

УДК 62-52-83:656.56

## ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

**О. В. Крюков, С. Е. Степанов**

ОАО «Гипрогазцентр»

ул. Алексеевская, 26, г. Нижний Новгород, 603950, Россия. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Систематизирован многолетний опыт ОАО «Гипрогазцентр» по проектированию и внедрению современных систем энергосберегающего автоматизированного электропривода технологических установок объектов магистральных газопроводов. Рассмотрены особенности и режимы работы электроприводов газоперекачивающих агрегатов, аппаратов воздушного охлаждения газа и вспомогательных установок компрессорных станций. Представлены результаты реализации наиболее эффективных и наукоемких проектов с применением новых принципов и алгоритмов управления группами электроприводных технологических агрегатов. Предложены перспективные направления совершенствования электроприводов нагнетателей при модернизации для повышения надежности и энергоэффективности магистрального транспорта газа.

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

## ШЛЯХИ МОДЕРНИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

**О. В. Крюков, С. Е. Степанов**

ВАТ «Гіпрогазцентр»

вул. Олексіївська, 26, м. Нижній Новгород, 603950, Росія. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Систематизовано багаторічний досвід ВАТ «Гіпрогазцентр» по проектуванню й впровадженню сучасних систем енергозберігаючого автоматизованого електроприводу технологічних установок об'єктів магістральних газопроводів. Розглянуто особливості та режими роботи електроприводів газоперекачувальних агрегатів, апаратів повітряного охолодження газу й допоміжних установок компресорних станцій. Представлено результати реалізації найбільш ефективних і наукомістких проектів із застосуванням нових принципів і алгоритмів керування групами електроприводних технологічних агрегатів. Запропоновано перспективні напрями вдосконалення електроприводів нагнітачів при модернізації для підвищення надійності та енергоефективності магістрального транспорту газу.

**Ключові слова:** газоперекачувальний агрегат, синхронний двигун, модернізація, енергозбереження.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** За более чем полувековую историю своего развития в ОАО «Газпром» построено свыше 160 тыс. км магистральных газопроводов (МГ) с 4 тыс. компрессорных станций (КС). Из них около трети – по проектам ОАО «Гипрогазцентр», включая новые МГ «Южный поток», «Сахалин–Хабаровск–Владивосток», «Починки–Грязовец» и ряд других. Основными технологическими агрегатами МГ являются газоперекачивающие агрегаты (ГПА) КС, которые определяют показатели надежности и энергоэффективности транспорта газа, а также его себестоимость у потребителей. Электроприводы ГПА на основе синхронных двигателей (СД) мегаваттного класса в основном нерегулируемые и эксплуатируются с большим физическим и моральным износом. Они имеют свои специфические особенности и перспективы развития, обусловленные параметрами режимов и характера нагрузки, а также возможностями новой техники и технологий (рис. 1).



Рисунок 1 – Электроприводные газоперекачивающие агрегаты MORICO.4.HOFIM

## МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

*Задачи системной модернизации электроприводных ГПА (ЭГПА).* При проектировании и модернизации КС с электроприводными ГПА главной задачей является [1, 2] обеспечение требуемой производительности ЭГПА при изменяющихся условиях подачи и потребления газа.

Это условие необходимо для поддержания оптимального давления в МГ при минимальном энергопотреблении и обеспечения надежной работы газотранспортной системы. Данная задача требует системного подхода и включает в себя несколько аспектов [2–4]:

– *технологический* – обеспечение транспорта газа в оптимальных режимах в соответствии с часто изменяющимися внешними воздействиями детерминированного (графики поставки) и стохастического (природного) характера;

– *экономический* – окупаемость модернизации системы электроснабжения и оборудования ЭГПА за счёт эффектов строгого соблюдения графика газоподачи, энергосбережения при регулировании и снижения аварийности;

– *надёжность* – безаварийность и долговечность работы каждого элемента ЭГПА с непрерывным мониторингом и прогнозом состояния;

– *автоматизация* – АСУ КС должна содержать полную информацию о режимах ЭГПА и других технологических установок, а также о параметрах КС для обеспечения эффективного регулирования производительности МГ. Кроме того, она должна иметь возможность обмена информацией с другими КС МГ, включая газотурбинные ГПА.

