DOI: 10.17117/na.2015.01.126

Поступило в редакцию: 14.01.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.01.126.pdf>**Крюков О.В., Хлынин А.С.****Принципы инвариантных систем автоматического управления электроприводами турбокомпрессоров****Kryukov O.V., Serebryakov A.V.****The principles of invariant systems of automatic control of electric drives of turbo compressors**

Рассмотрены принципы использования энергоэффективных электроприводов турбокомпрессоров. Предложены методы синтеза инвариантных систем для объектов газопроводов
Ключевые слова: электропривод, турбокомпрессор, инвариантная система, регрессионные алгоритмы

The considered the principles of use of power efficient electric drives of turbo-compressors. The methods of synthesis of invariant systems for the facilities of gas pipelines are offered
Key words: electric drive, turbo-compressor, invariant system, regression algorithms

Крюков Олег Викторович

Кандидат технических наук, доцент, главный специалист
Гипрогазцентр
г. Нижний Новгород, ГСП-926, ул. Алексеевская, 26

Kryukov Oleg Viktorovich

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Main Expert
Giprogazcenter
Nizhny Novgorod, GSP-926, Alekseevskaya st., 26

Хлынин Александр Сергеевич

Инженер-проектировщик
Гипрогазцентр
г. Нижний Новгород, ГСП-926, ул. Алексеевская, 26

Khlynin Aleksander Sergeevich

Engineer
Giprogazcenter
Nizhny Novgorod, GSP-926, Alekseevskaya st., 26

Энергоэффективная и надежная работа газотранспортной системы (ГТС) России в условиях сурового и резкоконтинентального климата зависит от строгого соблюдения системных оптимальных технологических параметров работы каждого локального объекта компрессорных станций (КС) [1-4]. Это в значительной степени определяется совершенством более 4 тыс. газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [5-13] и 6 тыс. аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа [14-19], а также многочисленных вспомогательных систем водоснабжения, водоотведения и климатики помещений КС [20-30], которые в совокупности являются основными потребителями электроэнергии при транспорте газа по магистральным газопроводам (МГ).

Анализ режимов и особенностей функционирования электроприводных ГПА, АВО и прочих механизмов с вентиляторной нагрузкой в реальных условиях показал, что рациональное применение автоматизированного частотно-регулируемого электропривода (АЭП) позволяет обеспечить высокие показате-

тели производительности транспорта газа, энергосбережения, повысить надёжность, долговечность работы оборудования и удобство обслуживания с поста АСУ КС при оптимизации алгоритмов функционирования агрегатов на основе теории планирования эксперимента и ее приложений [31-34].

Общая методология оптимизации локальных АЭП КС

В практике АЭП большинство агрегатов и процессов функционирует в условиях, при которых момент нагрузки, скорость и многие технологические параметры не остаются постоянными, как принимается упрощенно в простейших локальных приводах, а значительно изменяются во времени. Это обусловлено как факторами технологического характера, так и иными внешними воздействиями, которые носят случайный характер.

В первом случае (рис. 1) АЭП, непосредственно с объектом воспринимая возмущения детерминированного или стохастического характера, должен обрабатывать все изменения кинетической энергии и нагрузки в соответствии с законом управления [1,20,31]. Во втором (рис. 2) – сам АЭП не подвержен возмущениям, но с целью поддержания выходных характеристик на оптимальном уровне все внешние воздействия на объект должны автоматически корректировать управляющие воздействия на него в рамках комбинированных САР [2-4].

Рис. 1. АЭП с возмущениями 1-го рода. Рис.2. АЭП с возмущениями 2-го рода

Основными причинами стохастического графика нагрузки является влияние 4 групп случайных факторов, среди которых неоднородность параметров газа, профиль трассы, люфты в кинематике, изменения параметров работы агрегатов. При этом коэффициент вариации случайного нагружения АЭП велик $0,4 \div 0,9$; а энергетический частотный спектр в диапазоне НЧ $0,01 \div 4$ Гц.

