

УДК 62-52-83:656.56

СТРАТЕГИИ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ОБЪЕКТОВ ОАО «ГАЗПРОМ»

О.В. Крюков

ОАО «Гипрогазцентр»

Россия, 603950, Нижний Новгород, Алексеевская ул., 26

E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Ключевые слова: инвариантная система, стохастические возмущения, регрессионные алгоритмы, ковариационный анализ, агрегаты компрессорной станции, газотранспортная система.

Представлены результаты новых исследований технических характеристик электроприводных агрегатов компрессорных станций газотранспортных систем, которые получены после доклада на предыдущей конференции. Предложены принципы, структуры инвариантных САР и методики получения регрессионных алгоритмов АСУ электроприводов основных технологических агрегатов компрессорных станций для эффективного энерго-сберегающего управления. Определены и теоретически обоснованы основные возмущения, влияющие на оптимальные параметры и энергоэффективность работы нагнетателей и установок охлаждения газа. Представлена комплексная методика исследования различных инвариантных систем с взаимосвязанными объектами газотранспортных систем, базирующаяся на теории планирования эксперимента, с реализацией на этапах модернизации и реновации компрессорных станций.

STRATEGIES OF INVARIANT CONTROL SYSTEMS OF ELECTRIC DRIVERS OF PLANTS OF THE PUBLIC CORPORATION "GAZPROM"

O.V. Kryukov

Public Corporation "Giprogazcenter"

Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Alekseevskaya Street, 26

E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Key words: invariant system, stochastic disturbances, regression algorithms, covariance analysis, units of compressor station, gas-transport system.

Results of new studies of technical characteristics of electric drive units of compressor stations of gas-transport systems are presented, which are obtained after the report at the previous conference. Principles, structures of invariant systems of automatic control and procedures of obtaining regression algorithms of invariant automated process control systems of electric drivers of main technological units of compressor stations for the efficient energy saving control are proposed. Main disturbances influencing optimal parameters of power efficiency of performance of superchargers and units of gas cooling are determined and theoretically justified. Complex procedure of studying different invariant systems with interconnected plants of gas-transport systems, based on the theory of experiment design, is presented, with implementation at the stages of modernization and renovation of compressor units.

1. Введение

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 [22-26]. Появились первые реализации подобных систем для основных технологических установок КС – электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) [27-31] и аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО) [32-33].

Все отмеченные выше 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.

2. Структурно-параметрический синтез инвариантных систем ЭГПА

2.1. Принципы построения замкнутых САРЭГПА со стабилизацией давления газа на выходе КС при стохастических возмущениях

Согласно нормам технологического проектирования МГ ОНТП 51-1-85* (п. 3.116) «В комплексе средств автоматизации КЦ следует предусматривать САР, обеспечивающие поддержание заданных величин давления и температуры газа на выходе станции, устройства антипомпажного регулирования и защиты ЭГПА». Однако существующие средства автоматики в основном работают автономно от агрегатов в ручном режиме, выполняя в основном защитные функции, и не обеспечивают энергоэффективные режимы. Вместе с тем, сегодня возможности регулируемого электропривода ЭГПА позволяют оптимизировать энергопотребление КЦ с автоматическим слежением за возмущениями детерминированного и стохастического характера.

В соответствии с патентом на изобретение [22] предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы магистральных газопроводов (рис. 1). Это достигается тем, что температура и давление компримированного газа на выходе всех КС в начале каждого линейного участка газопровода 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.

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 значений 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, чем повышается его эксплуатационная надежность, а также минимизируются интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа.

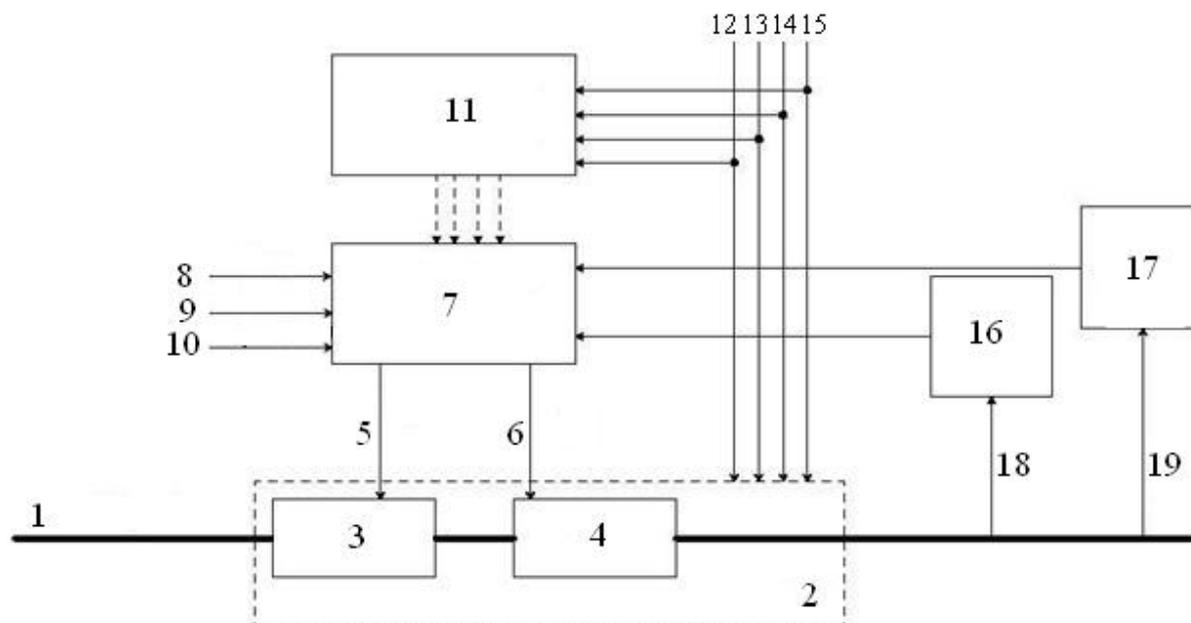


Рис. 1. Структура энергоэффективного транспорта газа через электроприводную КС: 1 – линейная часть МГ, 2 – КС, 3 – ЭГПА, 4 – АВО газа, 5 и 6 – скорости вращения ЭГПА ($\omega_{\text{зад}}^{\text{ЭГПА}}$) и вентиляторов АВО ($\omega_{\text{зад}}^{\text{АВО}}$), 7 – блок расчета параметров регулирования, 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 для оптимизации необходимо выбрать интервалы значений непрерывно изменяющихся переменных и наборы значений дискретных переменных. Причем возможные значения переменных анализируются при постепенном построении дерева, ветви которого соединены с узлами, описывающими рассматриваемые

