

УДК 62-52-83:656.56

О.В. Крюков

ОАО «Гипрогазцентр», Нижний Новгород, Россия

ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВЕНТИЛЯТОРОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

Рассмотрены специфические особенности работы электроприводов основных технологических установок компрессорных станций в условиях воздействия случайных возмущений. Исследования реальной работы установок охлаждения газа показали, что применение частотно-регулируемых электроприводов вентиляторов позволяет повысить надежность работы газопроводов и снизить энергоемкость транспорта газа. При этом для стабильной работы системы из нескольких аппаратов необходим учет текущих параметров, влияющих на энергоэффективность процессов в магистральных газопроводах. В соответствии с нормативно-технической документацией рассмотрены основные десять требований к замкнутым системам электроприводов газотранспортных систем. Это обусловило построение инвариантных систем автоматического управления, обеспечивающих непрерывную адаптацию параметров управления частотно-регулируемым электроприводом к текущим значениям внешних стохастических возмущений. Представлены теоретически обоснованный подход и методика реализации инвариантного управления электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа, основанная на положениях центральной теоремы теории вероятностей и линейаризованной регрессионной модели в матричном виде, которая обеспечивает компенсацию основных возмущений. Приведён пример расчёта регрессионных уравнений для управления электроприводами вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения при учете двух или четырех факторов возмущений. Полученные результаты проанализированы методами теории планирования эксперимента – корреляционным, ковариационным, дисперсионным и факторным анализом, которые подтвердили адекватность и эффективность полученных регрессионных алгоритмов управления частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа. Предложенная инвариантная система автоматического управления установками охлаждения газа прошла апробацию в проектах и реальных условиях работы компрессорных станций магистрального транспорта природного газа, а новизна ее построения и реализации доказана пятью патентами Российской Федерации.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, вентилятор, аппарат воздушного охлаждения газа, инвариантная система регулирования.

O.V. Kryukov

JSC «Giprogazcenter», Nizhny Novgorod, Russian Federation

INVARIANT CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF FANS GAS AIR COOLERS

Specific features of operation of electric drives of the main technological installations of compressor stations in the conditions of impact of casual indignations are considered. Researches of real work of installations of cooling of gas have shown that use of frequency and adjustable electric drives of fans allows to increase reliability of operation of gas pipelines and to reduce power consumption of transport of gas. At the same time the accounting of the current parameters influencing energy efficiency of processes in the main gas pipelines is necessary for stable work of system from several devices. According to the specifications and technical documentation the main ten requirements to the closed systems of electric drives of gas transmission systems are considered. It has caused creation of the invariant systems of automatic control providing continuous adaptation of parameters of control of the frequency and adjustable electric drive to the current values of external stochastic indignations. Theoretically reasonable approach and the technique of realization of invariant control of electric drives of fans of installations of cooling of gas based on provisions of the central theorem of probability theory and the linearized regression model in a matrix look which provides compensation of the main indignations are presented. The example of calculation of the regression equations for control of electric drives of fans of air coolers at the accounting of two or four factors of indignations is given. The received results are analysed by methods of the theory of planning of experiment – the correlation, kovariatsionny, dispersive and factorial analysis which have confirmed adequacy and efficiency of the received regression control algorithms of the frequency and adjustable electric drive of fans of air coolers of gas. The offered invariant system of automatic control of installations of cooling of gas has passed approbation in projects and real operating conditions of compressor stations of the main transport of natural gas, and novelty of her construction and realization is proved by five patents of the Russian Federation.

Keywords: frequency and adjustable electric drive, fan, gas air cooler, invariant system of regulation.

Введение. Надежная и энергоэффективная работа магистральных газопроводов зависит от строгого соблюдения оптимальных показателей транспорта газа на всем протяжении от месторождений до потребителя [1–3]. Это обуславливает необходимость обеспечения устойчивости [4–6] и максимального энергосбережения [7–9] каждой компрессорной станции (КС) [10–12] и каждого технологического агрегата внутри нее [13–16]. Это в значительной степени определяется совершенством более 4 тыс. газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [17–20] и 6 тыс. аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа [8, 21, 22], которые постоянно работают в условиях динамично меняющихся стохастических возмущений [23–26].

Анализ режимов и особенностей работы АВО газа в реальных условиях показал, что применение частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) вентиляторов позволяет повысить надёжность работы газопроводов и снизить энергоёмкость транспорта газа [8, 14].