Совокупность случайных факторов, действующих на рабочие органы механизмов, определяет не только случайный характер нагрузки, потребляемой мощности и скорости АЭП, но и его КПД, коэффициент мощности, продолжительность включения и частоту включения в час. Так как случайный процесс нагружения не может быть достоверно описан традиционной детерминированной диаграммой, для адекватного расчета параметров АЭП используются статистические методы планирования эксперимента.

Исследования аппаратом теории вероятности показали [20], что нагружение АЭП распределено по закону Райса, плотность которого определяется:

$$W(V) = \begin{cases} 0, \text{ при } V < 0, \\ V \cdot e^{-\frac{-(V^2+q^2)}{2}} \cdot I_0[V \cdot q], \text{ при } V > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $V = X/\sigma[x]$ – некоторая относительная величина, характеризующая функцию огибающей $X(t)$; $q=z/\sigma[x]$ – отношение сигнала z к шуму $\sigma[x]$; $I_0[Vq]$ – функция Бесселя нулевого порядка. Частными случаями закона Райса является распределение Релея при $q=2$ и Гаусса при $q=5$. Для приближенных задач оценки случайной нагрузки АЭП целесообразно использовать таблицы распределений.

При отсутствии непосредственного воздействия совокупности стохастических возмущений на электрические и механические органы электропривода (системы 2-го рода) наиболее целесообразным является организация инвариантной системы управления по типу комбинированной САР, адекватно учитывающей все частные влияния возмущений на объект. Для этого все влияющие возмущения после формализации вводятся в закон управления АЭП (пунктирная линия на рис. 2), обеспечивая адекватность задания момента и скорости текущему состоянию объекта.

Особенности агрегатов КС со стохастическими возмущениями

Наиболее характерными примерами агрегатов КС со случайными возмущениями 2-го рода являются локальные АЭП, входящие в АСУ КС [2,4]:

- нагнетатели газоперекачивающих агрегатов (ГПА);
- аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа после его компримирования;
- АВО масла всех основных систем и агрегатов КС;
- насосы и вентиляторы вспомогательных систем, параметры которых подвержены климатическим воздействиям;
- системы воздушного отопления промышленных и административных зданий КС с регулированием подачи теплоносителя через калориферы.

Общими особенностями для рассматриваемых агрегатов со случайными возмущениями 2-го рода являются:

- непрерывность технологического процесса КС (суточная, сезонная, годовая), которая обуславливает работу АЭП в продолжительном режиме S1;
- стабильная работа при воздействии нескольких независимых друг от друга стохастических возмущений метео- и технологического характера;
- плавное регулирование скорости при нагрузке вентиляторного типа $M_{ст} \equiv \omega^2$ диктует выбор параметров АЭП исходя из наиболее напряженной точки;

необходимость стабилизации значений главного технологического параметра агрегатов КС на оптимальном уровне (давления или температуры газа) путем регулирования скорости вращения и момента АЭП;

– большие маховые массы агрегатов и мощностей приводных двигателей (до десятков мегаватт) обуславливают применение устройств мягкого пуска;

– необходимость периодической кратковременной работы на низких («ползучих») скоростях для проведения регламентных работ, в т.ч. в зимний период;

– большие постоянные времени теплотехнических процессов, на несколько порядков превосходящие электромеханические постоянные времени АЭП;

- энергосбережение при частотном регулировании скорости обусловлено снижением потребляемой мощности АЭП в кубе;
- повышенная надежность и живучесть работы достигается наличием встроенной системы мониторинга технического состояния АЭП и агрегатов;
- интеграция локальных АЭП в АСУ КС и оптимизация их работы по критериям качества выходных технологических параметров.

Анализ рассмотренных выше требований показывает, что все они, за исключением второго, могут быть реализованы на основе современных серийных преобразователей частоты (ПЧ) и типового электрооборудования АЭП. Однако реализация второго требования является определяющей и наиболее специфичной задачей, относя рассматриваемые АЭП к классу систем с возмущениями 2-го рода с применением для их формализации статистических методов. Поэтому искомые многопараметрические алгоритмы управления необходимо получить в виде нелинейных или линеаризованных регрессионных моделей с использованием матричных способов наименьших квадратов [2,3].