мые комбинации значений, с использованием технологии разделения переменных, именно разбиения, приводящего к возникновению новых узлов дерева, и оценки, именно определения с большой вероятностью ветвей дерева, которые могут привести к листьям, соответствующим конечному оптимизированному решению. Таким образом, в приоритетном порядке проходят ветви с наибольшей вероятностью успешного решения, причем искомые величины рассматривают как оптимальные, если заранее определенные ограничения не нарушаются или нарушаются в минимальной степени. При этом достигается минимум целевой функции, которая имеет следующий трехфакторный вид:

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

где α , β и γ – весовые коэффициенты, 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, W – фактор «энергии» или минимизации потребления электроэнергии на компримирование газа и его охлаждение в АВО перед подачей в газопровод, C – фактор «цели», т.е. максимизации (минимизации) расхода газа на участке системы, расположенном между двумя точками газопровода, или давления в определенной точке соединения.

Причем 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 P оптимизации следующего вида:

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

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. 1) 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, т.е. комбинированной САР (по отклонению и возмущению) с отрицательной обратной связью по главному технологическому параметру – давлению газа на выходе КС. Такая система, разработанная при участии автора и представляющая патент ОАО «Гипрогазцентр» [23], показана на рис. 2.

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 $U/f^2 = \text{const}$. 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.

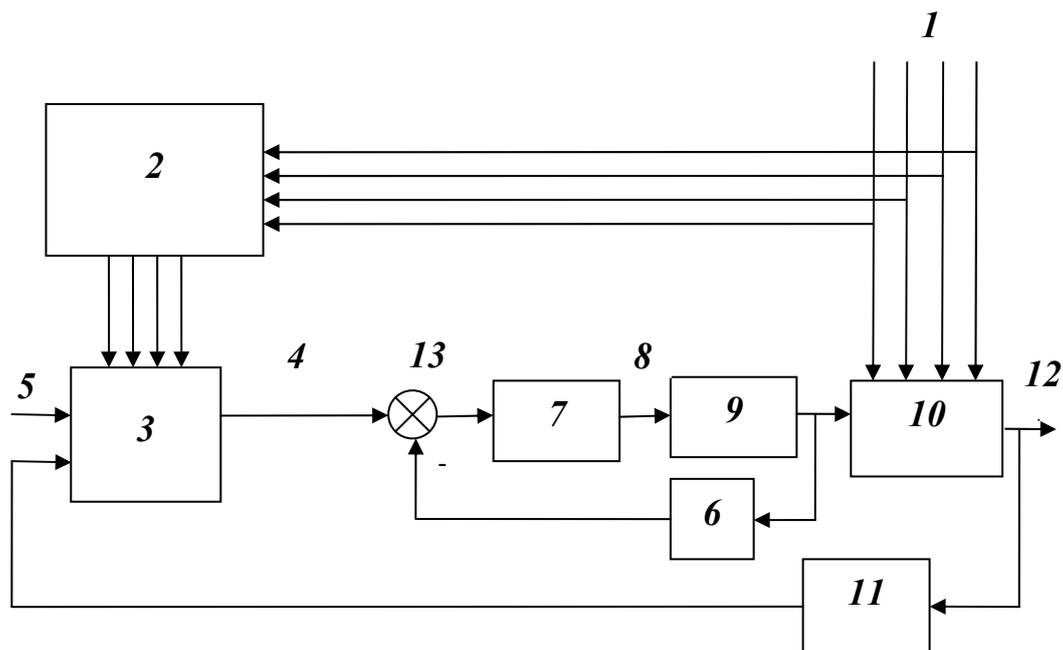


Рис. 2. Структура инвариантной системы частотно-регулируемого ЭГПА.

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.

При необходимости перевода ЭГПА в турбодетандерный режим работы ЭГПА необходимо обеспечивать на выходе высоковольтного преобразователя частоты параметры напряжения с помощью введения внешней отрицательной обратной связи по выходному напряжению, как это выполнено в работах автора [18, 24-26,31].

2.2. Теоретическое обоснование адекватности регрессионных алгоритмов управления ЭГПА

Общий методологический подход к оптимизации параметров автоматизированных электроприводов со случайной нагрузкой и особенности функционирования агрегатов КС при стохастических возмущениях были подробно рассмотрены в докладе на предыдущей конференции [7] и других работах автора [10, 18, 20].

Для объектов ОАО «Газпром», включая технологические установки КС МГ отсутствует непосредственные воздействия совокупности стохастических возмущений на электрические и механические органы электропривода и наиболее целесообразным является организация инвариантной системы управления по типу комбинированной САР, адекватно учитывающей все частные влияния возмущений на объект. При оптимизации все влияющие возмущения после формализации вводятся в закон управления электроприводом, обеспечивая адекватность задания момента и скорости текущему состоянию объекта и требованиям обеспечения оптимального режима МГ.

Как было показано в [7] для рассматриваемой группы механизмов и технологических процессов возможны два метода идентификации, используемые в ОАО «Газпром» при проектировании АСУ КС:

- 1) Идентификация с последующим автоматизированным расчетом алгоритмов управления. В этом случае идентификация модели объекта управления осуществляется один раз, после чего рассчитывается алгоритм управления с постоянными параметрами в режиме *on-line* или *off-line*. Преимуществами метода является возможность расчета и оценки любого алгоритма с дальнейшим моделированием и созданием общей модели. Поэтому данный метод следует применять при выборе структуры системы управления и расчета регуляторов с фиксированными параметрами или адаптивных регуляторов с прямой связью. Таким образом, его целесообразно использовать в АСУТП действующих систем предприятий [18-20].
- 2) Разработка самооптимизирующихся (самонастраивающихся) адаптивных алгоритмов управления электроприводами новых объектов КС МГ. В этом случае идентификация модели объекта производится периодически и после очередного получения оценок модели объекта в режиме *on-line* определяются параметры алгоритма управления с переменными коэффициентами. Достоинствами метода является возможность непрерывного слежения алгоритма за медленно меняющимися параметрами объекта и меньшее время обработки в промышленном компьютере.

