

---

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

---

УДК 62-52-83:656.56

**Алексей Руфимович Колганов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: alex\_37@list.ru

**Олег Викторович Крюков**

ООО «ТСН-электро», доктор технических наук, доцент, заместитель директора по науке, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

**Игорь Васильевич Гуляев**

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», доктор технических наук, профессор, руководитель НОЦ «Энергоэффективные двигатели двойного питания», Россия, Саранск, телефон (8342) 476669, e-mail: ivgulyaev@mail.ru

### Оптимизация управления магистральными потоками газа с помощью автоматизированных электроприводов

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Главными источниками нештатных ситуаций и внезапных аварий на компрессорных станциях магистральных газопроводов являются неисправности подшипников и обмоток статоров приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов. Это связано с тем, что все электрические машины на компрессорных станциях работают при стохастических возмущениях в неоптимальных с точки зрения показателей энергоэффективности и надежности режимах, значительно влияя при этом на общий ресурс электрооборудования. В этой связи создание комплексной системы оптимизации и адаптации работы всех автоматизированных электроприводов представляется актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Методологической основой принципов управления является аппарат теории планирования эксперимента и инвариантных систем с использованием стратегий малолюдных технологий и интеллектуальных систем.

**Результаты.** Предложен концептуальный подход к реализации оптимального управления основными агрегатами компрессорной станции на базе автоматизированных электроприводов, позволяющий повысить надежность и энергоэффективность магистральных газопроводов и обеспечивающий стабилизацию параметров перекачиваемого газа на оптимальном уровне.

**Выводы.** Применение комбинированной системы управления автоматизированными электроприводами агрегатов компрессорной станции позволяет учитывать и компенсировать все стохастические возмущения и стабилизировать работу магистрального газопровода на теоретически обоснованном оптимальном по энергетическим критериям уровне.

**Ключевые слова:** газоперекачивающий агрегат, автоматизированный электропривод, преобразователь частоты, инвариантная система, аппарат воздушного охлаждения газа

### Alexey Rufimovich Kolganov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electric Drive and Industrial Installations Automation Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-09, e-mail: alex\_37@list.ru

### Oleg Viktorovich Kryukov

TCN-Electro LLC, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor, Deputy Director for Science, Russia, Nizhny Novgorod, telephone (831) 285-888-9, e-mail: o.v.kryukov@mail.ru

### Igor Vasilievich Gulyaev

National Research Mordovian State University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of the Scientific and Educational Center "Energy-Efficient Dual-Fuel Engines", Russia, Saransk, telephone (8342) 476669, e-mail: ivgulyaev@mail.ru

## Control optimization of gas pipelines using automated electric drives

### Abstract

**Background** The main reasons of abnormal situations and sudden breakdown at compressor stations of main gas pipelines are malfunctions of bearings and stator windings of the drive electric motors of gas pumping units. This is due to the fact that all electric machines at compressor stations operate under stochastic disturbances in suboptimal modes in terms of energy efficiency and reliability, significantly affecting the overall life of electrical equipment. In this regard, the development of a comprehensive system to enhance and adapt the operation of all automated electric drives is an urgent task.

**Materials and methods.** The methodological basis of the control principles is the theory of experimental planning and invariant systems using strategies of minimal operation and intelligent systems.

**Results.** A conceptual approach to the implementation of optimal control of the main units of a compressor station based on automated electric drives is proposed. It makes possible to increase the reliability and energy efficiency of main gas pipelines and ensure stabilization of the parameters of the pumped gas at an optimal level.

**Conclusions.** The use of a combined control system for automated electric drives of compressor station units makes it possible to take into account and compensate all stochastic disturbances and stabilize the operation of the main gas pipeline at a theoretically justified optimal level according to energy criteria.