Алгоритмы управления газотранспортными объектами. Теоретическое обоснование

Для обработки экспериментальных данных можно использовать модель линейной регрессии в матричном виде

$$Y = X \cdot a + \zeta, \quad (3)$$

где Y – матрица выходных параметров системы (величины скорости вращения АЭП или технологических параметров); X – матрица входных воздействий (параметров задания и внешних возмущающих воздействий); a – параметры механизма преобразований в системе; ζ – матрица помех (неучтенных факторов).

На рис.3 приведена общая функциональная схема взаимодействия переменных реального объекта. При этом входные переменные $x(p)$ описывают условия функционирования и поэтому являются независимыми факторами-аргументами, предсказывающими (предикторными) и объясняющими поведение объекта.

Рис. 3. Общая схема взаимодействия при статистическом исследовании

Выходные переменные $y(n)$ характеризуют результат (эффективность) функционирования объекта и представляют собой зависимые (эндогенные) результирующие отклики. Неучтенные остаточные компоненты $\zeta(m)$ представляют собой случайные латентные (скрытые, не поддающиеся точному измерению) факторы, отражающие влияние второстепенных воздействий и случайных ошибок измерения. Тогда общая задача статистического исследования зависимостей (в терминах изучаемых показателей) формулируется следующим образом. По результатам n измерений

$$\{x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(p)}; y_i^{(1)}, y_i^{(2)}, \dots, y_i^{(n)}\}_{i=1,2,\dots,n} \quad (4)$$

исследуемых переменных в системе анализируемой совокупности, построить так называемую “векторно-значную функцию”:

$$f[x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}] = \begin{pmatrix} f^{(1)}[x^{(1)}, \dots, x^{(p)}] \\ f^{(2)}[x^{(1)}, \dots, x^{(p)}] \\ \dots \\ f^{(n)}[x^{(1)}, \dots, x^{(p)}] \end{pmatrix} \quad (5)$$

которая позволила бы наилучшим (в определенном смысле) образом восстановить значения результирующих (прогнозируемых) переменных $Y = [y(1), y(2), \dots, y(n)]^T$ по заданным значениям входных (объясняющих) переменных $X = [x(1), x(2), \dots, x(p)]^T$ (знак “Т” означает операцию транспонирования соответствующих матриц). При этом одновременно можно решить две прикладные задачи:

- прогноз (восстановление) неизвестных значений из реального диапазона регулирования индивидуальных $Y(X)$ или средних $Y_{\text{ср}}(X)$ значений по заданным значениям переменных. Это необходимо для оценки показателей АЭП (диапазон, точность регулирования, эффективность и окупаемость проекта);

- выявление причинно-следственных связей между X и Y , управление значениями Y путем регулирования, что необходимо для реализации алгоритмов.

Линейная регрессионная модель (3) получается из (4) в результате обработки экспериментальной информации по методу наименьших квадратов [2], обеспечивающему высокую достоверность реального поведения системы.

Алгоритм при этом следующий. Допустим, что случайная величина y с последовательностью её значений $y_1, y_2, \dots, y_n$ зависит от некоторых технических параметров, характеризующихся признаками $x_1, x_2, \dots, x_m$. Для исследования зависимости $y=f(x)$ все признаки x_i регистрируются одновременно по информации с системы датчиков, а y – спустя некоторый интервал времени τ , составляющий 3–4 постоянных времени объекта. В результате этого можно получить уравнения регрессии:

$$\begin{cases} y_1 = a_1 x_{11} + a_2 x_{12} + \dots + a_m x_{1m} + \zeta_1, \\ y_2 = a_1 x_{21} + a_2 x_{22} + \dots + a_m x_{2m} + \zeta_2, \\ \dots \\ y_n = a_1 x_{n1} + a_2 x_{n2} + \dots + a_m x_{nm} + \zeta_n, \end{cases} \quad (6)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_m$ – параметры, которые необходимо определить; $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$ – случайные составляющие (помехи). Как правило, при статистически исследованиях число входных параметров не превосходит числа наблюдений, т.е. $m < n$, а зависимые переменные не коррелированы. Тогда среднее квадратическое отклонение помехи $\sigma^2(\zeta_i) = \sigma^2 = \text{const}$ и математическое ожидание $M\{\zeta_i\} = 0$. Из выражения (6) следует, что из-за ряда неучтенных факторов и случайных помех измерения y будут отличаться от линейной зависимости (3).

Свободный член в выражении (6) вычисляется по формуле

$$a_m = \tilde{y} - \sum_{j=1}^k a_j \tilde{x}_j, \quad (7)$$

откуда получаем искомое выражение

$$\hat{y} = a_m + \sum_{j=1}^k a_j x_j. \quad (8)$$

Регрессионные инвариантные модели управления АВО газа

В качестве типичного примера рассмотрим методологию оптимизации инвариантного управления АЭП АВО газа, являющихся одним из главных агрегатов КС МГ [1,3-5]. Величина температуры охлажденного газа АВО существенно влияет на работу ГТС, обеспечивая отсутствие деформаций, нарушений изоляции и коррозии труб, а также увеличение объемов газоподачи. Так, изменение ее значения на $\pm 1^\circ\text{C}$ приводит к снижению мощности оборудования или перерасходу энергоносителей на $0,5 \div 4\%$ или к снижению производительности КС на $4 \div 11\%$. Поэтому точная стабилизация температуры охлаждения газа в соответствии с оптимальными значениями и регламентами стандартов играет важную роль в эффективности производственного цикла КС.

Главными стохастическими возмущениями АВО газа являются:

– метеорологические факторы: температура, влажность окружающего воздуха, атмосферное давление, наличие и интенсивность ветра, осадков и проч.;

– технологические факторы: текущие изменения газоподачи, температуры газа на входе АВО, давление газа после компримирования и др.

Анализ статистических данных на КС, расположенных в районах Крайнего Севера и центральной России, показывает, наибольшее влияние на процесс охлаждения газа в АВО оказывают значения 4 параметров: перепад температур газа в диапазоне $\Delta t = 2 \div 15^\circ\text{C}$; температура окружающего воздуха $\theta = \pm 40^\circ\text{C}$; его влажность $\beta = 20 \div 100\%$ и газоподача $Q = 30 \div 50$ млн.м³/сут.

Электропривод вентилятора АВО газа является фактически единственным каналом воздействия на охлаждающую способность газа, закачиваемого в трубу после КС. Так как скорость вращения вентилятора ω задается в условиях одновременного случайного изменения всех параметров, для получения стабильной температуры газа необходимо:

– получить и обработать достоверную информацию с соответствующих датчиков в цикле с дискретностью порядка минуты;

– вычислить оптимальную (заданную) скорость вращения вентилятора АВО газа по аналитическим регрессионным алгоритмам вида:

$$\omega_3 = f(\Delta t, \theta, \beta, Q), \quad (9)$$

– скорректировать ω_3 с учетом стабилизирующего действия обратной связи по выходной температуре газа, составляющей в среднем $t_2 = 30 \div 35$ °С.

Для реализации первых двух задач обработаны экспериментальные данные $\omega = f(\theta)$ и $\omega = f(\beta)$ работы АВО газа типа 2АВГ-75с, включающие 14 секций с вентиляторами ГАЦ-50-4-МЗ и электродвигателями ВАСО16-14-24. Очевидный нелинейный и стохастический характер данных зависимостей и аналогичный вид остальных – $\omega = f(\Delta t)$; $\omega = f(Q)$ и т.п. – предполагает применение аппарата регрессионного анализа для расчета алгоритмов управления АЭП.