Для обработки экспериментальных данных по первому методу оптимизации можно использовать модель линейной регрессии в матричном виде

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

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

Допустим, что случайная величина y с последовательностью ее значений y_1, y_2, \dots, y_n зависит от некоторых технических параметров, характеризуемых признаками x_1, x_2, \dots, x_m . Для исследования зависимости $y=f(x)$ все признаки x_i регистрируются

Для определения из (9) значений \mathbf{a} , при которых функция $F(\mathbf{a})$ будет минимальной, воспользуемся обычным методом минимизации функции, для чего (9) продифференцируем:

$$(10) \quad \frac{dF(\mathbf{a})}{d\mathbf{a}} = -2X^T \mathbf{y} + 2X^T X\mathbf{a} = 0.$$

При $\text{rank } X = m$ из (10) имеем

$$(11) \quad \mathbf{a} = (X^T X)^{-1} X^T \mathbf{y}.$$

Матрицу $X^T X$ в (11) вычисляют следующим образом:

$$(12) \quad \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i3} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{im} \\ \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i3} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{im} \\ \sum_{i=1}^n x_{i3}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i3}x_{i2} & \sum_{i=1}^n x_{i3}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i3}x_{im} \\ \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i2} & \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i3} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{im}^2 \end{pmatrix}.$$

Полученная матрица (12) является симметричной. Приведенные соотношения (4)-(12) справедливы для случая, когда в линейной регрессионной модели отсутствует свободный член. Однако в большинстве задач управления это условие не обеспечивается и $x_{1m} = x_{2m} = \dots = x_{nm} = 1$; тогда последний столбец матрицы X состоит из единиц ($\mathbf{1} = 1, 1, \dots, 1$) с размерностью n . При этом

$$(13) \quad \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i3} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i1} \\ \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i3} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i2} \\ \sum_{i=1}^n x_{i3}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i3}x_{i2} & \sum_{i=1}^n x_{i3}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_{i3} \\ \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i2} & \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i3} & \dots & n \end{pmatrix}.$$

Погрешности линейной регрессионной модели можно определить по обычным статистическим характеристикам: среднему арифметическому значению и среднему квадратическому отклонению. Так как оценки, полученные по методу наименьших квадратов, несмещенные, то среднее арифметическое значение равно истинному значению параметра, а среднее квадратическое отклонение

$$(14) \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-1}}.$$

Второй способ основан на приведении линейной регрессионной модели к средним значениям измеряемых координат, при использовании которых значительно упрощаются вычисления. При наличии в линейной регрессии свободного члена целесообразно вначале вычислить средние арифметические значения:

$$(15) \quad \bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}, \quad \bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^n y_{ij}}{n}.$$

Затем найти новые векторы, привязанные к срединной точке координат, т.е.

$$(16) \quad \begin{cases} x'_{ij} = x_{ij} - \tilde{x}_j, \\ y'_i = y_i - \tilde{y}. \end{cases}$$

где $j = 1, 2, \dots, k$ (при $k = m - 1$); $i = 1, 2, \dots, n$. Далее необходимо определить $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_k)^T$ по формуле

$$(17) \quad \mathbf{a} = (X'^T X')^{-1} X'^T \mathbf{y}'.$$

Как видно из выражения (17), нахождение вектора \mathbf{a} сводится к обращению матрицы меньшего порядка $m - 1$ ($x)m - 1$, и свободный член вычисляется по формуле

$$(18) \quad a_m = \tilde{y} - \sum_{j=1}^k a_j \tilde{x}_j,$$

откуда получаем искомое выражение

$$(19) \quad \tilde{y} = a_m + \sum_{j=1}^k a_j \tilde{x}_j.$$

Третий способ. На интервале времени (t, t_n) с помощью датчика выходных координат снимаются показания y_1, y_2, \dots, y_n с частотой ν . Эти данные можно представить в виде

$$y_i = y(a) + \zeta_i,$$

где $y(a_i)$ – истинные значения измеряемых величин; a_i – параметры объекта; ζ_i – случайные составляющие (помехи). Для оценки неизвестных параметров a_i считаем, что функция y_i представляет собой полином первого порядка, что соответствует линейной регрессии

$$(20) \quad y_i = a_0 + a_1(t_i - t_0),$$

где t_i – время поступления i -го измерения; t_0 – середина интервала наблюдения.

Для определения значений a_0 и a_1 необходимо воспользоваться методом наименьших квадратов, по которому для измеряемой координаты минимизируется разность

$$(21) \quad \min \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}) / \sigma_{yi}^2.$$

Здесь σ_{yi} – среднее квадратическое значение отклонений замеров. На основании соотношения (21) можно записать:

$$(22) \quad \frac{d}{da_j} \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 + a_1 t_i)^2 / \sigma_{yi}^2 = 0.$$

Решая систему уравнений (22), получим значения искомых коэффициентов, отнесенных к середине интервала наблюдения t_0 , т.е.

$$(23) \quad a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad a_1 = \frac{12 \cdot \nu^2 \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i \cdot y_i}{n \cdot (n^2 - 1)};$$

и их средние квадратические отклонения

$$(24) \quad \begin{cases} \sigma_{a_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{yi}^2}{n^2}}, \\ \sigma_{a_1} = \sqrt{\frac{144 \cdot \nu^2 \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i^2 \cdot y_i^2}{n^2 \cdot (n^2 - 1)^2}}. \end{cases}$$

Формулы (23)-(24) являются рекуррентными, и их можно использовать по мере поступления измерительной информации. Таким образом, регрессионную модель алгоритма управления ЭГПА с учетом внешних возмущений (3) можно представить компьютерным алгоритмом управления в виде

$$(25) \quad \hat{y} = a_0 + a_1 \tau.$$

Для упрощения вычислений целесообразно считать, что средние квадратические значения отклонений единичных измерений датчиков постоянны в процессе работы автоматизированной системы, а $v = 1$; тогда

$$(26) \quad \sigma_{yi} = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{n \cdot (n^2 - 1)} (12 \tau^2 + n^2 - 1)}.$$

Из выражения (26) следует, что по мере возрастания числа измерений n величина σ_{yi} уменьшается. Одновременно к этому же результату приводит увеличение входных независимых переменных при автоматическом управлении и регулировании выходных координат ЭГПА. Поэтому для расчета заданной скорости вращения приводного электродвигателя и обеспечения требуемого уровня компримирования природного газа на конкретной КС можно использовать полученные выше выражения (24)-(26).