Необходимо учитывать, что ЧРП АВО, как и всех агрегатов газотранспортной системы, функционирует в условиях, при которых момент нагрузки, скорость и многие технологические параметры значительно изменяются во времени. Это обусловлено как факторами технологического характера (особенностями режимов газоподачи, колебаниями нагрузки и сети), так и внешними воздействиями (метеорологическими и природными), которые носят случайный характер. При этом коэффициент вариации для большинства процессов случайного нагружения ЧРП велик и составляет 0,4–0,9, а энергетический частотный спектр их обычно заключен в диапазоне низких частот 0,01–4 Гц [24–28].

Поэтому при стабилизации выходных параметров (температуры газа и газоподачи) на оптимальном уровне ЧРП АВО газа должен обрабатывать все изменения внешних параметров и автоматически корректировать управляющие воздействия на механизм по соответствующим регрессионным уравнениям [29–31].

Совокупность случайных факторов, действующих на рабочие органы теплотехнических узлов и вентиляторов, определяет не только случайный характер нагрузки, потребляемой мощности и скорости ЧРП, но и его КПД и коэффициент мощности. Поскольку случайный процесс нагружения не может быть достоверно описан традиционной детерминированной диаграммой, для адекватного расчета параметров ЧРП АВО используются статистические методы теории планирования эксперимента [27, 32–35].

Исследования с привлечением аппарата теории вероятности показали, что процесс нагружения ЧРП АВО газа распределен по закону Райса. Методология оптимизации параметров ЧРП со случайной нагрузкой основана на статистических функциях распределения параметров АВО газа и методе анализа.

Коррекцию воздействия совокупности стохастических возмущений на электрические и механические органы ЧРП АВО наиболее целесообразно организовать с применением инвариантной системы управления (ИСУ), адекватно учитывающей все частные влияния возмущений на объект [13–16]. Для этого все основные влияющие возмущения после формализации вводятся в закон управления ЧРП, обеспечивая адекватность задания момента и скорости текущим параметрам АВО газа.

Общими особенностями для ИСУ ЧРП вентиляторов АВО газа и требованиями к ним в реальных условиях КС являются:

- 1) продолжительный спокойный режим работы;
- 2) плавное изменение нескольких независимых стохастических возмущений;
- 3) регулирование скорости при нагрузке $M_{ст} \equiv \omega^2$;
- 4) стабилизация скорости вращения ЧРП;
- 5) большой суммарный момент инерции;
- 6) периодическая работа на низких скоростях;
- 7) инерционность теплотехнических процессов;
- 8) высокая экономическая эффективность ЧРП;
- 9) высокая надежность и живучесть работы;
- 10) интеграция локальных ЧРП АВО в АСУ ТП.

Анализ данных требований показывает, что все они, за исключением второго, могут быть реализованы современными серийными ПЧ. Аппаратные средства позволяют интегрировать локальные микропроцессорные системы управления АВО с подсистемами диагностики, создавая технически законченные, многофункциональные и недорогие системы. Однако реализация второго требования является определяющей и наиболее специфичной задачей, относя рассматриваемые ЧРП АВО к классу систем со случайными возмущениями, теоретическая и методологическая база которых практически отсутствует. Это предполагает применение для создания ИСУ ЧРП и их формализации статистических методов, основанных на приложениях центральной теоремы теории вероятности, входящих в общую теорию планирования эксперимента. При этом искомые многопараметрические алгоритмы получаются в виде нелинейных или линеаризованных регрессионных моделей с использованием матричных способов наименьших квадратов [29].

Теоретическое обоснование. Метод регрессионного анализа используется, когда:

- после проведения экспериментов имеются базы численных данных для обработки на ПК;
- при эксплуатации АВО данные с датчиков обрабатываются на управляющем компьютере.