В результате обработки исходных массивов численных данных АВО газа с АЭП по системе ПЧ-АД мощностью $P_{ном} = 37$ кВт с использованием программных средств Mathcad и выражений (3)–(8), получены следующие искомые управляющие функции:

– для линеаризованной 2-факторной модели

$$\omega_2 = 3,8 \cdot \theta + 0,38 \cdot \beta + 30,99; \quad (10)$$

– для линеаризованной 4-факторной модели

$$\omega_4 = 12,21 \cdot \Delta t + 9,20 \cdot \theta + 0,22 \cdot \beta - 0,22 \cdot Q + 9,6; \quad (11)$$

Рис. 4. Структура комбинированной САУ АВО газа

При формализации зависимостей $\omega = f(\theta, \beta)$ показательным степенным функциям $y = x^n$ искомые регрессионные модели будут иметь вид:

$$\omega = A \cdot \Delta t^{a_1} \cdot \beta^{a_2} \cdot \theta^{a_3} \cdot Q^{a_4}, \quad (12)$$

где A – коэффициент пропорциональности; a, b, c, d – показатели интенсивности каждого возмущения. После логарифмирования и подстановки значений в (10) уравнение нелинейной регрессии для 4-факторной модели будет иметь вид:

$$\omega'_4 = 61,33 \cdot \Delta t^{1,01} \cdot \beta^{0,12} \cdot \theta^{0,40} \cdot Q^{-0,3}, \quad (13)$$

Аналогично получается нелинейная 2-факторная регрессионная модель:

$$\omega'_2 = 43,82 \cdot \beta^{0,08} \cdot \theta^{0,24}. \quad (14)$$

Однако особенностью систем управления АЭП по возмущению является то, что управляющий сигнал формируется в зависимости от внешних воздействий и уменьшает влияние их на выходную величину объекта путем компенсации. При этом строго учесть все случайные возмущения невозможно, и для точной стабилизации температуры газа необходимо реализовать комбинированную САР [1,3,19] скоростью вращения АЭП с отрицательной обратной связью по t_2 (рис.4). При этом важность адекватного задания скорости вентилятора не пропадает, т.к. это обеспечивает живучесть при потере информации с датчика t_2 и инвариантность работы в разомкнутой системе.

Заключение

Анализ полученных регрессионных алгоритмов показал:

- график взаимокорреляционной функции подтверждает связь ω с внешними стохастическими возмущениями и нормальный закон распределения входных параметров, действующих на агрегаты КС без взаимовлияния;
- интервал корреляции со статистической связью процессов составляет десятки отсчетов, и стохастические процессы являются стационарными и эргодичными;
- парный коэффициент корреляции Пирсона 2-факторных регрессионных уравнений подтвердил адекватность взаимовлияние переменных;
- дисперсии уровней каждого фактора подтверждают точность линейной регрессионной модели, а значения критерия Фишера (менее 1,95) доказывают адекватность всех полученных моделей и алгоритмов управления агрегатами КС в рамках инвариантных газотранспортных систем.

Список литературы:

1. Крюков О.В. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций. Нижний Новгород: Вектор ТиС. Т. 1. 2010. 560 с.
2. Крюков О.В. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций. Нижний Новгород: Вектор ТиС. Т. 2. 2011. 664 с.
3. Захаров П.А., Киянов Н.В., Крюков О.В. Системы электрооборудования и автоматизации эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности. 2008. №6. С.6-10.
4. Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с IT- алгоритмами // Автоматизация в промышленности. 2008. №6. С. 36-39.
5. Аникин Д.А., Рубцова И.И., Крюков О.В. и др. Проектирование систем управления ЭГПА // Газовая промышленность 2008. С. 84-87.
6. Захаров П.А., Крюков О.В., Аникин Д.А. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Информационные системы и технологии ИСТ-09. Н. Новгород: НГТУ, 2009. С. 161-162.
7. Крюков О.В., Мочалин Д.С. Разработка и моделирование электровентилятора аппаратов воздушного охлаждения газа // Информационные системы и технологии (ИСТ-2013). Н. Новгород: НГТУ. 19 апреля 2013. С. 190-191.
8. Аникин Д.А., Рубцова И.И., Крюков О.В. и др. Опыт проектирования систем управления ЭГПА // Газовая промышленность. 2009. №2. С. 44-47.
9. Крюков О.В. Анализ и техническая реализация факторов энергоэффективности инновационных решений в электроприводных турбокомпрессорах // Автоматизация в промышленности. 2010. №10. С. 50-53.
10. Крюков О.В. Проектирование и модернизация электроприводов нефтегазовых перекачивающих агрегатов // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий. Уфа: УГНТУ, 2011. С. 69-72.