3. Синтез и анализ инвариантных систем управления газотранспортными объектами

3.1. Расчет регрессионных алгоритмов управления частотно-регулируемым ЭГПА

Математическую модель алгоритма управления ЭГПА по схеме «высоковольтный многоуровневый преобразователь частоты – синхронный электродвигатель» (ПЧ-СД) (или ПЧ-АД) и стабилизации давления природного газа на выходе КС можно получить на основе исходной информации о параметрах работы и экспериментальных данных прототипа. Для этого необходимо, исходя из идей изобретений (рис. 1 и рис. 2), найти параметры “ a_j ” в исходной линейной четырехфакторной модели вида

$$(27) \quad \omega_{.4} = a_1 \cdot \Delta p + a_2 \cdot t_2 + a_3 \cdot \theta + a_4 \cdot Q + \zeta,$$

где Δp – перепад давлений в МГ на входе/выходе КС, t_2 и θ – соответственно температура газа и наружного воздуха, Q – производительность КС по перекачиванию природного газа.

Для наиболее распространенного примера ЭГПА с СТД-12500-2 численные значения исходных параметров системы:

	1
1	57.84
2	56.31
3	53.46
4	50.55
5	47.68
6	44.75
7	41.87
8	38.92
9	36.09
10	33.11
11	30.20
12	27.36
13	24.44
14	21.53
15	18.65
16	15.71

 $\Delta p =$

	1
1	330.6
2	320.2
3	307.8
4	295.1
5	285
6	266
7	258.1
8	240.3
9	227.2
10	211.1
11	198.4
12	182
13	165.9
14	151.4
15	131.5
16	123.9

 $Q =$

	1
1	5000
2	4900
3	4800
4	4700
5	4600
6	4500
7	4400
8	4300
9	4200
10	4100
11	4000
12	3900
13	3800
14	3700
15	3600
16	3500

 $\omega =$

	1
1	10.5
2	13
3	15.5
4	18
5	20.5
6	23
7	25.5
8	28
9	30.5
10	33
11	35.5
12	38.5
13	41
14	43.5
15	46
16	47.5

 $t_2 =$

	1
1	21
2	20.5
3	19.8
4	19.0
5	18.1
6	17.1
7	16.0
8	14.8
9	13.5
10	12.1
11	10.6
12	8.9
13	7.1
14	5.2
15	3.2
16	2.0

 $\theta =$

Параметры a_i находятся путем статистической обработки экспериментальных данных с использованием средств Mathwork MATLAB 7/11 New+Clarck и MathCAD 15.0.0.436 путем обработки исходных массивов данных по методу наименьших квадратов. Экспериментальные значения замеров, полученные в различные моменты времени представлены в статистических сводках. По таблицам данных можно представить модель линейной регрессии в матричном виде (3) и (25). Расчет проведен по второму способу минимизации среднеквадратичного отклонения значений регрессии от реальных экспериментальных данных, который дает наиболее точные результаты. Искомый вектор параметров находим по формуле (16). Результаты представлены в следующих матрицах.

$$Y =$$

	1
1	$5 \cdot 10^3$
2	$4.9 \cdot 10^3$
3	$4.8 \cdot 10^3$
4	$4.7 \cdot 10^3$
5	$4.6 \cdot 10^3$
6	$4.5 \cdot 10^3$
7	$4.4 \cdot 10^3$
8	$4.3 \cdot 10^3$
9	$4.2 \cdot 10^3$
10	$4.1 \cdot 10^3$
11	$4 \cdot 10^3$
12	$3.9 \cdot 10^3$
13	$3.8 \cdot 10^3$
14	$3.7 \cdot 10^3$
15	$3.6 \cdot 10^3$
16	$3.5 \cdot 10^3$

$$X =$$

	1	2	3	4
1	330.6	15.71	10.5	21
2	320.2	18.65	13	20.5
3	307.8	21.53	15.5	19.8
4	295.1	24.44	18	19
5	285	27.36	20.5	18.1
6	266	30.2	23	17.1
7	258.1	33.11	25.5	16
8	240.3	36.09	28	14.8
9	227.2	38.92	30.5	13.5
10	211.1	41.87	33	12.1
11	198.4	44.75	35.5	10.6
12	182	47.68	38.5	8.9
13	165.9	50.55	41	7.1
14	151.4	53.46	43.5	5.2
15	131.5	56.31	46	3.2
16	123.9	57.84	47.5	2

Рассчитаем параметрические матрицы (12):

$$(28) \quad X^T \cdot X = \begin{pmatrix} 9.217 \cdot 10^5 & 1.243 \cdot 10^5 & 9.626 \cdot 10^4 & 5.458 \cdot 10^4 \\ 1.243 \cdot 10^5 & 2.519 \cdot 10^4 & 2.002 \cdot 10^4 & 6.542 \cdot 10^3 \\ 9.626 \cdot 10^4 & 2.002 \cdot 10^4 & 1.593 \cdot 10^4 & 5.012 \cdot 10^3 \\ 5.458 \cdot 10^4 & 6.542 \cdot 10^3 & 5.012 \cdot 10^3 & 3.321 \cdot 10^3 \end{pmatrix};$$

$$(29) \quad (X^T \cdot X)^{-1} = \begin{pmatrix} 5.631 \cdot 10^{-4} & 3.897 \cdot 10^{-3} & -5.659 \cdot 10^{-3} & -8.390 \cdot 10^{-3} \\ 3.897 \cdot 10^{-3} & 5.225 & -6.341 & -0.787 \\ -5.659 \cdot 10^{-3} & -6.341 & 7.697 & 0.967 \\ -8.390 \cdot 10^{-3} & -0.787 & 0.967 & 0.228 \end{pmatrix};$$

$$(30) \quad X^T \cdot Y = \begin{pmatrix} 1.618 \cdot 10^7 \\ 2.446 \cdot 10^6 \\ 1.910 \cdot 10^6 \\ 9.322 \cdot 10^5 \end{pmatrix}.$$

Располагая этими матрицами, имеем:

$$(31) \quad a := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y) = \begin{pmatrix} 17.102 \\ 55.048 \\ -35.026 \\ -55.94 \end{pmatrix}.$$

В результате расчетов из (3) получено численное уравнение линейной регрессии 4-го порядка:

$$(32) \quad \omega_{n4} = 17,102 \cdot \Delta p + 55,048 \cdot t_2 - 35,026 \cdot \theta - 55,94 \cdot Q + 9,602,$$

которое является искомым алгоритмом инвариантного задания и управления скоростью вращения ЧРП ЭГПА.

Аналогично найдены линейные регрессионные уравнения для двухфакторной модели, учитывающей влияние на процесс компримирования газа на КС со стабильными объемами перекачиваемого газа ($Q \sim \text{const}$, $\Delta p \sim \text{const}$) только температурных параметров (газа и наружного воздуха по сухому термометру):

$$(33) \quad \omega_{n2} = 20,38 \cdot t_2 + 28,55 \cdot \theta - 50,23.$$

Судя по полученным зависимостям (32) и (33) регрессионные алгоритмы в полной мере отслеживают текущие входные возмущения и корректируют интенсивность компримирования газа в нагнетателе на КС.