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

$$Y = X \cdot a + \zeta, \quad (1)$$

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

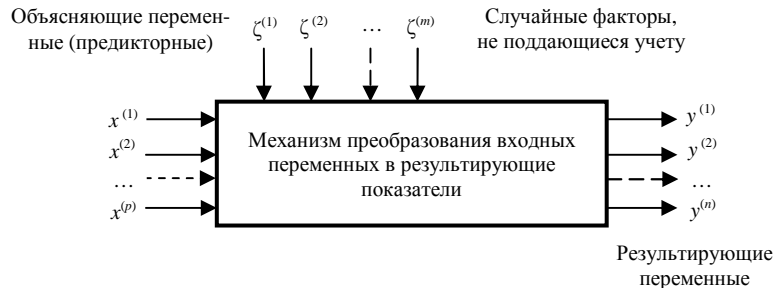


Рис. 1. Общая схема взаимодействия переменных при статистическом исследовании

На рис. 1 приведена функциональная схема взаимодействия переменных реального объекта (механизма преобразования входных переменных в результирующие показатели). Входные переменные $x^{(p)}$ описывают условия функционирования и являются независимыми аргументами, предсказывающими (предикторными) и объясняющими поведение. 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 измерению) факторы, отражающие влияние второстепенных воздействий и случайных ошибок измерения.

Тогда общая задача статистического исследования зависимостей формулируется следующим образом. По итогам n измерений

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

исследуемых переменных в системе анализируемой совокупности построить так называемую «векторно-значную функцию»

$$f[x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}] = \begin{pmatrix} f^{(1)}[x^{(1)}, \dots, x^{(p)}] \\ f^{(2)}[x^{(1)}, \dots, x^{(p)}] \\ \dots \\ f^{(n)}[x^{(1)}, \dots, x^{(p)}] \end{pmatrix}, \quad (3)$$

которая позволила бы наилучшим образом восстановить значения результирующих переменных $Y = [y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n)}]^T$ по заданным значениям входных (объясняющих) переменных $X = [x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}]^T$. При этом можно решить две прикладные задачи:

1) прогноз неизвестных значений из всего диапазона регулирования индивидуальных $Y(X)$ или средних $Y_{cp}(X)$ значений исследуемых результирующих показателей по заданным значениям соответствующих переменных. Это необходимо для оценки показателей ЧРП (диапазон регулирования, эффективность и окупаемость);

2) выявление причинно-следственных связей между входными и выходными показателями, управление значениями Y путем регулирования переменных. Это необходимо для программной реализации оптимальных алгоритмов ЧРП.

Регрессионная модель (1) получается из (3) при обработке экспериментальных данных по методу наименьших квадратов [29], обеспечивающему достоверность поведения системы. Алгоритм получения модели следующий.

Допустим, что случайная величина y с последовательностью её 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 одновременно по информации с системы датчиков, а y – спустя некоторый интервал времени τ , составляющий 3–4 постоянных времени объекта.

В результате этого можно получить следующие уравнения линейной регрессии:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= a_1 x_{11} + a_2 x_{12} + \dots + a_m x_{1m} + \zeta_1, \\ y_2 &= a_1 x_{21} + a_2 x_{22} + \dots + a_m x_{2m} + \zeta_2, \\ \dots & \\ y_n &= a_1 x_{n1} + a_2 x_{n2} + \dots + a_m x_{nm} + \zeta_n, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где a_1, a_2, \dots, a_m – определяемые параметры; $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$ – случайные помехи. Как правило, при статистических 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 $\mathbf{M}\{\zeta_i\} = 0$. Из выражения (4) следует, что из-за неучтенных факторов y будут отличаться от линейной зависимости.

Для удобства вычислительных процедур выражение (4) запишем в матричном виде (1), тогда векторы отдельных матриц имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{y} &= |y_1, y_2, \dots, y_n|^T, \mathbf{a} = |a_1, a_2, \dots, a_m|^T, \\ \boldsymbol{\zeta} &= |\zeta_1, \zeta_2, \dots, \xi_n|^T, \\ \mathbf{X} &= \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \end{vmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для определения математической модели ЧРП объекта с возмущениями 2-го рода в виде линейной регрессии необходимо использовать один из трех способов преобразований (5) [17–19]. Наиболее удобным и точным способом получения регрессионных моделей ЧРП АВО является следующий подход. Модель линейной регрессии (1)–(5) представляется в виде

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \mathbf{a}, \quad (6)$$

где $\hat{\mathbf{y}}$ – оценки значения \mathbf{y} ; \mathbf{a} – вектор оценок.