Основными направлениями модернизации ЭГПА являются [5–7]:

- безопасность пуска;
- регулирование скорости СД (газоподачи);
- надежность и АСУ возбуждением СД;
- введение активного подвеса роторов ЭГПА;
- мониторинг и прогноз состояния СД;
- согласование характеристик ГПА и СД;
- координация взаимосвязанных ЭГПА;
- оптимизация работы приводов в рамках цеха;
- согласование режимов ЭГПА на плече МГ;
- надежное электроснабжение ЭГПА;
- снижение экологических нагрузок на среду;
- реализация мало- и безлюдных технологий.

*Устройство плавного пуска ЭГПА.* Процесс пуска ЭГПА сопровождается большими бросками тока статора при небольшой кратности электромагнитного момента [6, 7], что приводит к значительным электродинамическим усилиям в роторе, перегреву и старению изоляции статорных обмоток (рис. 2). Разработанные и прошедшие испытания на КС новые синхронные двигатели серии СДГ-12500-2 и СДГМ-12500-2 с учетом своих конструктивных доработок роторов не вносят достаточных изменений в улучшение пусковых характеристик машин и агрегатов.

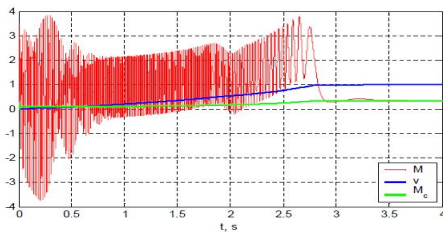


Рисунок 2 – Переходные процессы запуска СД ЭГПА

Наиболее безопасным способом пуска мощных СД является использование полупроводниковых высоковольтных мягких пускателей в режимах фазового и квазичастотного пуска [6, 7] и преобразователей частоты (ПЧ).

Результаты компьютерного моделирования и испытаний на КС «Помарская» показали:

- при прямом пуске колебания момента – до  $4 M_n$  на 50 Гц, ударный ток СД – до  $12,5 I_n$ , ток возбуждения – до  $5 I_v$ , провал напряжения – до 35 %;
- при мягком пуске колебания момента меньше при  $\omega \leq \omega_0$ , ток статора несинусоидален с амплитудой до  $4 I_n$ , провал напряжения остается;
- при частотном пуске нет пульсаций момента и тока и ограничений по пускам, ток статора практически синусоидален, провал напряжения  $\leq 7$  %.

*Регулирование давления на выходе ЭГПА.* Режимы работы ЭГПА КС являются квазиустановившимися, поскольку имеет место изменение объема перекачиваемого газа, а также его давление и температура на входе КС. Несмотря на наличие станций ПХГ и ДКС, неравномерность подачи и потребления газа, характеризующуюся определенной циклическостью в течение года, месяца и суток, компенсировать и устранить не удастся. Это обусловлено главным образом непредсказуемостью и стохастичностью всех возмущающих факторов штатного режима транспортировки газа, имеющих различную физическую природу [8, 9]. Кроме того, значительное влияние на

изменение режима работы КС может оказать и поэтапный ввод в эксплуатацию МГ с постепенным увеличением его мощности, а также изменение давления газа на входе ЭГПА вследствие изменения пластового давления и появления промежуточных ответвлений. Самым экономичным способом регулирования производительности ЭГПА является использование многоуровневых ПЧ на базе АИТ или НПЧ для регулирования скорости СД. Это позволяет обеспечить:

- энергосберегающие режимы, т.к. ЭГПА потребляет из сети столько энергии, сколько нужно для энергоэффективной работы;
- стабилизацию параметров давления, температуры, подачи газа и уменьшение износа технологического оборудования КС;
- надежность эксплуатации агрегатов и их ресурс при снижении затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР);
- совместимость, экологичность и интеграцию в рамках АСУ КС.