**Key words:** gas pumping unit, automated electric drive, frequency converter, invariant system, gas air cooling unit

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2026.2.082-088

**Введение.** Энергосберегающие принципы эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) основаны на реализации оптимальных режимов работы, связанных с максимальным использованием их пропускной способности (газоперекачки), при минимальных энергозатратах на компримирование (повышение давления), охлаждение и транспортировку [1–3]. В значительной степени эти режимы определяются работой компрессорных станций (КС) и характеризуются неравномерностью подачи и потребления газа в течение года, месяца, суток, несмотря на наличие газохранилищ, а также научно обоснованных нормативных методик оптимизации [4–8].

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 гладкостной структурой внутреннего покрытия трубы [7–10].

Проведенные исследования по структуре внутренних полостей газопроводов свидетельствуют о крайне негативном состоянии большинства участков МГ, которые находятся в эксплуатации более 40 лет [11–15]. А это, к сожалению, их нормативный ресурс работы, не позволяющий

гарантировать надежную и устойчивую эксплуатацию линейной части и КС МГ.

Вместе с тем технические возможности трубопроводного транспорта природного газа далеко не исчерпаны в рамках реализации новых стратегий энергоэффективного и бережного подхода к реализации оптимальных стратегий управления [16–18], реализации интеллектуальных и малолюдных технологий [19–21]. Новые каскадные преобразователи частоты и мультипроцессорные системы интеллектуального управления с активно-адаптивными алгоритмами уже сегодня позволяют выстроить совершенные системы для основных технологических агрегатов КС (рис. 1) [7, 13, 22, 23], включая герметичные и моноблочные электродвигательные газоперекачивающие агрегаты (ЭГПА) и многополюсные низкооборотные приводы вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО) [2, 22, 24].

Только системный подход к учету функциональных возможностей всей цепи технологического процесса транспорта газа от линейных производственных участков до компримирования и охлаждения газа на КС в нормативном диапазоне параметров с использованием инновационных законов управления позволит обеспечить долгую и безаварийную работу газотранспортной системы.



Рис. 1. Общий вид современных герметичных мотор-компрессорных технологических установок для КС МГ

**Функционал электропривода.** Согласно действующей нормативно-технической документации и, в частности, проектным нормам 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)» [2, 19]. Однако существующие средства автоматики в основном работают независимо от самих механизмов, что не позволяет контролировать их оптимальные параметры [14, 15]. Однако при этом функционал частотно-регулируемого электропривода по активно-адаптивному отслеживанию стохастических воздействий не используется [6, 17, 25].

Предлагается использовать идею патента на изобретение [8], в котором теоретически

обоснован принцип достижения максимальных энергетических показателей дальнего транспорта природного газа по МГ независимо от режимов работы (рис. 2). Главные параметры перекачиваемого газа (температура и давление) контролируются датчиками давления и температуры, измеряющими реальные значения на выходе КС, и автоматически стабилизируются на оптимальном уровне [1, 19].

Проведенные натурные испытания и результаты компьютерного моделирования работы системы (рис. 2) показали, что все технологические параметры транспортируемого газа автоматически устанавливаются на уровне оптимальных значений выбранного режима работы магистрального газопровода вне зависимости от интенсивности воздействия стохастических возмущений технологического или природного характера в месте установки компрессорного цеха.

