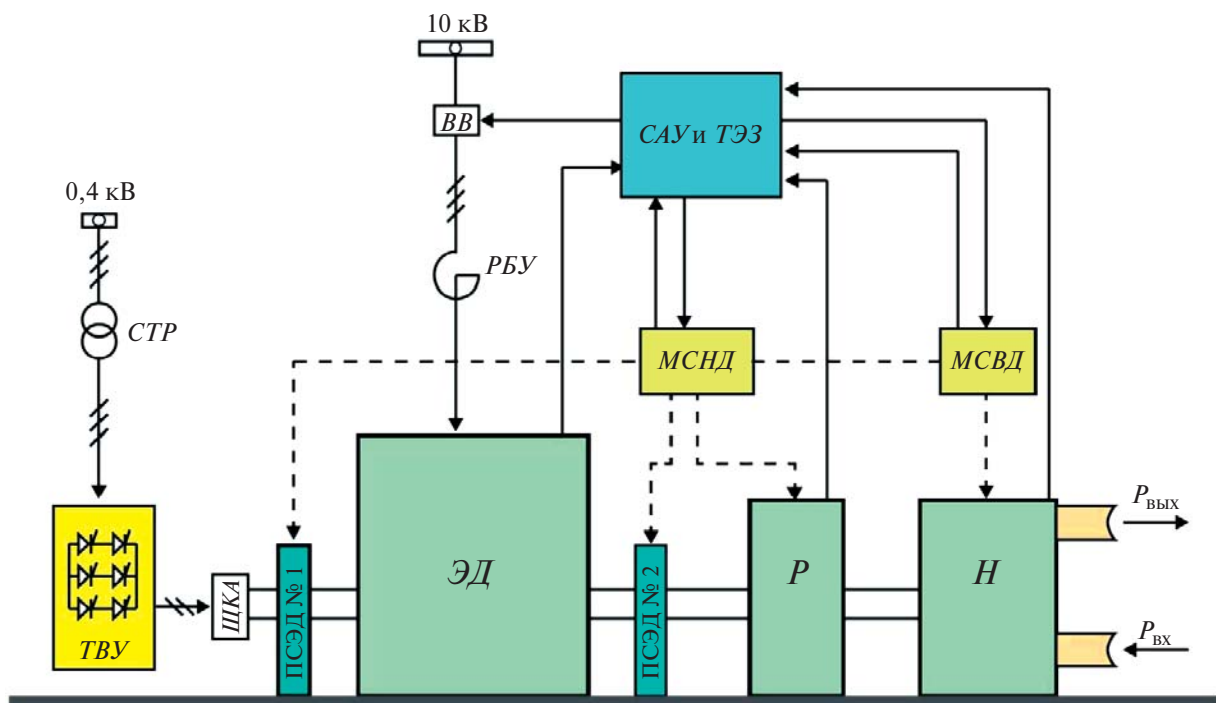


Рис. 2. Структурная схема ЭГПА-12,5

10) согласование режимов работы соседних компрессорных цехов с целью оптимизации энергопотребления в рамках линейного производственного участка МГ и газотранспортного предприятия при различных параметрах газоподачи и газопотребления;

11) снижение экологической нагрузки на природу путем уменьшения выбросов парниковых газов, отработанных масел, шумовых и вибрационных воздействий.

Системное решение этих проблем в рамках КС позволит значительно повысить технико-экономическую привлекательность и конкурентоспособность ЭГПА, так как обеспечит энергоэффективность и безопасность функционирования МГ, а также стабильность, надежность и экологичность транспорта газа.

**Плавный пуск нерегулируемых ЭГПА.** Пуск ЭГПА сопровождается бросками тока статора при небольшой кратности электромагнитного момента, что приводит к возникновению значительных электродинамических усилий в роторе, перегреву и старению изоляции статорных обмоток. Разработанные и прошедшие испытания на КС новые синхронные двигатели СДГ-12500-2 контейнерных ЭГПА и СДГМ-12500-2 с учетом конструктивных доработок роторов не улучшают пусковые характеристики агрегатов. Наиболее кардинальный способ пуска мощных СД — использование полупроводниковых высоковольтных устройств плавного пуска в режимах фазового и квазичастотного пуска [1, 3] и преобразователей частоты (ПЧ) [4].