11. Крюков О.В. Теоретическое обоснование и новая аппаратная реализация энергосберегающих электроприводов газоперекачивающих агрегатов // XVI Бенардосовские чтения. Иваново: ИГЭУ, 2011. Т.3. С.50-53.
12. Kryukov O.V., Rubtsova I.E., Stepanov S.E. Optimization of Gas-Compressor Units Synchronous Electric Drives Dynamic Modes // Electrotechnology, Electromaterials and Components ICEEE-2010. Alushta. 20 September. 2010. P. 105.
13. Крюков О.В., Степанов С.Е. Электропривод газоперекачивающего агрегата // Патент на полезную модель, МПК H02P 6/06. Рег. №2011111826/07(017479), Положительное решение о выдаче патента от 06.05.2011 г.
14. Крюков О.В. Энергоэффективность электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск. 2015. №1 (22). С.10-15.
15. Захаров П.А., Крюков О.В. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях // Изв. ВУЗов. Электромеханика. 2009. №5. С. 64-70.
16. Спиридович Е.А., Крюков О.В. Особенности реализации инвариантных САУ аппаратами воздушного охлаждения газа // Информационные системы и технологии ИСТ-09. Н. Новгород: НГТУ, 2009. С. 169-170.
17. Крюков О.В., Захаров П.А. Концепция инвариантного управления электроприводами компрессорных станций // Информационные системы и технологии ИСТ-11. Н. Новгород: НГТУ, 2011. С. 198-200.
18. Крюков О.В., Репин Д.Г. Система управления аппаратами воздушного охлаждения // Патент на полезную модель РФ №108511. МПК F04D 27/00. НГТУ им. Р.Е.Алексеева. Оpubл. БИ 2011, БИ №25.
19. Крюков О.В. Система управления аппаратами воздушного охлаждения // Патент на полезную модель РФ №106310, МПК F04D 27/00. ОАО «Гипрогазцентр». Оpubл. БИ 2011. №7.
20. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями. Нижний Новгород: НГТУ. 2007. 260 с.
21. Крюков О.В. Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градирнями // Электротехника. 2007. №11. С. 62-68.
22. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др. Электроприводы объектов газотранспортных систем. Н. Новгород: Исток. Т. 4. 2013. 300 с.
23. Крюков О.В. Научное обоснование путей модернизации электроприводных ГПА // Вісник НТУ «ХПІ» Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». №36 (1009). Харків. 2013. С. 133-134.
24. Крюков О.В., Степанов С.Е. Научное обоснование и энергосберегающие средства повышения эффективности ЭГПА // Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2013). 2013. С. 71.
25. Kryukov O.V., Pribytkov D.N., Gorbatushkov A.V. A Concept for the Development of Invariant Automated Electric Drives for Water Recycling Systems with Fan Cooling Towers // Russian Electrical Engineering. 2007. Vol. 78. №11. Pp. 621-627.
26. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Реунов А.В. и др. АСУ и диспетчеризации МГ. Н. Новгород: Исток. Т. 5. 2013. 300 с.
27. Крюков О.В. Автоматизированная система энергосберегающего управления водо-оборотными системами с градирнями // Газовая промышленность. 2011. №8. С. 88-92.
28. Крюков О.В. Автоматизированная система регулирования температуры охлажденной воды электроприводом вентиляторной градирни // Патент на полезную модель РФ №122162. МПК E03F 5/22. ОАО «Гипрогазцентр». Оpubл. БИ 20.11.2012.
29. Крюков О.В. АСУ водооборотными системами с градирнями // Автоматизация в промышленности. 2012. №8. С. 53-56.
30. Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. Новокузнецк: СибГИУ, 2010. С. 38-45.
31. Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. 2008. №9. С. 44-50.
32. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'15). М.: ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова. 26-29 января 2015. С.368-386.
33. Крюков О.В. Особенности инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Управление и информационные технологии. М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2010. С.163-166.