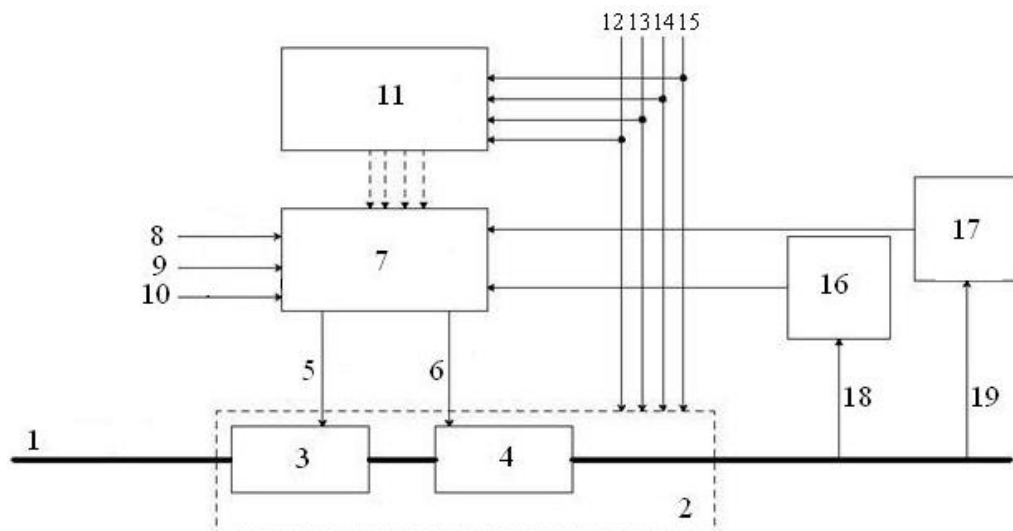


Рис. 2. Функциональная схема взаимодействия автоматизированных электроприводов технологических агрегатов в рамках компрессорного цеха: 1 – магистральный газопровод; 2 – компрессорный цех; 3 – компрессорная установка с приводным электродвигателем; 4 – установка воздушного охлаждения газа с приводными вентиляторами; 5 и 6 – угловые скорости вращения электроприводов компрессора и вентилятора; 7 – концентратор расчетных значений для управления; 8, 9 и 10 – величины исходных параметров подачи, температуры и давления газа; 11 – блок значений стохастических возмущений; 12, 13, 14 и 15 – измеренные величины влажности воздуха  $\beta$ , его температуры  $\Theta$ , перепадов температур  $\Delta t$  или давлений газа в КС  $\Delta p$  и производительности цеха  $Q$ ; 16, 17, 18 и 19 – измерители давления и температуры, а также их фактические выходные значения со станции

При пуско-наладочных работах на объекте конкретной компрессорной станции следует установить оптимальные интервальные значения дискретных переменных алгоритмов управления автоматизированными электроприводами для достижения минимальных колебаний в динамике функционала:

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

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – весовые коэффициенты основных факторных переменных матрицы;  $\mathbf{R}$  – вектор, отвечающий за установку наилучшего параметра давления в реперных текущих точках газопровода и у потребителей;  $\mathbf{W}$  – вектор, предназначенный для контроля за энерго- и электропотреблением на этапах компримирования и охлаждения газа на соответствующих агрегатах для стабилизации оптимальных параметров у потребителя;  $\mathbf{C}$  – вектор, выполняющий роль оценщика уровня энергоэффективности товарно-транспортных затрат в различных точках магистрального газопровода (линейные производственные участки, центробежные нагнетатели и установки охлаждения газа на КС).

Для получения алгоритма оптимизации работы основных агрегатов компрессорного цеха необходимо синтезировать управляющие законы для автоматизированных электроприводов на основе системы следующих неравенств:

$$\min_{\{x,s,e\}} f(x,s) = G(x) + \alpha \cdot \|S\|,$$

$$C_i(x) + \beta \cdot e \leq s_i,$$

$$C_E(x) = s_E,$$

где  $x \in R^n$ ;  $s_i \in R^p$ ;  $s_E \in R^q$ ;  $e \in \{0,1\}$ ;  $x$  – сумма переменных расхода  $Q$  и давления газа  $P$ ;  $G(x)$  – экономический критерий оптимизации;  $C_i(x)$  – со-

вокупность  $p$  линейных и нелинейных ограничений неравенства для активных объектов;  $\beta$  – факторный коэффициент, который равен нулю или предельным значениям;  $e$  – параметр двоичных данных;  $C_E(x)$  – сумма  $q$  линейных и нелинейных значений интервала равенства;  $s$  – переменная для фиксации нарушений ограничений;  $\alpha$  – допустимая степень нарушения ограничений.

Таким образом, при заданном расходе газа  $8$  (рис. 2) давление  $19$  и температура газа  $18$  в газопроводе стабилизируются на заданном оптимальном по энергопотреблению уровне. Предложенная технология транспорта газа представляет собой стабильную в эксплуатации систему с ограничением высокого давления и температуры газа.