Результаты моделирования и испытаний СД на КС “Лукояновская” показали следующее:

при прямом пуске: колебания момента — до  $4M_{\text{ном}}$  (50 Гц), ударный ток СД — до  $6I_{\text{ном}}$ , провал напряжения — до 35 %;

при мягком пуске: колебания момента  $M$  меньше при  $\omega \leq \omega_0$ , ток статора (с амплитудой до  $4I_{\text{ном}}$ ) несинусоидален, провал напряжения меньше, чем при прямом пуске;

при частотном пуске: нет пульсаций  $M$  и тока и отсутствуют ограничения по пускам, ток статора практически синусоидален, провал напряжения не превышает 7 %.

**Регулирование производительности и давления при транспорте газа.** Режим работы ЭГПА — переменный (квазиустановившийся) вследствие непрерывного изменения объемов перекачиваемого газа, его давления и температуры на входе КС. Несмотря на наличие подземных хранилищ газа и дожимных КС,

неравномерность его подачи и потребления, характеризующуюся определенной циклическостью в течение года, месяца и суток, компенсировать и устранить не удастся. Это обусловлено главным образом непредсказуемостью и стохастичностью всех возмущающих факторов режима транспортировки газа, имеющих различную физическую природу. Кроме того, существенное влияние на изменение режима работы КС может оказать поэтапный ввод в эксплуатацию МГ с постепенным увеличением его пропускной способности, а также изменение давления газа на входе ЭГПА вследствие изменения пластового давления и появления промежуточных ответвлений. Самым экономичным способом регулирования ЭГПА является частотное регулирование скорости синхронного двигателя на базе высоковольтных ПЧ. Это позволяет эффективно обеспечивать:

энергосберегающие режимы работы;

стабилизацию давления, температуры, подачи газа и уменьшение износа технологического оборудования КС;

надежность эксплуатации агрегатов и повышение их ресурса при снижении затрат на техническое обслуживание и ремонт;

совместимость, экологичность и интеграцию в рамках АСУ КС.

Основной акцент научных разработок сместился в сторону поиска оптимальных алгоритмов управления и адаптации их к реальным режимам работы КС с помощью инвариантных САР ЭГПА (рис. 3) [1, 3].

В настоящее время создано эффективное комплектное электрооборудование для высоковольтных регулируемых ЭГПА, причем высокая стоимость ПЧ компенсируется эффектом энергосбережения, благодаря чему обеспечивается быстрая окупаемость затрат. В рамках модернизации КС “Карталинская” проектируются системы векторного управления ЭГПА мощностью 8,2 МВт производства ООО “Электротяжмаш-Привод” (Лысьва) с ПЧ фирмы “Converteam”.

**Электромагнитный подвес ротора и отсутствие мультипликатора.** Основные преимущества отсутствия подшипников в мощных двигателях ЭГПА:

снижение износа узлов при отсутствии трения;

отсутствие затрат на смазочные материалы;

уменьшение механических потерь энергии;

возможность работы при воздействии высоких температур, влажности, агрессивных сред;

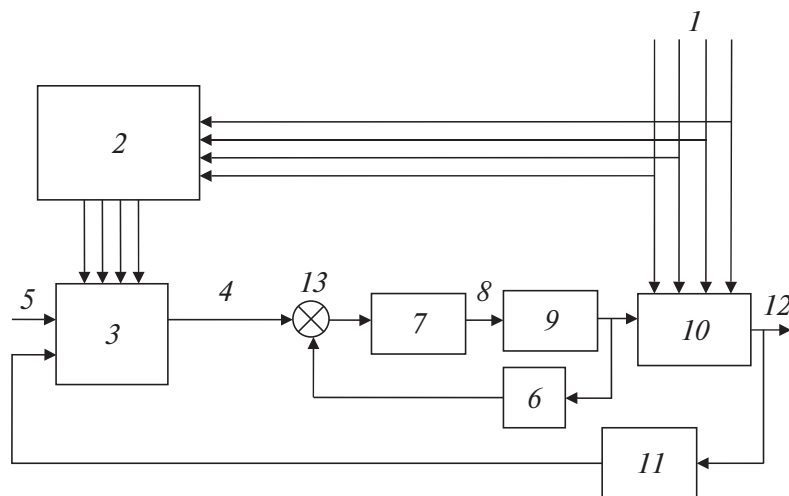


Рис. 3. Инвариантная САУ ЭГПА:

1 — внешние воздействия; 2 — датчики возмущений; 3 — блок расчета скорости ГПА (4) в соответствии с заданным давлением газа (5); 6 — датчик частоты вращения; 7 — ПИ-регулятор скорости 8; 9 — электропривод ГПА по системе ПЧ-СД; 10 — газоперекачивающий агрегат; 11 — датчик давления газа на выходе 12; 13 — сумматор

хорошая теплоизоляция статора от ротора, улучшающая тепловое состояние машины и повышающая ее ресурс;

возможность создания высокоскоростных безредукторных машин с большим ресурсом;

значительное сокращение расходов на техническое обслуживание и ремонт;

высокий уровень диагностики СД благодаря мониторингу электромагнитного подвеса (ЭМП);

экологическая чистота.