Этот же результат подтверждает предварительный анализ эластичности регрессионных уравнений, который показывает насколько отклоняется величина Y при увеличении X на 1 %:

$$(34) \quad E1 := b_4 \cdot \frac{cc1}{cc} = -0.012, \quad E5 := b_6 \cdot \frac{cc3}{cc} = -0.024,$$

$$E2 := b_5 \cdot \frac{cc2}{cc} = -0.266, \quad E6 := b_7 \cdot \frac{cc4}{cc} = -0.018.$$

Кроме того, возможности пакета MathCAD позволяют сопоставить интенсивность воздействия всех параметров на переменную Y с помощью «стандартизованного коэффициента регрессии»:

$$(35) \quad Kr1 := b_4 \cdot \frac{S1}{S} = -0.032, \quad Kr2 := b_5 \cdot \frac{S2}{S} = -0.876,$$

$$Kr3 := b_6 \cdot \frac{S3}{S} = -0.089, \quad Kr4 := b_7 \cdot \frac{S4}{S} = -0.076.$$

Таким образом, все параметры возмущений вносят определенное участие в формирование управляющего воздействия на ЭГПА, но не являются преимущественными возмущениями.

Однако как показал опыт эксплуатации КС в различных регионах и экспериментальные данные, практически все подобные характеристики могут быть нелинейными, близкими по виду к показательным функциям $y=x^n$. Поэтому имеет смысл подобную регрессионную модель и алгоритм управления искать в нелинейной форме:

$$(36) \quad \omega_{n4} = A \cdot (\Delta p)^{a1} (t_2)^{a2} (\theta)^{a3} (Q)^{a4},$$

где A – коэффициент пропорциональности; $a1, a2, a3, a4$ – показатели интенсивности каждого из возмущающих воздействий (рис. 2). Найдем искомую модель регрессии (рис. 3) в терминах рассмотренной методики в виде (36):

Логарифмируя представленное выражение, получим:

$$(37) \quad \ln \omega_{n4} = \ln(A(\Delta p)^{a1} (t_2)^{a2} (\theta)^{a3} (Q)^{a4}) = \ln A + a1 \ln \Delta p + a2 \ln t_2 + a3 \ln \theta + a4 \ln Q.$$

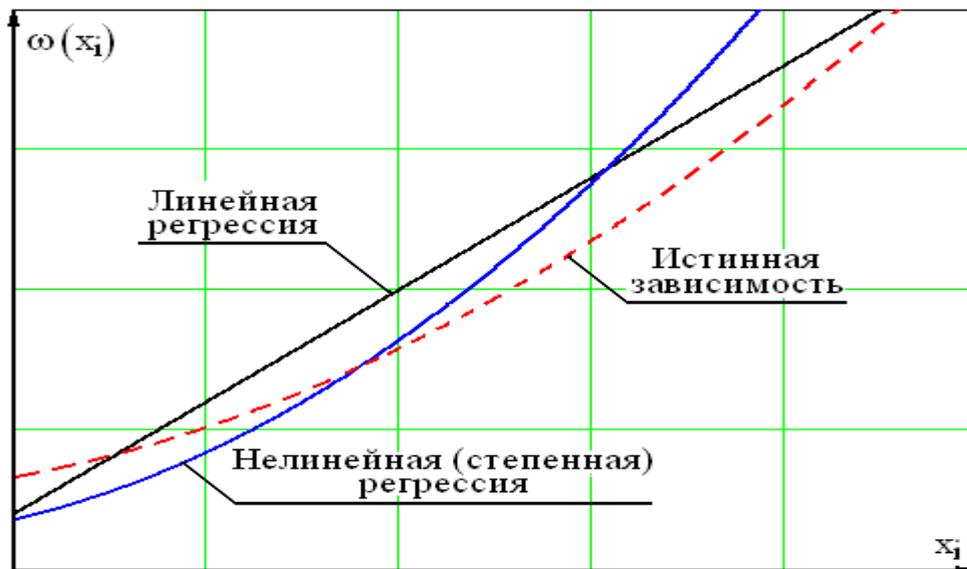


Рис. 3. Способы аппроксимации зависимости $\omega=f(x_i)$ различными регрессиями.

Для полученного уравнения (37) можно применить описанный выше метод отыскания параметров a_i , приняв

$$(38) \quad y = \ln \omega; X_{n,1} = \ln \Delta p; X_{n,2} = \ln t_2; X_{n,3} = \ln \theta; X_{n,4} = \ln Q).$$

Вычислим параметрические матрицы

$$(39) \quad a := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y) = \begin{pmatrix} 0.19 \\ -0.618 \\ 0.43 \\ 8.091 \end{pmatrix};$$

при $e^{a_5} = 3.265 \cdot 10^3$.

После операций потенцирования получаем следующее уравнение нелинейной степенной регрессии 4-го порядка:

$$(40) \quad \omega_{n4} = 61,226 \cdot (\Delta p)^{0,19} (t_2)^{-0,618} (\theta)^{0,43} (Q)^{0,005}.$$

По аналогичной методике найдены уравнения для 2-х факторной нелинейной модели, учитывающей влияние на процесс компримирования газа только технологических параметров (Δp и t_2).

Таким образом, выражения линейных регрессий (32), (33) и нелинейных степенных (40) целесообразно использовать в качестве управляющих алгоритмов работы ЭГПА в качестве задающего воздействия на высоковольтный преобразователь частоты.

Результаты расчетов регрессионных алгоритмов можно оценить путем моделирования, результаты которого представлены на гистограммах рис.4 и 5.

Из представленных гистограмм видно, что линейная регрессия приводит в данных условиях к более точным результатам. Наибольшее отклонение соответствует 7-ой точке (25%), для остальных точек относительное отклонение не превышает 20%.