Основной акцент научных разработок сейчас сместился в сторону поиска оптимальных алгоритмов управления и адаптации их к реальным режимам работы КС [1, 8]. К настоящему времени создано эффективное комплектное электрооборудование для высоковольтных регулируемых ЭГПА, причем высокая стоимость ПЧ компенсируется эффектом энергосбережения, обеспечивая быструю окупаемость затрат. В настоящее время в рамках модернизации КС «Карталинская» проектируются системы векторного управления ЭГПА Р<sub>н</sub>=9,2 МВт ООО «Электро-Привод-Газ» (Лысьва, Россия) с ПЧ фирмы «Converteam» (Германия) (рис. 3).



Рисунок 3 – Общий вид нового поколения регулируемых электроприводов ЭГПА-9,2/8600-56/1, 44-Р

*Цифровые системы автоматического регулирования (САР) возбуждения СД.* Состояние систем возбуждения СД ЭГПА характеризуется следующими особенностями:

- все СД оснащены физически и морально устаревшими аналоговыми возбудителями с проблемами настройки и стабильности режимов;
- нестабильность электроснабжения приводит к нарушениям режимов ЭГПА, потере устойчивости СД и снижению ресурса оборудования;
- технологическими проблемами выбора ФКУ и параметров реактивной мощности.

Цифровые САР возбуждения позволяют:

- перейти от ручного задания тока к САР с цифровыми тиристорными возбудителями;
- исходить из локальной оптимизации ЭГПА с учетом нагрузки с интеграцией в АСУ КС;

– при колебаниях напряжения применять бездатчиковые системы векторного управления на базе процессорных вычислителей нагрузки.

В отличие от известных систем возбуждения, где в качестве сигнала обратной связи принимают или выделяют электрические сигналы СД, вызванные приложением нагрузки, в новых схемах и алгоритмах [1, 8] используется сигнал самой первопричины – статической нагрузки на валу СД. Выделение сигнала нагрузки обеспечивает САР возбуждения некоторое упреждение, а значит и быстрдействие по сравнению с классическими. Исследование показало, что управление возбуждением по отклонению момента снижает амплитуду качаний ротора и сокращает длительность динамики. Программная реализация идентификатора угла нагрузки в векторной САР возбуждения СД позволяет получить бездатчиковый приводной СД ЭГПА с оптимальными энергетическими параметрами и устойчивостью к колебаниям нагрузки и напряжения сети во всем диапазоне работы КС.

*Активный магнитный подвес.* Основными преимуществами отсутствия подшипников в мощных СД ЭГПА являются:

- снижение износа при отсутствии трения;
- отсутствие затрат на смазочные материалы;
- снижение механических потерь энергии;
- возможность работы при воздействии высоких температур, агрессивных сред и влажности;
- хорошая теплоизоляция статора от ротора, улучшение теплового состояния СД и ресурса;
- создание высокоскоростных безредукторных машин с большим ресурсом;
- значительное сокращение расходов на ТОиР;
- высокий уровень диагностики СД за счет мониторинга электромагнитного подвеса (ЭМП);
- экологическая чистота.

Системы ЭМП, разработанные для газотурбинных ГПА, успешно работают на КС «Тольяттинская», «Сызранская», «Помарская», «Пермская». С 1991 года в США, а с 1994 – в Канаде и Англии успешно работают ЭГПА с ЭМП (рис. 4). В ближайшее время в рамках реконструкции планируется установка нескольких ЭГПА с активным ЭМП мощностью 9,2 МВт на КС «Карталинская» ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург». В настоящее время последние модификации КС представляют собой совокупность автономных модульных технологических агрегатов, интегрированных из нескольких новых технологических установок.



Рисунок 4 – Комплексный модульный ЭГПА с ЭМП

*Мониторинг и прогнозирование технического состояния СД.* Приводные электродвигатели ЭГПА являются наиболее сложными и дорогостоящими агрегатами КС, выход из строя которых приводит к значительным материальным затратам. Поэтому

мониторинг и прогнозирование технического состояния СД и, в особенности, изоляции статорных обмоток являются важным фактором повышения надежности ЭГПА с переходом на ТОиР по фактическому состоянию машины.

