

УДК 62-52-83:656.56

О.В. Крюков

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ГАЗА
С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ АГРЕГАТОВ**

АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород

Рассмотрены разработанные принципы энергоэффективного транспорта природного газа по магистральным газопроводам исходя из нормативно-технических документов. Представлена схема и современные технические средства частотно-регулируемых электроприводов и алгоритмов управления технологическими установками компрессорных станций магистрального транспорта газа.

Ключевые слова: энергоэффективность, магистральные газопроводы, электроприводные компрессорные станции, оптимальное управление технологическими агрегатами.

Оптимальный режим эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) заключается в максимальном использовании их пропускной способности (газоперекачки) при минимальных энергозатратах на компримирование, охлаждение и транспортировку [1-3]. В значительной степени этот режим определяется работой компрессорных станций (КС) и характеризуется неравномерностью подачи и потребления газа в течение года, месяца, суток, несмотря на наличие газохранилищ, а также научно обоснованных нормативных методик оптимизации [4-6].

Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов выгодно поддерживать максимальное расчетное давление газа в трубопроводе, снижать температуру перекачиваемого газа за счет его охлаждения, использовать газопроводы большего диаметра с очисткой внутренней полости трубопровода [7-10].

Анализ показателей, характеризующих работу МГ страны сегодня, говорит о значительном износе, снижении технического состояния и производительности основных агрегатов КС [11-14]. Средний возраст газопроводов в России составляет 22 года, большая часть которых (около 80 %) имеет возраст от 15 до 40 лет, что превышает нормативные показатели.

В последние годы интерес к проблемам энергоэффективности и энергосбережению на МГ значительно возрос на уровне разработки новых концепций оптимального управления [15-18], реализации интеллектуальных и малолюдных технологий функционирования [19-21], технических решений по применению новой техники, включая высоковольтные многоуровневые преобразователи частоты [7, 13, 22-23]. Появились первые реализации подобных систем для основных технологических установок КС (рис. 1) – электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) и аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО) [1, 2, 9].

Все отмеченные факторы при их системной реализации в рамках КС значительно повышают технико-экономическую привлекательность и конкурентоспособность ЭГПА, обеспечивая главные задачи энергоэффективности и безопасности функционирования магистральных газопроводов, а также стабильности, надежности и экологичности транспорта энергоресурсов России.

Возможности ЭГПА. Согласно нормам технологического проектирования МГ ОНТП 51-1-85* (п.3.116) «В комплексе средств автоматизации компрессорных цехов (КЦ) следует предусматривать системы автоматического регулирования, обеспечивающие поддержание заданных величин давления и температуры газа на выходе станции, устройства антипомпажного регулирования и защиты газоперекачивающих агрегатов (ГПА)» [1,2]. Однако существующие средства автоматики в основном работают автономно от агрегатов в ручном режиме, выполняя в основном защитные функции, и не обеспечивают энергоэффективные режимы [3,4]. Вместе с тем, сегодня возможности регулируемого ЭГПА позволяют оптими-

зировать энергопотребление КЦ с автоматическим слежением за возмущениями детерминированного и стохастического характера [5-7].



Рис. 1. Варианты новых моноблочных электроприводных газоперекачивающих агрегатов для энергоэффективного транспорта газа

В соответствии с патентом на изобретение ведущего проектного института ПАО «Газпром» – АО «Гипрогазцентр» [8] при участии автора предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы магистральных газопроводов (рис. 2). Это достигается тем, что температура и давление компримированного газа на выходе всех КС в начале каждого линейного участка МГ измеряются и автоматически регулируются из условия поддержания их на оптимальном уровне в соответствии с заданием и значениями внешних возмущений, действующих на параметры потока газа в газопроводах [9, 10].

Сопоставительный анализ данного способа, заключающегося в формировании давления и температуры потока сжатого газа по всей трассе МГ с помощью ЭГПА и вентиляторов АВО, установленных на всех КС в начале каждого линейного участка МГ, с аналогами показывает, что предлагаемый способ магистрального транспорта газа отличается от известных тем, что в нем автоматически устанавливаются и плавно регулируются величины давления и температуры газа с помощью регулируемых ЭГПА и АВО в зависимости от текущих значе-

ний давления и температуры газа в МГ, измеряемых соответственно датчиками давления и температуры газа, заданных параметров давления и температуры участка МГ, а также величин возмущающих воздействий стохастического характера и, тем самым, минимизируются параметрические изменения давления и температуры газопровода, что повышает его эксплуатационную надежность, а также минимизируют интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа.