Использование частотно-регулируемых электроприводов в агрегатах КС обеспечивает уникальную функциональную возможность автоматической стабилизации давления и температуры газа, в сочетании с минимизацией интегральных энергозатрат на работу компрессоров и вентиляторов АВО магистральных газопроводов.

Опыт реализации системы на 7 компрессорных станциях МГ показал, что заявленные свойства автоматизированных электроприводов могут быть реализованы только в инвариантных (или комбинированных) САУ [7, 9, 21]. Такая система, разработанная при участии авторов [16], показана на рис. 3 на примере управления автоматизированным электроприводом 9 ГПА 10, на вход которого подается газ. Повышение давления (компримирование) газа происходит за счет политропной работы компрессоров ГПА. Вращение газоперекачивающего агрегата 10 обеспечивает двигатель 9 с преобразователем частоты (ПЧ) при соотношении  $U/f 2 = \text{const}$  ( $U, f$  – напряжение и частота питающего двигателя напряжения).

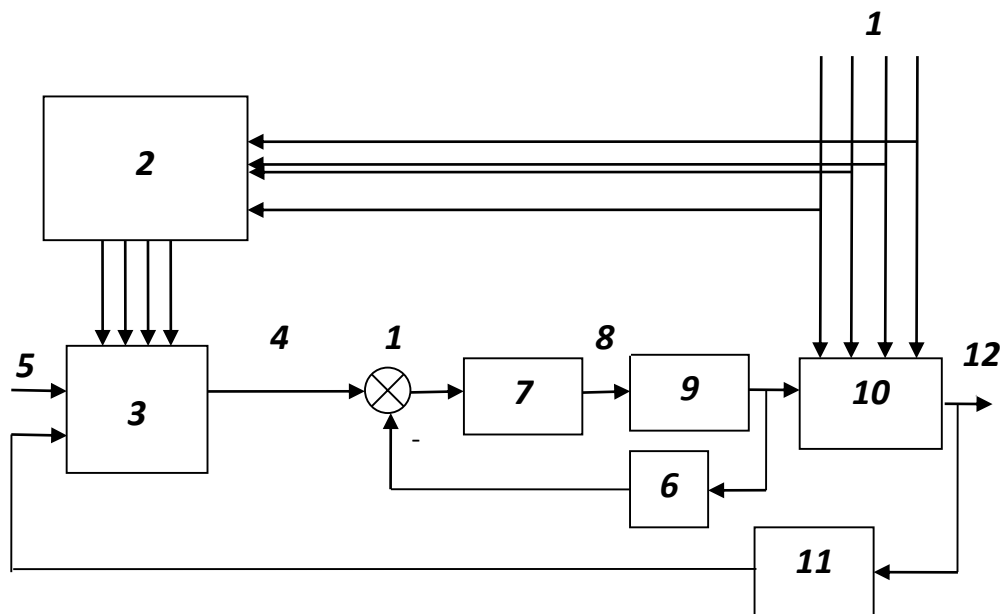


Рис. 3. Система комбинированного управления автоматизированным электроприводом с компенсацией стохастических возмущений. Структура инвариантной системы частотно-регулируемого ЭГПА

В результате работы инвариантной (комбинированной) САУ АЭП происходит стабилизация давления или температуры газа на уровне их оптимальных заданных значений. Это происходит в рамках минимизации электропотребления АЭП и повышения точности отработки выработанных задающих значений параметров. В данной схеме возможна реализация турбодетандерного режима работы компрессорных установок [22, 23]. Данная комбинированная система, состоящая из САР по отклонению давления газа и САР по возмущению стохастического характера, обеспечивает автоматизацию процесса компримирования газа до оптимального стабильного давления в условиях различных случайных воздействий средствами инвариантной системы управления частотно-регулируемого ЭГПА.

**Выводы.** Благодаря представленному и научно обоснованному принципу работы основных технологических агрегатов электроприводной компрессорной станции появляется возможность активно-адаптивного управления компрессорами и вентиляторами в целях повышения надежности и энергоэффективности магистральных газопроводов.