References:

1. Kryukov O.V. *Energy Saving and Automation of Compressor Stations Electrical Equipment*. Nizhny Novgorod: Vektor TiS. V. 1. 2010. 560 p.
2. Kryukov O.V. *Energy Saving and Automation of Compressor Stations Electrical Equipment*. Nizhny Novgorod: Vektor TiS. V. 2. 2011. 664 p.
3. Zakharov P.A., Kiyanov N.V., Kryukov O.V. *Electrical Equipment and Effective Gas Transport Automation Systems // Automation in industry*. 2008. №6. Pp. 6-10.
4. Kryukov O.V. *Intelligent Electrical Drive with IT- Algorithms // Automation in industry*. 2008. №6. Pp. 36-39.
5. Anikin D.A., Rubtsova I.I., Kryukov O.V. and others. *EGCU Control Systems Designing // Gas industry* 2008. Pp. 84-87.
6. Zakharov P.A., Kryukov O.V., Anikin D.A. *Regression Algorithms of Electric Driven Gas Compressor Units Invariant Control // Information systems and technologies*. N. Novgorod: NSTU, 2009. Pp. 161-162.
7. Kryukov O.V., Mochalin D.S. *Gas Air Cooling Units Electric Fans Development and Modelling // Information systems and technologies*. Novgorod: NSTU. April 19. 2013. Pp. 190-191.
8. Anikin D.A., Rubtsova I.I., Kryukov O.V. and others. *EGCU Control Systems Design Expertise // Gas industry*. 2009. №2. Pp. 44-47.
9. Kryukov O.V. *Analysis and Engineering Implementation of Energy Efficiency Factors of Innovation Solutions in Electric Driven Turbine Compressors // Automation in industry*. 2010. №10. Pp. 50-53.
10. Kryukov O.V. *Designing and Modification of Oil and Gas Compressor Units Electric Drives // Electric Drive, Electric Technologies and Electric Equipment of Enterprises*. Ufa: USSTU, 2011. Pp. 69-72.
11. Kryukov O.V. *Theoretical Justification and a New Hardware Implementation of Gas Compressor Units Energy Saving Electric Drives // Transactions of International Conference "XVI Benardos readings"*. Ivanovo: ISEU, 2011. V.3. Pp.50-53.
12. Kryukov O.V., Rubtsova I.E., Stepanov S.E. *Optimization of Gas-Compressor Units Synchronous Electric Drives Dynamic Modes // Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components*. Alushta. 20 September. 2010. P. 105.
13. Kryukov O.V., Stepanov S.E. *Gas Compressor Unit Electric Drive // Patent for Utility Model, IPC H02P 6/06. Reg. No2011111826/07(017479), Favourable patent decision of 06.05.2011.*
14. Kryukov O.V. *Energy Efficiency of Electric Driven Gas Compressor Units // Electrotechnical systems and complexes*. Magnitogorsk. 2015. № (22). Pp.10-15.
15. Zakharov P.A., Kryukov O.V. *Invariant Control Methodology of Compressor Stations Units at random influence // Izv.IHD. Electromechanics*. 2009. №5. Pp. 64-70.
16. Spiridovich E.A., Kryukov O.V. *Peculiarities of Invariant Gas Air Cooling Units ACS Implementation // Information systems and technologies*. N. Novgorod: NSTU, 2009. Pp. 169-170.
17. Kryukov O.V., Zakharov P.A. *Invariant Control Concept by Compressor Stations Electric Drives // Information systems and technologies*. N. Novgorod: NSTU, 2011. Pp. 198-200.
18. Kryukov O.V., Repin D.G. *Air Cooling Units Control System // RF Patent for Utility Model No108511. IPC F04D 27/00. JSC "Giprogazcenter". Pub. 2011, Journal No25.*
19. Kryukov O.V. *Air Cooling Units Control System // RF Patent for Utility Model No106310, IPC F04D 27/00. JSC "Giprogazcenter". Pub. Journal 2011. No7.*
20. Kryukov O.V., Kiyanov N.V. *Electrical Equipment and Automation of Water Recycling Systems of the Enterprises with Mechanical-Draft Tower*. N. Novgorod: NSTU. 2007. 260 p.
21. Kryukov O.V. *Invariant Automated Electric Drives Engineering Concept for Water Recycling Systems with Mechanical-Draft Tower // Electrical engineering*. 2007. №11. Pp. 62-68.
22. Puzhailo A.F., Savchenkov S.V., Kryukov O.V. and others. *Gas Transport Systems Facilities Electric Drives*. N. Novgorod: Istok. Vol. 4. 2013. 300 p.
23. Kryukov O.V. *Scientific Justification of Electric Driven GCU Modification Ways // Automated Electric Drive Problems. Theory and Practice*. №36 (1009). Kharkov. 2013. Pp. 133-134.
24. Kryukov O.V., Stepanov S.E. *Scientific Justification and Energy-Efficient Means of EGCU Efficiency Improvement // Gas Transport Systems: the Present and the Future*. October 29-31. 2013. P. 71.
25. Kryukov O.V., Pribytkov D.N., Gorbatushkov A.V. *A Concept for the Development of Invariant Automated Electric Drives for Water Recycling Systems with Fan Cooling Towers // Russian Electrical Engineering*. 2007. Vol. 78. №. 11. Pp. 621-627.
26. Puzhailo A.F., Savchenkov S.V., Reunov A.V. and others. *ACS and GM Dispatching*. N. Novgorod: Istok. Vol. 5. 2013. 300 p.
27. Kryukov O.V. *Automated Energy-Efficient Control System by Water Recycling Systems with Water-Cooling Towers // Gas Industry*. 2011. №8. Pp. 88-92.