Функцию ошибки представим как

$$F(\mathbf{a}) = e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2,$$

тогда получим при n замерах в эксперименте

$$F(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n (y_i - a_1 x_{i1} - a_2 x_{i2} - \dots - a_m x_{im})^2. \quad (7)$$

Вычислим средние арифметические:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n}; \quad \bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}.$$

Свободный член (4)–(7) вычисляется как

$$a_m = \tilde{y} + \sum_{j=1}^k a_j \tilde{x}_j,$$

откуда получаем искомое выражение

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

Инвариантные модели ЧРП АВО газа. В качестве примера рассмотрим методологию оптимизации ИСУ ЧРП АВО газа, являющихся главными потребителей электроэнергии КС [10, 27]. Поскольку охлаждение газа является энергоёмким процессом (до 70 % расхода электроэнергии), а мощность, потребляемая АВО, составляет сотни киловатт, энергосберегающее регулирование дает быстрый эффект.

Опыт эксплуатации АВО газа показывает, что наибольшее влияние на охлаждение газа оказывают колебания значений 4 параметров:

- температура окружающего воздуха θ , изменяющаяся в диапазоне $\pm 40^\circ\text{C}$;
- его влажность: $\beta = 30\ldots 100 \%$;
- температура газа на входе или перепад температур компримирования $\Delta t = 15^\circ\text{C}$;
- массовый расход газа (подача газопровода) Q обычно в диапазоне 2:1.

Все эти возмущения на АВО газа имеют стохастический характер, не зависимы друг от друга и каждый из них вносит неопределяющую долю в общее изменение состояния. Это позволяет применить регрессионный анализ.

Поскольку скорость вращения ω вентилятора АВО задается в условиях случайного изменения всех параметров, для получения стабильной температуры газа t_2 необходимо:

- получить и обработать информацию с датчиков в цикле с дискретностью порядка минуты;
- вычислить оптимальную (заданную) скорость вращения вентиляторов АВО по аналитическим регрессионным алгоритмам:

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

- скорректировать ее путем стабилизирующего контура по температуре охлажденного газа t_2 .

Для этого целесообразно использовать экспериментальные данные $\omega = f(\theta)$ и $\omega = f(\beta)$ реальных АВО газа за годовой промежуток наблюдений и интерполировать их в виде

$$\omega_3 = K(a_1\Delta t + a_2\theta + a_3\beta + a_4Q) \quad (10)$$

или

$$\omega_3 = A\Delta t^{a_1} \cdot \beta^{a_2} \cdot \theta^{a_3} \cdot Q^{a_4}, \quad (11)$$

где K, A – коэффициенты пропорциональности; a_1, a_2, a_3, a_4 – показатели интенсивности каждого из возмущающих воздействий.

Так, в результате анализа численных данных АВО газа с ЧРП вентилятора мощностью $P_{ном} = 37$ кВт с использованием средств Mathcad и выражений (6)–(11) получено:

– для линеаризованной 2-факторной модели

$$\omega_2 = 3,8\theta + 0,38\beta + 30,99; \tag{12}$$

– для линеаризованной 4-факторной модели

$$\omega_4 = 12,21\Delta t + 9,20\theta + 0,22\beta - 0,22Q + 9,6. \tag{13}$$

При формализации зависимостей $\omega = f(\theta, \beta)$ показательными степенными функциями (11) искомые модели имеют вид:

$$\omega'_4 = 61,33\Delta t^{1,01} \cdot \beta^{0,12} \cdot \theta^{0,40} \cdot Q^{-0,3}. \tag{14}$$

Аналогично получается нелинейная 2-факторная регрессионная модель:

$$\omega'_2 = 43,82\beta^{0,08} \cdot \theta^{0,24}. \tag{15}$$

Статистический анализ регрессионных алгоритмов управления АЭП. Анализ сходимости результатов расчета для 4-факторных моделей на гистограммах (рис. 2) показал, что обе регрессионные модели (13) и (14) обеспечивают достаточную точность инвариантного задания ω_3 во всем диапазоне возмущений. Поэтому для расчёта ω_3 используются более простые линеаризованные уравнения (13). Аналогичен вывод и по 2-факторным моделям (12) и (15).