Для построения встроенной системы мониторинга и прогнозирования состояния высоковольтной электрической машины необходимо:

- 1) провести статистическую обработку отказов СД с анализом эксплуатационных факторов;
- 2) разработать модели и анализировать процессы изменения факторов повреждаемости СД;
- 3) создать средства, интеллектуальные датчики и алгоритмы обработки данных состояния СД;
- 4) синтезировать встроенную систему мониторинга с прогнозированием состояния ЭГПА.

Исследования, проведенные на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», показали, что 90 % случаев пробоя изоляции обмотки статора происходит в средней части расточки статора. При этом главными факторами старения изоляции являются термомеханические нагрузки, частичные разряды и перенапряжения сети.

Для синтеза встроенной системы мониторинга и прогнозирования состояния СД целесообразно выполнять методом нейро-нечеткой идентификации.

- Создание подобной системы позволяет:
- получать достоверную информацию о техническом состоянии СД в режиме «on-line»;
  - планировать капитальные и текущие ремонты СД на основе фактического состояния, сократив время простоя в ремонте с 12 до 2–3 тыс. час;
  - контролировать работу системы охлаждения СД и поддерживать оптимальные режимы, позволяющие увеличить ресурс изоляции;
  - при совместном вибрационном и FFT-анализе потребления мощности выявлять причины повышенной вибрации СД;
  - повысить уровень эксплуатации ЭГПА и в итоге снизить общие эксплуатационные расходы.

**ВЫВОДЫ.** Принципиальное и системное решение проблем повышения эффективности МГ и обеспечение необходимой надежности оборудования связано с поэтапной реконструкцией и модернизацией существующего парка ЭГПА. Для этого необходимо:

- 1) использовать современные электрические машины повышенной мощности, скорости вращения и надежности, интегрированные с ЭГПА в едином конструктиве, на основе технологий ЭМП, со встроенными системами оперативного мониторинга состояния;
- 2) при использовании СД в качестве привода ЭГПА требуется массовая замена устаревших систем возбуждения на цифровые возбудители с векторным управлением и микропроцессорных идентификаторов угла нагрузки машины;
- 3) применять серийные высоковольтные ПЧ для всей гаммы мощностей двигателей, которые расширяют функциональные возможности и энергоэффективность ЭГПА;
- 4) при стабильном графике газоперекачки целесообразно использовать высоковольтные мягкие пускатели, обеспечивающие плавный запуск агрегатов в каскадной схеме и защиту СД;

5) модернизировать систему электроснабжения КС, включающую внедрение нового оборудования ЗРУ-10 кВ и применение микропроцессорных систем релейной защиты и автоматики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография. / Под ред. О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – Т. 1. – 560 с.

2. Воронков В.И., Рубцова И.Е., Крюков О.В. Электроснабжение и электрооборудование линейных потребителей МГ // Газовая промышленность. – 2010. – № 3. – С. 32–36.

3. Рубцова И.Е., Крюков О.В., Садиков Д.Г. и др. Теоретическое обоснование и новые аппаратные возможности энергосберегающих ЭГПА // Труды IV МНТК «Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2011)», 26-27 октября 2011. – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2011. – С. 112.

4. Крюков О.В. Проектирование и модернизация электроприводов нефтегазовых перекачивающих агрегатов // Труды III ВНТК «Электропривод, электро-технологии и электрооборудование предприятий», 8 апреля 2011. – Уфа, УГНТУ, 2011. – С. 69–72.

5. Крюков О.В., Рубцова И.Е., Титов В.Г. Опыт проектирования электроприводов газотранспортных систем // Труды XV МНТК «Электроприводы переменного тока (ЭППТ-2012)», 12–16 марта 2012. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 239–242.

6. Крюков О.В. Опыт применения систем безопасного пуска электродвигателей большой мощности // Приводная техника. – 2011. – № 4. – С. 2–13.

7. Патент РФ №101598 МПК H02P 1/46. Автоматизированная система плавного пуска синхронного электропривода механизмов с высокомоментной нагрузкой / Воронков В.И., Степанов С.Е., Крюков О.В., опубл. 20.01.2011.