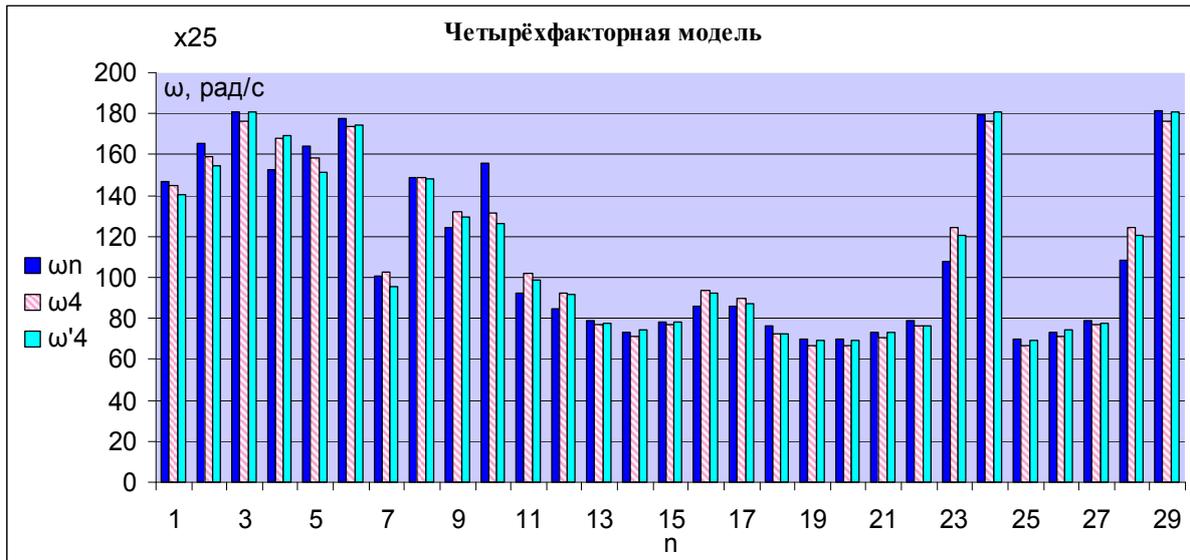


Рис. 4. Результаты сопоставления результатов моделирования 4-факторных регрессий (n – номер замера).

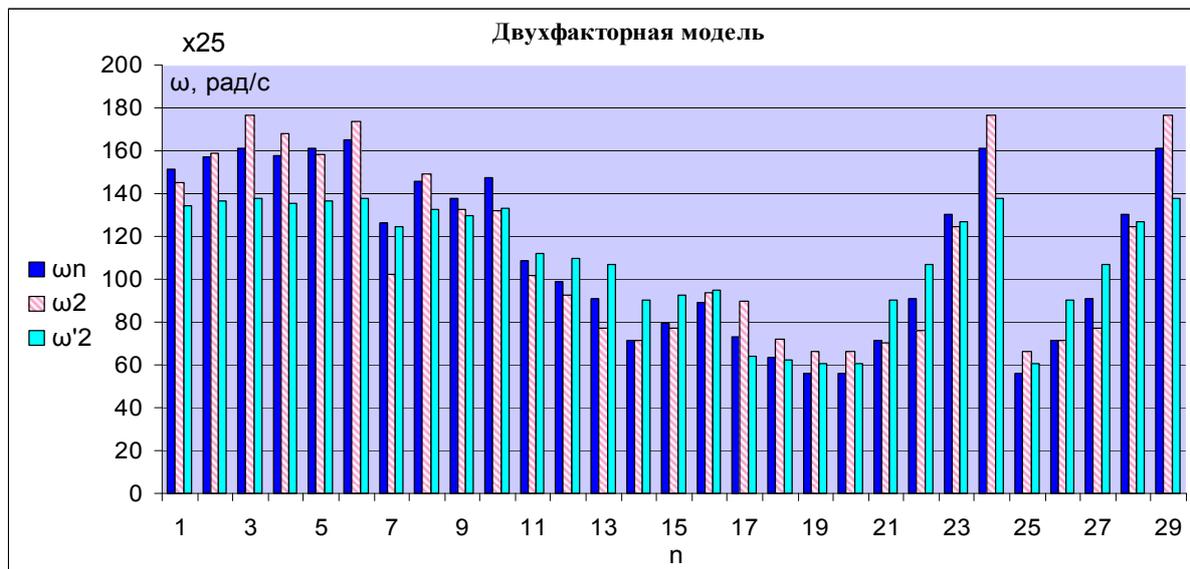


Рис. 5. Результаты сопоставления результатов моделирования 2-факторных регрессий.

Приведенные модели в общем случае не являются идеальными по точности, поэтому ошибку, возникающую при задании скорости в системе регулирования ЭГПА, можно компенсировать действием внешней отрицательной обратной связи, как показано на рис. 2. Первоначальный расчет задания на скорость целесообразно выполнять по более адекватному линейному уравнению.

3.2. Анализ многофакторных регрессионных алгоритмов ЭГПА

Проведенный выше регрессионный анализ заключался в определении аналитического выражения связи, в котором изменение результирующего признака (скорости ЭГПА ω и давления газа $p_{\text{вых}}$) обуславливается влиянием одного или нескольких факторных признаков (основных метеорологических и технологических), а множество всех прочих факторов принимается за постоянные (или усредненные) величины. После получения регрессионных уравнений необходимо проверить правильность учета факторных признаков, установить, имеется ли связь между исследуемыми переменными, и

оценить тесноту и структуру этой связи. Этими задачами занимаются соответствующие разделы методологии статистических исследований – корреляционный, дисперсионный, ковариационный и факторный анализы. Проведем анализ полученных регрессионных уравнений с использованием средств и методов статистической обработки пакета MathCAD.

Корреляционный анализ обычно выполняется на этапе статистической обработки экспериментальных данных и предварительно рассчитанных регрессионных уравнений. Он необходим для исследования структуры и тесноты статистической связи между исследуемыми переменными. Последовательность анализа следующая:

- выбор подходящего измерителя статистической связи – индекса или коэффициента корреляции, корреляционного соотношения, информационной характеристики связи, рангового коэффициента корреляции и т.п.;
- анализ с помощью точечных или интервальных оценок числового значения измерителя по имеющимся выборочным данным;
- проверка корреляционной характеристики на статистически значимое отличие от нуля;
- анализ структуры связей между компонентами исследуемого многомерного признака, проиллюстрировав его плоским геометрическим представлением компонентов.

В случае анализа регрессионных управляющих алгоритмов целесообразно начать с простейших линейных алгоритмов управления ЭГПА, полученных выше – например, (33).