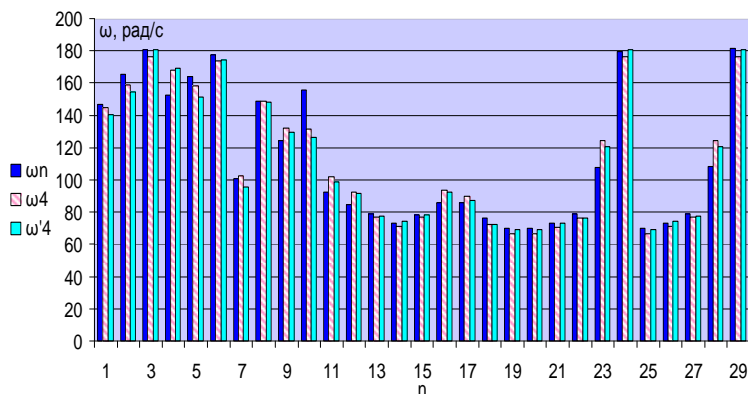


Рис. 2. Результаты сопоставления результатов моделирования 4-факторных регрессий

Численные значения для рассмотренных АВО газа необходимо проанализировать в рамках общей теории планирования эксперимента методами корреляционного, дисперсионного, факторного и ковариационного анализа [25–28].

Однако особенностью систем управления ЧРП АВО по возмущению является неполная компенсация, так как строго учесть и точно измерить все случайные воздействия невозможно, и для точной стабилизации температуры t_2 необходима комбинированная САР ЧРП АВО с обратной связью по параметру t_2 (рис. 3).

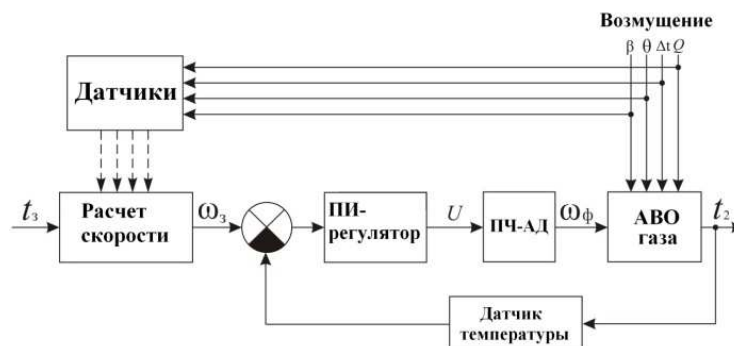


Рис. 3. Схема инвариантной САР ЧРП АВО газа

Проведённый регрессионный анализ определил аналитические выражения связи, в которых изменение результативного признака (ω вентилятора или t_2 газа) обуславливается влиянием нескольких факторных признаков (метеорологических и технологических). После получения моделей необходимо проверить правильность учёта факторных признаков, установить, имеется ли связь между переменными, и оценить тесноту и структуру этой связи.

Корреляционный анализ необходим для определения связи между переменными:

- выбор измерителя статистической связи – индекса корреляции или соотношения;
- анализ с помощью точечных оценок числового значения измерителя по адекватным данным;
- проверка корреляционной характеристики на статистически значимое отличие от нуля;
- анализ структуры связей между компонентами многомерного признака.

При анализе регрессионных алгоритмов ЧРП целесообразны линейные модели. Информативную оценку связей между различными процессами и описание степени сходства формы сигналов с их взаимным расположением дает взаимокорреляционная функция (ВКФ). Для полученного регрессионного алгоритма (13) на рис. 4 представлены результаты расчетов ВКФ для парных сочетаний взаимовлияющих параметров скорости вентилятора, температуры и влажности воздуха.

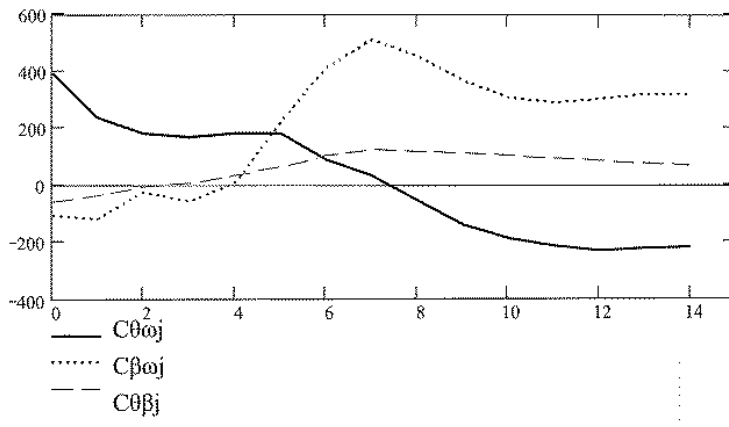


Рис. 4. ВКФ параметров АЭП АВО газа

Амплитуда колебаний ВКФ указывает на существенную зависимость ω ЧРП от θ и β , что соответствует реальности. Малое взаимовлияние возмущений θ и β позволяет принять их независимыми. Интервал корреляции, в пределах которого наблюдается статистическая связь, составляет десятки отсчетов, и поэтому процессы являются стационарными и эргодичными.