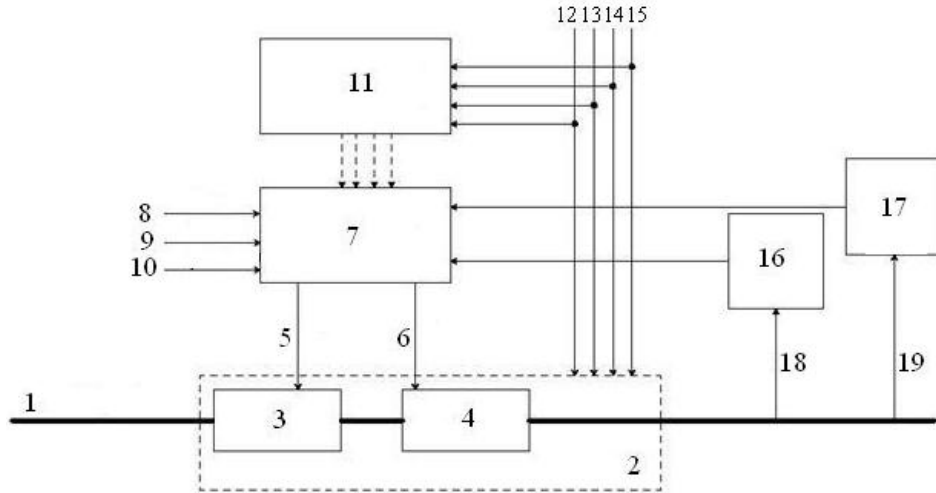


Рис. 2. Структура энергоэффективного транспорта газа через электроприводную компрессорную станцию:

1 - линейная часть МГ, 2 – КС, 3 – ЭГПА, 4 – АВО газа, 5 и 6 - скорости вращения приводов ЭГПА ($\omega_{зад}^{ЭГПА}$) и вентиляторов АВО ($\omega_{зад}^{АВО}$), 7 - блок расчета параметров регулирования, 8, 9, 10 - заданные значения производительности, давления и температуры газа, 11 - датчики измерения внешних воздействий, 12 – влажность воздуха (β), 13 – температура воздуха (θ), 14 – перепад температур (Δt) или давлений на КС (Δp), 15 – производительность КС (Q), 16 и 17 - датчики давления и температуры газа, измеряющих 18 и 19 - реальные значения давления и температуры газа на выходе КС

В качестве исходного состояния оптимизации необходимо выбрать интервалы значений непрерывно изменяющихся переменных и наборы значений дискретных переменных. При этом достигается минимум целевой функции, которая имеет следующий трехфакторный вид:

$$\mathbf{G} = \alpha \times \mathbf{R} + \beta \times \mathbf{W} + \gamma \times \mathbf{C}, \quad (1)$$

где α , β и γ - весовые коэффициенты, \mathbf{R} - фактор «режима», т.е. минимизации (максимизации) давления в определенных точках ГТС, таких как любые точки, расположенные выше и ниже КС или регулирующего вентиля, а также устройства потребления газа, \mathbf{W} - фактор «энергии» или минимизации потребления электроэнергии на компримирование газа и его охлаждение в АВО перед подачей в газопровод, \mathbf{C} - фактор «цели», т.е. максимизации (минимизации) расхода газа на участке системы, расположенном между двумя точками газопровода, или давления в определенной точке соединения.

Указанные ограничения включают в себя ограничения равенства, в число которых входят закон потери напора в трубопроводах и первое правило Кирхгофа, определяющие расчеты сетей, и ограничения неравенства, в число которых входят ограничения на минимальные и максимальные значения расхода газа, ограничения на минимальное и максимальное давление в активных или пассивных объектах и ограничения мощности ЭГПА КС.

Оптимальная конфигурация активных объектов КС моделируется в виде программы \mathbf{P} оптимизации следующего вида:

$$\begin{cases} \min_{\{x,s,e\}} f(x,s) = G(x) + \alpha \cdot \|S\|, \\ \mathbf{P} = C_I(x) + \beta \cdot e \leq s_I, \\ C_E(x) = s_E, \end{cases} \quad (2)$$

где $x \in R^n$, $s_I \in R^p$, $s_E \in R^q$, $e \in \{0,1\}$, x - совокупность переменных расхода газа Q и давления P , $G(x)$ - целевая функция, представляющая собой экономический критерий оптимизации, $C_I(x)$ - совокупность p линейных и нелинейных ограничений неравенства для активных объектов, β - вектор, коэффициенты которого равны нулю или максимальным значениям ограничений, e - вектор двоичных переменных, $C_E(x)$ - совокупность q линейных и нелинейных ограничений равенства, s - переменная отклонения, ненулевое значение которой обозначает нарушение ограничения, α - коэффициент, соответствующий допустимой степени нарушения ограничений.