8. Патент РФ №107427 МПК H02P 27/04. Электропривод газоперекачивающего агрегата / Крюков О.В., Степанов С.Е., опубл. 10.08.2011.

9. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления ЭГПА // Труды XXXIV МНПК «Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях (АИТА-2011)», 4–8 апреля 2011. – М.: ИПУ РАН, 2011. – С. 329–350.

10. Крюков О.В. Анализ аварийности приводных электродвигателей магистральных ГПА // Приводная техника. – 2012. – № 1. – С. 2–11.

TOWARDS MODERNIZATION ELECTRIC GAS COMPRESSOR UNIT

O. Kryukov, S. Stepanov

ОАО “Giprogazcenter”

ul. Alekseevskaya, 26, Nizhniy Novgorod, 603950, Russia. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

JSC “Giprogazcenter” long-term experience on designing and implementation of energy-saving automated electric drive modern systems of main gas pipelines objects process installations is systematized. Features and operating modes of electric drives of gas-compressor units, gas air cooling units and auxiliary installations of compressor stations are considered. Results of realization of the most effective and high technology projects with application of new principles and algorithms of control of electric driven process units’ groups are presented. There offered perspective directions of superchargers electric drives improvement at modernization for increasing reliability and power efficiency of the gas main transport.

**Key words:** gas-compressor unit, synchronous motor, modernization, energy-saving.

REFERENCES

1. Puzhaylo A.F., Spiridovich E.A., Voronkov V.I. and oth. *Energy-saving and automation of compressor stations electrical equipment: Monograph* // Edited by O.V. Kryukov. – N. Novgorod: Vector TiS, 2010. – Vol. 1. – 560 p. [in Russian]

2. Voronkov V.I., Rubtsova I.E., Kryukov O.V. Power supply and electrical equipment of linear MG consumers // *Gazovaya promyshlennost.* – 2010. – № 3. – PP. 32–36. [in Russian]

3. Rubtsova I.E., Kryukov O.V., Sadikov D.G. and oth. Theoretical justification and new hardware possibilities of energy-saving EGCU // *Papers IV MNTK “Gas-transport systems: the present and the future (GTS-2011)”*, October 26–27, 2011. – M.: ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, 2011. – P. 112. [in Russian]

4. Kryukov O.V. Designing and modernization of electric drives of oil and gas compressor-units // *Papers III VNTK “Electric drive, electro technics and electrical equipment of enterprises”*, April 8, 2011. – Ufa, UGNTU, 2011. – PP. 69–72. [in Russian]

5. Kryukov O.V., Rubtsova I.E., Titov V.G. Experience of electric drives designing of gas-transport systems // *Papers XV MNTK “Alternating current electric drives (ACED-2012)”*, March 12–16, 2012. – Yekaterinburg: UrFU, 2012. – PP. 239–242. [in Russian]

6. Kryukov O.V. Experience of application of safe

start-up systems of high capacity electric motors // *Privodnaya tekhnika.* – 2011. – № 4. – PP. 2–13. [in Russian]

7. Voronkov V.I., Stepanov S.E., Kryukov O.V. *Automated system of smooth start-up of the synchronous electric drive of mechanisms with high-torque loading* // Patent No 101598 for Utility Model. Int.clas. H02P 1/46. – JSC “Giprogazcenter”, 2010, published on 20.01.2011. [in Russian]

8. Kryukov O.V., Stepanov S.E. *Gas-compressor unit electric drive* // Patent No107427 for Utility Model, Int.clas. H02P 27/04. – JSC “Giprogazcenter”, published on 10.08.2011. [in Russian]

9. Kryukov O.V. Complex system of monitoring and control of electric driven gas compressor-units // *Papers XXXIV MNPК “The advanced information technology, automation devices and systems and their implementation at the Russian enterprises (AITA-2011)”*, April 4–8, 2011. – M.: IPU RAN, 2011. – PP. 329–350. [in Russian]

10. Kryukov O.V. Accident rate analysis of drive electric motors of main gas compressor-units // *Privodnaya tekhnika.* – 2012. – № 1. – PP. 2–11. [in Russian]

Стаття надійшла 9.07.2012.  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.