Системы ЭМП, разработанные для газотурбинных ГПА, успешно работают на КС “Тольяттинская”, “Сызранская”, “Помарская”, “Пермская”. С 1991 г. в США, а с 1994 г. в Канаде и Англии эксплуатируются ЭГПА с ЭМП. В ближайшее время в рамках реконструкции планируется установка нескольких ЭГПА с активным ЭМП мощностью 8,2 МВт на КС “Карталинская” ООО “Газпром трансгаз Екатеринбург”.

**Интеллектуализация управления и диагностики ЭГПА.** Поскольку магистральные газопроводы относятся к промышленным объектам повышенной опасности, с каждым годом ужесточаются требования по обеспечению надежности и безаварийности работы всего оборудования. Это обусловлено не только объективными причинами (устаревшее оборудование, ненадежное электроснабжение КС и т. п.), но и наличием человеческого фактора при обслуживании. Поэтому работа всех элементов ЭГПА (стоимость которых весьма значительна) должна контролироваться встроенной системой мониторинга и прогнозирования (ВСМП) в режиме online. При этом

проектировать ее следует параллельно с проектированием систем автоматического управления ЭГПА и диагностики КС в целом.

Традиционные САУ ЭГПА, применяемые на компрессорных станциях магистральных газопроводов ОАО “Газпром”, осуществляют контроль основных параметров электродвигателя (тока, напряжения, потребляемой мощности, температуры обмоток статора). Однако в них не заложены алгоритмы, позволяющие оценивать эффективность электропривода и предоставлять эксплуатационному персоналу сведения об аномальных отклонениях в его работе. Кроме того, на этапе их разработки отсутствовали общий концептуальный подход и единая методологическая основа [1, 3] построения структуры программно-аппаратных средств и алгоритмов оценки состояния и перспектив работоспособности двигателей как наиболее сложного и дорогостоящего элемента ЭГПА.

Новая структура ВСМП технического состояния приводного двигателя ЭГПА отличается тем, что в ней при использовании штатных датчиков существует возможность реализации нейро-нечетких и математических методов среднесрочного прогноза перспектив эксплуатации агрегата. При этом дополнительными в схеме являются лишь емкостные датчики частичных разрядов и датчики внутреннего угла синхронного двигателя ( $E_0 U_c$ ). Для контроля интенсивности частичных разрядов в ВСМП использован прибор PD-Track фирмы “Iris Power” с передачей данных по интерфейсу RS-232.

Разработанная система построена на базе промышленного компьютера MicroPC Octagon Systems. Аналоговые сигналы непосредственно с датчиков поступают на соответствующие платы преобразования. Далее в нормализованном виде сигналы тока и напряжения статорных и роторных цепей, а также напряжений на шинах 10 кВ, температуры меди, стали, холодного и горячего воздуха передаются в интерфейсный порт 5720-01 быстродействующего аналого-цифрового преобразователя с вводом в модуль процессора PC-600. Программа обработки данных хранится во флэш-памяти IGCEД на основе алгоритмов нейро-нечеткой идентификации [1, 3].

В результате реализации ВСМП ЭГПА на семи КС ООО “Газпром трансгаз Нижний Новгород” доказаны возможность и эффективность применения нейронных сетей и нейро-нечетких алгоритмов при адекватном мониторинге и прогнозировании неисправностей приводных двигателей ЭГПА. Нейро-нечеткая сеть, которая использует в качестве

входных переменных основные эксплуатационные факторы старения изоляции статорных обмоток СД (температуру меди, интенсивность частичных разрядов и уровень перенапряжений в питающей сети), дает возможность с максимальной степенью достоверности идентифицировать неисправности и прогнозировать их развитие.

#### Список литературы

1. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: Монография / Под ред. О. В. Крюкова. — Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010.
2. **Энергетическая** стратегия России на период до 2020 года (Распоряжение Правительства РФ от 28 августа 2003 г. № 1234-р).
3. **Крюков О. В.** Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах. — Автоматизация в промышленности, 2010, № 10.
4. **Краснов Д. В., Онищенко Г. Б.** Оценка потребности в высоковольтных регулируемых электроприводах переменного тока. — Изв. ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Ч. 1, 2010.

[earu@mail.ru](mailto:earu@mail.ru)