В результате при заданном расходе газа 8 (рис. 2) давление 19 и температура 18 газа на выходе КС устанавливаются и стабилизируются на заданном оптимальном по энергопотреблению КС уровне. Данный способ магистрального транспорта газа при этом представляет собой надежную и долговечную в эксплуатации систему, ограничивающую превышение давления и температуры газа выше и ниже предельных значений.

Использование предлагаемого способа магистрального транспорта газа обеспечивает по сравнению с существующими способами автоматическую стабилизацию давления и температуры газа на выходе КС, и тем самым практически полностью устраняет недопустимые деформации и напряженные состояния трубопровода и возможные разрушения его противокоррозионной изоляции, в результате чего повышается эксплуатационная надежность, а также оптимизируются интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа магистральных газопроводов.

Для реализации данной энергоэффективной технологической схемы система электропривода ЭГПА должна быть частотно-регулируемой и инвариантной ко всем параметрам возмущениям детерминированного и стохастического характера [11-15], т.е. комбинированной САР (по отклонению и возмущению) с отрицательной обратной связью по главному технологическому параметру – давлению газа на выходе компрессорной станции. Такая система, разработанная при участии автора [16], показана на рис. 3.

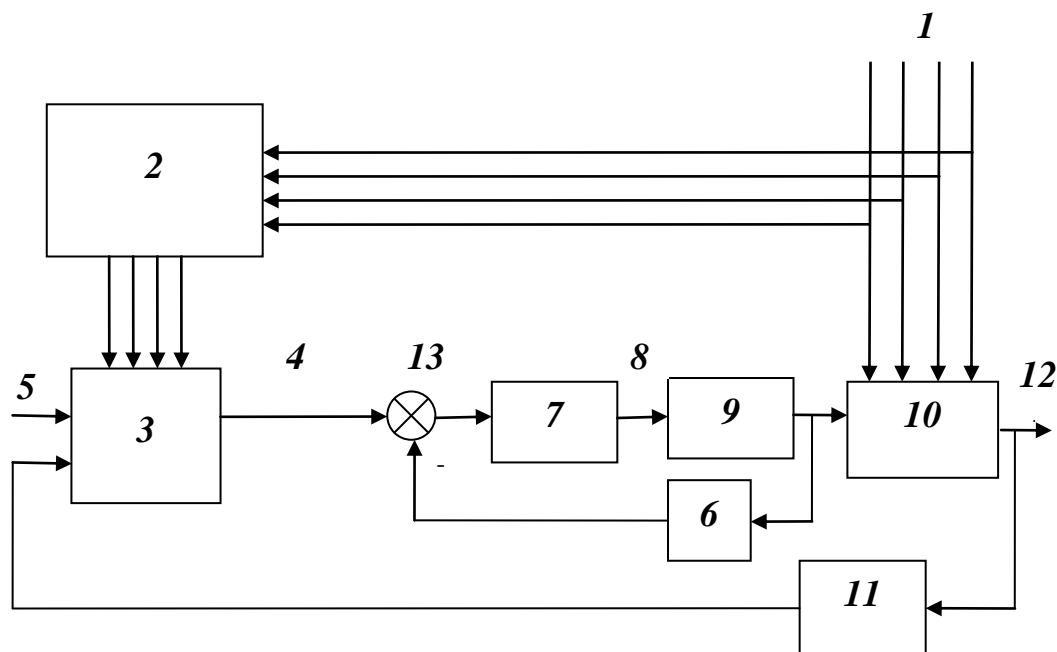


Рис. 3. Структура инвариантной системы частотно-регулируемого ЭГПА

Объектом управления для электропривода 9 является газоперекачивающий агрегат 10 , на вход которого подводится газ. Повышение давления (компримирование) газа происходит за счет политропной работы компрессоров ГПА. Вращение газоперекачивающего агрегата 10 обеспечивает двигатель 9 с устройством изменения его частоты вращения (ПЧ) с законом

управления $U/f^2 = \text{const}$ (U, f – напряжение и частота питающего двигателя напряжения). На вход блока 3 расчета необходимой скорости вращения поступают сигналы о величине возмущающих воздействий с датчиков 2 измерения внешних воздействий 1 и сигнал задания давления 5, который корректируется с датчика давления 11. Динамические колебания скорости вращения электропривода ГПА 9 поступают на датчик скорости вращения 6 и далее на второй вход сумматора 13. Сигнал 4 с выхода блока 3 расчета необходимой скорости вращения электропривода ГПА поступает на сумматор 13, где корректируется сигналом с датчика скорости 6. Сигнал с сумматора 13 поступает на ПИ-регулятор 7, на выходе которого формируется сигнал 8, пропорциональный требуемой скорости вращения электропривода 9. Газоперекачивающий агрегат 10, вращаемый электроприводом 9, создает требуемое давление газа на выходе компрессорной станции 12.