Для представленного количества независимых наблюдений: $n := 1 \dots 16$ матрицы экспериментальных – влажности, температуры воздуха и скорости вращения ЭГПА – в среде MathCAD запишутся следующим образом (если учесть, что $t_1 = \beta$):

$$(40) \quad \begin{cases} \beta := \text{READPRN} ("beta.txt"), \\ \theta := \text{READPRN} ("tvozd"), \\ \omega := \text{READPRN} ("w.txt"). \end{cases}$$

Описание пределов суммирования имеет следующие значения:

$$(41) \quad \begin{cases} N_2 := \text{floor} \left(\frac{N}{2} \right), \\ N := \text{length} (\theta), \\ N := 16, \\ \text{ORIGIN} := 0. \end{cases}$$

Средние значения случайных величин, входящих в двухфакторное регрессионное уравнение, (математические ожидания):

$$(42) \quad \begin{cases} m_\omega := \text{mean} (\omega), m_\omega = 112.483, \\ m_\theta := \text{mean} (\theta), m_\theta = 14.600, \\ m_\beta := \text{mean} (\beta), m_\beta = 63.966. \end{cases}$$

Вычисление корреляционных функций производится для значений $j := 0 \dots N_2$, для $N_2 = 14$. Приводим процессы к нулевому математическому ожиданию параметров:

$$(43) \quad \theta_0 := (\theta - m_\theta), \beta_0 := (\beta - m_\beta), \omega_0 := (\omega - m_\omega).$$

Автокорреляционные функции сигналов входных X и выходных Y дают представление о скорости их изменения во времени, позволяет оценить среднестатистическую зависимость текущих отсчетов сигнала от своих предыдущих и последующих значений (так называемый радиус корреляции значений сигнала), а также выявить в сигнале наличие периодически повторяющихся элементов.

Автокорреляция дискретно представленных входных и выходных сигналов, действующих в ЭГПА, вычисляется по следующим выражениям:

$$(44) \quad \begin{cases} C\theta_j := \frac{1}{N-j} \cdot \sum_{n=j}^{N-1} \theta_{0n} \cdot \theta_{0(n-j)}, \\ C\omega_j := \frac{1}{N-j} \cdot \sum_{n=j}^{N-1} \omega_{0n} \cdot \omega_{0(n-j)}, \\ C\beta_j := \frac{1}{N-j} \cdot \sum_{n=j}^{N-1} \beta_{0n} \cdot \beta_{0(n-j)}. \end{cases}$$

Результаты расчетов по выражениям (41)-(45) показаны на рис. 6.

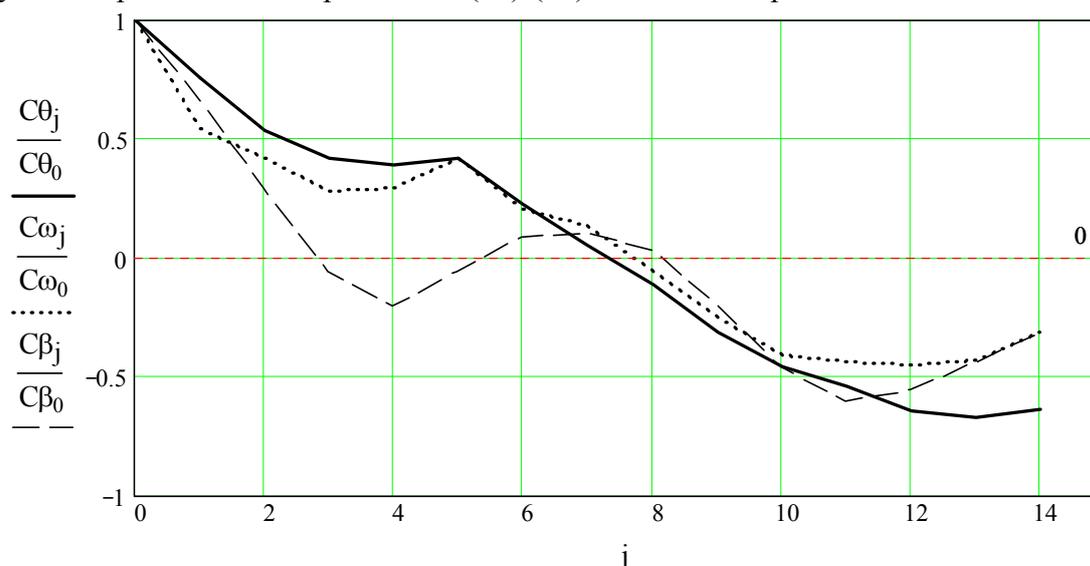


Рис. 6. График автокорреляции сигналов в системе ЭГПА.

Таким образом, полученные результаты расчета коэффициентов корреляции полностью подтверждают данные эксперимента и графики ВКФ, полученные выше и свидетельствуют о корректности полученных регрессионных алгоритмов.

4. Заключение

В соответствии с приоритетными задачами отрасли по оптимизации затрат на транспорт газа автором предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы газопроводов, и интеллектуальные модели его реализации. При этом температура и давление компримированного газа на выходе всех КС в начале каждого линейного участка газопровода 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. Возможности ЧРП ЭГПА позволяют оптимизировать энергопотребление магистрального транспорта газа в соответствии с факторами режима, энергии и цели с автоматическим слежением за возмущениями детерминированного и стохастического характера.

В результате исследования экспериментальных данных компримирования природного газа на КС установлен сам факт наличия устойчивых связей нелинейного характера между давлением компримированного газа и величинами стохастических возмуще-

ний метеорологического и технологического характера, действующих непрерывно на элементы КС МГ. Разработаны методологические основы формализации возмущений, базирующиеся на теории планирования эксперимента и центральную теорему теории вероятностей. Предложены прикладные методики расчета алгоритмов регрессионного управления ЭГПА и исследования результатов методами корреляционного, ковариационного, факторного и дисперсионного анализа. Получены линеаризованные и нелинейные 2х- и 4х-факторные регрессионные алгоритмы управления ЭГПА для синхронной машины СТД-12500-2.

Анализ полученных регрессионных алгоритмов с использованием средств и методов статистической обработки пакета Mathcad показал, что график взаимокорреляционной функции имеет связь управляющей функции с внешними возмущениями при нормальном законе распределения входных параметров ЭГПА без взаимовлияния. При этом парный коэффициент корреляции Пирсона 2-факторных уравнений составил:

$$\begin{aligned} \text{corr}(\omega, \theta) &= 0.932, \\ \text{corr}(\omega, \beta) &= -0.147, \\ \text{corr}(\theta, \beta) &= -0.32, \end{aligned}$$

что характеризует стохастические процессы как стационарные и эргодичные. При уровне значимости $\alpha=0.05$ значение критерия Фишера для степеней свободы $f_1=f_2=26$ составляет менее 1.95, что доказывает адекватность обеих моделей. Но дисперсии уровней каждого фактора подтверждают точность линейной регрессионной модели.