Автоматизация частотно-регулируемых электроприводов на базе инвариантных систем обеспечивает учет и компенсацию всех технологических и климатических возмущений, действующих в условиях конкретных компрессорных цехов.

Повышение надежности и превентивного прогнозирования работы электрооборудования с помощью встроенных нейро-нечетких алгоритмов дополнительно увеличивает ресурс и надежность магистральных газопроводов.

#### Список литературы

1. **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. – С. 944–952.
2. **Крюков О.В.** Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // *Интеллектуальные системы. Труды XI Международного симпозиума / под ред. К.А. Пупкова*. – М.: РУДН, 2014. – С. 458–463.
3. **Васенин А.Б., Серебряков А.В.** Энергоэффективные системы электроснабжения электроприводов нефтегазопроводов // *Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*. – Пермь, 2016. – С. 380–384.
4. **Васенин А.Б., Серебряков А.В.** Алгоритмы управления электромеханическими системами магистрального транспорта газа // *Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Т. 2 / отв. за выпуск И.В. Гуляев*. – Саранск, 2014. – С. 404–409.
5. **Рубцова И.Е., Степанов С.Е.** Нейро-нечеткие модели управления синхронными машинами большой мощности // *Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «Управление и информационные технологии» УИТ-2010*. – СПб., 2010. – С.160–162.
6. **Мещеряков В.Н., Крюков О.В.** Системы электропривода переменного тока с релейными и нелинейными корректирующими устройствами. Ч. 2 // *Библиотечка электротехника*. – 2018. – № 12(240). – С. 1–76.
7. **Воронков В.И., Рубцова И.Е.** Основные экологические направления и задачи энергосбережения при проектировании объектов ОАО «Газпром» // *Газовая промышленность*. – 2013. – № 7(693). – С. 74–78.
8. **Пат.** на изобретение № 2502914 МПК F17D1/02. Способ магистрального транспорта газа / А.Ф. Пужайло, Д.Г. Репин; опубл. 27.12.2013, БИ № 36.
9. **Крюков О.В.** Синтез и анализ электроприводных агрегатов компрессорных станций при стохастических возмущениях // *Электротехника*. – 2013. – № 3. – С. 22–27.
10. **Васенин А.Б.** Функциональные возможности энергетических установок при питании удаленных объектов // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. – 2014. – № 2. – С. 50–56.
11. **Киянов Н.В.** Решение задач промышленной экологии средствами электрооборудования и АСУТП // *Автоматизация в промышленности*. – 2009. – № 4. – С. 29–34.
12. **Захаров П.А., Киянов Н.В.** Встроенная система диагностирования и прогнозирования ЭГПА // *Контроль. Диагностика*. – 2008. – № 11. – С. 43–49.
13. **Крюков О.В.** Комплексный анализ условий эксплуатации ЭГПА // *Компрессорная техника и пневматика*. – 2013. – № 4. – С. 14–19.
14. **Степанов С.Е.** Модернизация систем управления ЭГПА в условиях действующих компрессорных станций // *Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. М.А. Щербакова*. – Пенза, 2013. – С. 29–32.
15. **Серебряков А.В.** Универсальная система мониторинга электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2016. – № 4(546). – С. 74–81.
16. **Пат.** на полезную модель № 145058. Электропривод газоперекачивающего агрегата / А.С. Белов, Е.В. Бычков, С.Е. Степанов; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25.
17. **Крюков О.В.** Оптимальное управление технологическим процессом магистрального транспорта газа // *Сб. трудов XII Всерос. совещания по проблемам управления ВСПУ-2014 / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*. – М., 2014. – С. 4692–4613.
18. **Энергосбережение** и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, В.И. Воронков и др.; под ред. О.В. Крюкова. – Н.Новгород: Вектор ТиС, 2010.
19. **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. – С. 621–627.
20. **Серебряков А.В.** Активно-адаптивные алгоритмы управления и мониторинга автономными энергетическими комплексами // *Пром-Инжиниринг. Труды II Междунар. науч.-техн. конф.* – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – С. 286–290.
21. **Kryukov O.V.** Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units // *Вестник Южно-Уральского государственного*

университета. Серия: Энергетика. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 56–62.