Данная комбинированная система, состоящая из САР по отклонению (давления газа) и САР по возмущению (стохастических возмущений), обеспечивает автоматизацию процесса компримирования газа до оптимального стабильного давления в условиях различных случайных воздействий средствами инвариантной системы управления частотно-регулируемого ЭГПА. При этом решается искомая задача повышения точности отработки требуемой величины давления газа на выходе КС и стабилизации процесса компримирования газа средствами ЭГПА. Этому способствует строгое соблюдение параметров основного технологического процесса компримирования газа, что позволяет повысить производительность и надежность газопровода в условиях действия возмущающих воздействий [17-22].

При необходимости перевода ЭГПА в турбодетандерный режим работы необходимо обеспечивать на выходе ПЧ параметры напряжения с помощью введения внешней отрицательной обратной связи по выходному напряжению, как это выполнено в работах [22, 23].

Библиографический список

1. **Пужайло, А.Ф.** Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло [и др.]; под ред. О. В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 560 с.
2. **Крюков, О.В.** Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Идентификация систем и задачи управления, SICPRO'12: труды IX Международной конференции. – 2012. – С. 222–236.
3. **Крюков, О.В.** Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов // Приводная техника. – 2010. – № 5. – С. 2–11.
4. **Крюков, О.В.** Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 53–58.
5. **Захаров, П.А.** Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98–103.
6. **Захаров, П.А.** Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.
7. **Серебряков, А.В.** Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.В. Серебряков, О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Управление в технических, эргатических, орг. и сетевых системах: материалы конференции; под ред. С.Н. Васильева. – 2012. – С. 467–469.
8. Пат. на изобретение №2502914 МПК F17D1/02. Способ магистрального транспорта газа.– АО «Гипрогазцентр» / Пужайло А.Ф., Крюков О.В., Репин Д.Г. – Оpubл. 27.12.2013, БИ №36.
9. **Крюков, О.В.** Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15: сб. трудов. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. – 2015. – С. 368–386.
10. **Крюков, О.В.** Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // Труды VIII Между-

- народной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014; отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 409–414.
11. **Крюков, О.В.** Диагностика электромеханической части энергетических установок / О.В.Крюков, А.В. Серебряков, А.Б. Васенин // Электромеханічні І енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3 (19). – С. 549–552.
 12. **Пужайло, А.Ф.** Энергосбережение а агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода / А.Ф. Пужайло, О.В. Крюков, И.Е. Рубцова // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 2 (50). – С. 98–106.
 13. **Крюков, О.В.** Экспериментальный стенд электромеханической части энергетической установки / О.В. Крюков, А.Б. Васенин, А.В. Серебряков // Приводная техника. – 2012. – №4. – С. 2–13.
 14. **Киянов, Н.В.** Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градирнями / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, Д.Н. Прибытков // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 62–67.
 15. **Крюков, О.В.** Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов / О.В. Крюков, А.В.Горбатушков, С.Е. Степанов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды IV Всероссийской научно-практической конференции; под общ. ред. В.Ю. Островлянчика. Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.
 16. **Milov, V.R.** Intellectual management decision support in gas industry / V.R.Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095–1101.
 17. **Крюков, О.В.** Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.
 18. **Крюков, О.В.** Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» / О.В. Крюков, С.Е. Степанов // Газовая промышленность. – 2014. – № 8 (710). – С. 50–56.
 19. **Бабичев, С.А.** Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов / С.А. Бабичев, Е.В. Бычков, О.В. Крюков // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 30–36.
 20. **Крюков, О.В.** Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах; отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 157–163.
 21. **Babichev, S.A.** Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units / S.A. Babichev, P.A.Zakharov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – №. 6. – С. 175–180.
 22. **Крюков, О.В.** Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.
 23. **Kryukov, O.V.** Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Т. 84. – С. 135–138.

*Дата поступления
в редакцию 08.11.2016*

O.V. Kryukov

POWER OPTIMIZATION OF TRANSPORT STREAMS OF GAS BY MEANS OF ELECTRIC DRIVING UNITS

JSC “Giprogazcentr”, Nizhny Novgorod

Summary: The developed principles of energy efficient transport of natural gas on the main gas pipelines proceeding from normative and technical documents are considered. The scheme and modern technical means of frequency and adjustable electric drives and control algorithms of technological installations of compressor stations of the main transport of gas is submitted.

Key words: Energy efficiency, main gas pipelines, electric driving compressor stations, optimum control of technological units.