Список литературы

1. Крюков О.В. Оптимальное управление технологическим процессом магистрального транспорта газа // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 4602-4613.
2. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Реунов А.В. и др. Автоматизированные системы управления и диспетчеризации магистральных газопроводов: монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр». В 6 тт. / Под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Исток, 2013. Т. 5, 300с.
3. Крюков О.В. Принципы оптимизации работы электроприводов компрессорных станций магистральных газопроводов // XVII МНТК «Бенардосовские чтения». Иваново, ИГЭУ, 29-31 мая 2013 г. С. 39-42.
4. Крюков О.В. Проектирование инвариантных САУ электроприводами газотранспортных систем // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 12. С. 22-25.
5. Крюков О.В. Синтез и анализ электроприводных агрегатов компрессорных станций при стохастических возмущениях // Электротехника. 2013. № 3. С. 22-28.
6. Крюков О.В. Методология оптимизация инвариантных систем электропривода турбокомпрессоров при случайных возмущениях // VI МНПК «Инженерные системы-2013». РУДН, 24-26 апреля 2013 г. С.249-255.
7. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO '12. Москва, 30 января - 2 февраля 2012. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. С. 222-236.
8. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Спиридович Е.А. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования КС / Под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Вектор ТиС, 2012. Т. 3. 572 с.
9. Крюков О.В. Система инвариантного управления технологическими агрегатами газопроводов // Материалы XVIII МНТК «Информационные системы и технологии» ИСТ-12. Нижний Новгород, НГТУ, 20 апреля 2012 г. С. 185-186.
10. Крюков О.В., Рубцова И.Е., Садиков Д.Г., Степанов С.Е. Теоретическое обоснование и новые аппаратные возможности энергосберегающих ЭГПА // Сборник докладов IV МНТК «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» GTS-2011. ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 26-27 октября 2011 г. М., 2012. Т. 2. С.139-158.

11. Вожаков А.В., Крюков О.В., Лисин Н.Г. и др. О причинах недостаточно эффективного построения и эксплуатации систем автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2012. № 2. С. 38-47.
12. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. 2012. № 3. С. 209-212.
13. Крюков О.В., Васенин А.Б., Степанов С.Е. Исследование энергоэффективности магистральных электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Тезисы докл. МНПК «Трубопроводный транспорт-2013» (к 65-лет УГНТУ). Уфа, 7-8 ноября 2013 г. С. 344-346.
14. Крюков О.В. Взаимосвязанный электропривод газоперекачивающих агрегатов // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 3. С. 12-15.
15. Крюков О.В. Инновационные направления модернизации электроприводов агрегатов магистральных газопроводов// XXXI НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики». Нижний Новгород: НГТУ, 2012. С. 69-75.
16. Воронков В.И., Крюков О.В., Садилов Д.Г., Степанов С.Е. Концепция энергоэффективных электроприводов компрессорных станций // Труды VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. Иваново, ИГЭУ, 2-4 октября 2012 г. С. 191-195.
17. Крюков О.В. Научное обоснование путей модернизации электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Вісник НТУ «ХП». Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» 2013. № 36 (1009). С. 133-134.
18. Пужайло А.Ф., Савченков С.В., Крюков О.В. и др. Электроприводы объектов газотранспортных систем: Монография серии «Научные труды к 45-летию ОАО «Гипрогазцентр». В 6 тт. / Под ред. О.В. Крюкова. Нижний Новгород: Исток, 2013. Т. 4. 300 с.
19. Kryukov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms // Automation and Remote Control. 2013. Vol. 74, No. 6. P. 1043-1048.
20. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // XI Международный симпозиум «Интеллектуальные системы» INTELS '2014. Москва, РУДН, 30 июня - 4 июля 2014. С. 458-463.
21. Крюков О.В. Принципы малолюдных технологий транспорта газа // Сборник научных трудов МНПК «Актуальные вопросы образования и науки». 30 декабря 2013 г. Часть 2. Минобрнауки РФ: ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», Тамбов, 2014. С. 52-53.
22. Пужайло А.Ф., Крюков О.В., Репин Д.Г. Способ магистрального транспорта газа // Патент на изобретение № 2502914, МКИ F17D1/02. ОАО «Гипрогазцентр». Оpubл. 27.12.2013. Бюл. № 36.
23. Крюков О.В., Хлынин А.С., Цирулева Н.Н. Электропривод газоперекачивающего агрегата // Патент на полезную модель № 143197, МПК H02P 27/04, G05B 11/40. ОАО «Гипрогазцентр». Оpubл. БИ № 20. 20.07.2014.
24. Пужайло А.Ф., Крюков О.В., Рубцова И.Е. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода // Наука и техника в газовой промышленности. 2012. № 2. С. 98-106.
25. Крюков О.В., Степанов С.Е. Научное обоснование и энергосберегающие средства повышения эффективности ЭГПА // Сборник докладов V МНТК «Газотранспортные системы: настоящее и будущее» GTS-2013. 29-31 октября 2013 г. Ч. 2. М.: «Газпром ВНИИГАЗ», 2014. С. 45-58.
26. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности ЭГПА // Газовая промышленность, №6, 2014. – С.86-89.
27. Крюков О.В., Степанов С.Е. Оптимизация синхронных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Труды XIV МНТК ICSEE-12. МЭИ, Алушта, 2012. С. 182-184.
28. Крюков О.В. Научное обоснование модернизации электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Материалы XIX МНТК «Информационные системы и технологии» ИСТ-13. Нижний Новгород, НГТУ, 19 апреля 2013. С. 184-185.
29. Крюков О.В. Расширение возможностей газоперекачивающей техники средствами интеллектуального электропривода // Материалы XVIII Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». СПб., СПбГПУ, 5-7 июня 2013. С. 90-99.
30. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84, No. 3. P. 135-140.
31. Крюков О.В., Степанов С.Е., Семенов Д.А. Электроприводы газоперекачивающих агрегатов: уч. пособие. НГИЭУ, Княгинино, 2014. 120 с.
32. Крюков О.В., Мочалин Д.С., Рубцова И.Е., Титов В.Г. Инвариантное управление электроприводами АВО газа // Труды VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. Иваново, ИГЭУ, 2-4 октября 2012. С. 587-591.
33. Мочалин Д.С., Крюков О.В. Инвариантная система управления электроприводами вентиляторов АВО газа // Тезисы XX МНТК «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». 27-28 февраля 2014 г. М.: МЭИ, 2014. Т. 3. С. 176.