22. Степанов С.Е., Бычков Е.В. Опыт применения частотно-регулируемого привода вентиляторов АВО газа // Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – Пермь, 2016. – С. 428–432.

23. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Гуляев И.В. Энергетический менеджмент мониторинга энергоэффективности объектов ТЭК // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2022. – № 4(153). – С. 32–43.

24. Васенин А.Б. Энергоэффективные и экологичные установки воздушного охлаждения // ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017. Труды научного конгресса XIX Междунар. науч.-пром. форума. – Н.Новгород: НГАСУ, 2017. – С. 93–96.

25. Захаров П.А. Принципы инвариантного управления электроприводами ГТС при случайных возмущениях // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 98–103.

### References

1. Kadin, S.N., Kazachenko, A.P., Reunov, A.V. Questions related to the development of metro-logical assurance in the design of Gazprom facilities. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 8, pp. 944–952.

2. Kryukov, O.V. Strategii invariantnykh elektroprivodov gazotransportnykh system [Strategies of invariant electric drives of gas transportation systems]. *Trudy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma «Intellektual'nye sistemy»* [Proceedings of the XI International symposium “Intelligent Systems”]. Moscow: RUDN, 2014, pp. 458–463.

3. Vasenin, A.B., Serebryakov, A.V. Energoeffektivnye sistemy elektrosnabzheniya elektroprivodov neftegazoprovodov [Energy-efficient power supply systems for electric drives of oil and gas pipelines]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016* [Proceedings of IX International (XX All-Russian) conference on automated electric drives AEP-2016]. Perm', 2016, pp. 380–384.

4. Vasenin, A.B., Serebryakov, A.V. Algoritmy upravleniya elektromekhanicheskimi sistemami magistral'nogo transporta gaza [Algorithms to control electromechanical systems of gas main transportation]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014: v 2 t., t. 2* [Proceedings of VIII International (XIX All-Russian) conference on automated electric drives AEP-2014. In 2 vols., vol. 2]. Saransk, 2014, pp. 404–409.

5. Rubtsova, I.E., Stepanov, S.E. Neyro-nechetkie modeli upravleniya sinkhronnymi mashinami bol'shoy moshchnosti [Neuro-fuzzy control models for high-power synchronous machines]. *Materialiy VI MNTK «Upravlenie i informatsionnye tekhnologii» UIT-2010* [Proceedings of VI International scientific and technical conference “Control and Information Technologies” UIT-2010]. Saint-Petersburg, 2010, pp.160–162.

6. Meshcheryakov, V.N., Kryukov, O.V. Sistemy elektroprivoda peremennogo toka s releynymi i nelineynymi korrrektiruyushchimi ustroystvami. Ch. 2 [AC electric drive systems with relay and nonlinear correcting devices. Part 2]. *Bibliotekha elektrotehnika*, 2018, no. 12(240), pp. 1–76.

7. Voronkov, V.I., Rubtsova, I.E. Osnovnye ekologicheskie napravleniya i zadachi energosberezheniya pri proektirovani ob'ektov OAO «Gazprom» [The main environmental directions and objectives of energy

saving when designing Gazprom OJSC facilities]. *Gazovaya promishlennost'*, 2013, no. 7(693), pp. 74–78.

8. Puzhaylo, A.F., Repin, D.G. *Sposob magistral'nogo transporta gaza* [Method of main gas transportation]. Patent, no. 2502914, 2013.

9. Kryukov, O.V. Sintez i analiz elektroprivodnykh agregatov kompressornykh stantsiy pri stokhasticheskikh vozmushcheniyakh [Synthesis and analysis of electric drive units of compressor stations under stochastic disturbances]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 3, pp. 22–27.

10. Vasenin, A.B. Funktsional'nye vozmozhnosti energeticheskikh ustanovok pri pitanii udalennykh ob'ektov [Functional capabilities of power plants when supplying power to remote objects]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2014, no. 2, pp. 50–56.