28. Kryukov O.V. *Automated Chilled Water Temperature Control System by Fan Cooling Tower Electric Drive* // RF Patent for Utility Model No122162. IPC E03F 5/22. JSC "Giprogazcenter". Pub. Journal 20.11.2012.
29. Kryukov O.V. *Water Recycling Systems ACS with Water Cooling Towers* // Automation in industry. 2012. №8. Pp. 53-56.
30. Kryukov O.V., Gorbatushkov A.V., Stepanov S.E. *Principles of Constructing of Invariant Electric Drives of Energy Facilities* // Automated Electric Drive and Industrial Electronics. Novokuznetsk: SibGIU, 2010. Pp. 38-45.
31. Kryukov O.V. *Electric Drives Invariant Control Regression Algorithms at Stochastic Disturbances* // Electricity. 2008. №3. Pp. 44-50.
32. Kryukov O.V. *JSC "Gazprom" Facilities Electric Drives Invariant Control Systems Strategies* // Systems Identification and Control Problems. M.: IPU RAS dedicated to V. A. Trapeznikov. 2015. Pp.368-386.
33. Kryukov O.V. *Electric Drives Invariant Control Peculiarities at Stochastic Disturbances* // Control and Information Technologies. M.: IPU dedicated to V. A. Trapeznikov. RAS. 2010. Pp. 163-166.

© 2015, Крюков О.В., Хлынин А.С.

*Принципы инвариантных систем
автоматического управления электроприводами
турбокомпрессоров*

© 2015, Kryukov O.V., Serebryakov A.V.

*The principles of invariant systems of automatic
control of electric drives of turbo compressors*