11. Kiyarov, N.V. Reshenie zadach promyshlennoy ekologii sredstvami elektrooborudovaniya i ASUTP [Solving industrial ecology problems using electrical equipment and automated process control systems]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2009, no. 4, pp. 29–34.

12. Zakharov, P.A., Kiyarov, N.V. Vstroennaya sistema diagnostirovaniya i prognozirovaniya EGPA [Built-in diagnostic and forecasting system of EGPA]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2008, no. 11, pp. 43–49.

13. Kryukov, O.V. Kompleksnyy analiz usloviy ekspluatatsii EGPA [Comprehensive analysis of the operating conditions of the EGPA]. *Kompressorная техника i pnevmatika*, 2013, no. 4, pp. 14–19.

14. Stepanov, S.E. Modernizatsiya sistem upravleniya EGPA v usloviyakh deystvuyushchikh kompressornykh stantsiy [Modernization of EGPA control systems in the conditions of operating compressor stations]. *Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh»* [Proceedings of International scientific and technical conference “Problems of automation and control in technical systems”]. Penza, 2013, pp. 29–32.

15. Serebryakov, A.V. Universal'naya sistema monitoringa elektrodvigatelay gazoperekachivayushchikh agregatov [Universal monitoring system for electric motors of gas pumping units]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2016, no. 4(546), pp. 74–81.

16. Belov, A.S., Bychkov, E.V., Stepanov, S.E. *Elektroprivod gazoperekachivayushchego agregata* [Electric drive of gas pumping unit]. Patent, no. 145058, 2014.

17. Kryukov, O.V. Optimal'noe upravlenie tekhnologicheskimi protsessom magistral'nogo transporta gaza [Optimal control of the technological process of main gas transportation]. *Sbornik trudov XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2014* [Proceedings of the XII All-Russian conference on management problems of VSPU-2014]. Moscow, 2014, pp. 4692–4613.

18. Puzhaylo, A.F., Spiridovich, E.A., Voronkov, V.I. *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornykh stantsiy* [Energy saving and automation of electrical equipment at compressor stations]. N.Novgorod: Vektor TiS, 2010.

19. Kiyarov, 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, pp. 621–627.

20. Serebryakov, A.V. Aktivno-adaptivnye algoritmy upravleniya i monitoringa avtonomnymi energeticheskimi kompleksami [Active-adaptive algorithms to control and

monitor autonomous energy systems]. *Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Prom-Inzhiniring»* [Proceedings of the II International scientific and technical conference "Prom-Engineering"]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2016, pp. 286–290.

21. Kryukov, O.V. Scientific background for the development of intelligent electric drives for oil and gas process units. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 56–62.

22. Stepanov, S.E., Bychkov, E.V. Opyt primeniya chastotno-reguliruemogo privoda ventilyatorov AVO gaza [Experience of using a frequency-controlled drive for gas air handling unit fans]. *Trudy IX Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016* [Proceedings of IX International (XX All-Russian) conference on automated electric drives AEP-2016]. Perm', 2016, pp. 428–432.

23. Vasenin, A.B., Stepanov, S.E., Gulyaev, I.V. Energeticheskiy menedzhment monitoringa energoeffektivnosti ob"ektov TEK [Energy management and monitoring of energy efficiency of fuel and energy complex facilities]. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 2022, no. 4(153), pp. 32–43.

24. Vasenin, A.B. Energoeffektivnye i ekologicheskiye ustanovki vozdušnogo okhlazhdeniya [Energy-efficient and environmentally friendly air-cooled units]. *Trudy nauchnogo kongressa XIX Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma VELIKIE REKI' 2017* [Proceedings of the Scientific Congress of the XIX International scientific and industrial forum 'GREAT RIVERS' 2017]. N.Novgorod: NGASU, 2017, pp. 93–96.

25. Zakharov, P.A. Printsipy invariantnogo upravleniya elektroprivodami GTS pri sluchaynykh vozmushcheniyakh [Principles of invariant control of electric drives of hydroelectric power plants under random disturbances]. *Vestnik IGEU*, 2008, issue 2, pp. 98–103.