Ковариационный анализ устанавливает, ассоциированы ли наборы данных по величине, т.е. большие значения из одного набора данных связаны с большими значениями другого набора (положительная ковариация), или наоборот (отрицательная), или данные двух диапазонов никак не связаны (близка к нулю).

Функция MathCAD $cvar(A,B)$ вычисляет значения выборочной ковариации, и в нашем случае значения ковариаций: $cvar(\omega,\theta) = 394$, $cvar(\omega,\beta) = -108$, $cvar(\theta,\beta) = -59$. Эти данные подтверждают наличие связи между скоростью вращения АЭП и величиной температуры окружающего воздуха, а также отсутствие связи между температурой и влажностью.

Функция MathCAD $\text{corr}(A,B)$ определяет парный коэффициент корреляции Пирсона, который для двухфакторных регрессионных уравнений (16) ЧРП составляет: $\text{corr}(\omega,\theta) = 0,93$, $\text{corr}(\omega,\beta) = -0,15$, $\text{corr}(\theta,\beta) = -0,32$. Низкий коэффициент корреляции (менее $\pm 0,1$) означает, что связь между переменными слаба или вовсе отсутствует. Высокий коэффициент корреляции (ближе к ± 1) показывает, что зависимая переменная изменяется в функции независимой.

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

Дисперсионный анализ сравнивает искомые модели с экспериментальными данными по критерию Фишера путем решения задач оценки влияния некоторого фактора A на случайную величину X . В двухфакторном дисперсионном анализе проверяется гипотеза о равенстве математических ожиданий выходного контролируемого параметра Y при различных уровнях двух случайных факторов. По значениям критерия Фишера, полученным для регрессионных уравнений (16) и (17) – соответственно $F_{\text{д}} = 9,3$ и $F_{\text{н}} = 2,9$, можно сделать вывод о том, что большей точностью обладает линеаризованная модель (16). При уровне значимости $\alpha = 0,05$ значение критерия Фишера для имеющихся степеней свободы $f_1 = f_2 = 26$ составляет менее 1,95, что доказывает адекватность обеих моделей.

Библиографический список

1. Крюков О.В. Оптимальное управление технологическим процессом магистрального транспорта газа // Материалы XII Всерос. совещ. по проблемам управления (ВСПУ-2014) / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. – М., 2014. – С. 4602–4613.
2. Крюков О.В. Оптимальное управление магистральными потоками газа с помощью электроприводных агрегатов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2015. – № 5(51). – С. 20–25.
3. Крюков О.В. Автоматизация газотранспортных агрегатов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 36–41.

4. Крюков О.В., Степанов С.Е. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2014. – № 8(710). – С. 50–56.

5. Крюков О.В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.

6. Аникин Д.А., Рубцова И.Е., Крюков О.В., Киянов Н.В. Проектирование систем управления электроприводными ГПА // Газовая промышленность. – 2009. – № 2. – С. 44–47.

7. 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(50). – С. 98–106.

8. Крюков О.В. Энергосберегающий электропривод аппаратов воздушного охлаждения нефти // Химическая техника. – 2014. – № 11. – С. 34–42.

9. Крюков О.В., Серебряков А.В., Хлынин А.С. Синтез энергосберегающих алгоритмов частотно-регулируемых приводов газотранспортных систем // Электроприводы переменного тока (ЭППТ-2015): тр. шестнадцатой Междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. И.Я. Браславский. – Екатеринбург, 2015. – С. 205–208.

10. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло, Е.А. Спиридович, О.В. Крюков [и др.] / под ред. д-ра техн. наук О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 560 с.

11. Крюков О.В. Комплексная система мониторинга и управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Передовые информационные технологии, средства и системы автоматизации и их внедрение на российских предприятиях: тр. МНПК АТА-2011. – М., 2011. – С. 329–350.

12. Крюков О.В. Синтез и анализ электроприводных агрегатов компрессорных станций при стохастических возмущениях // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 22–27.

13. Захаров П.А., Крюков О.В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник ИГЭУ. – Иваново, 2008. – № 2. – С. 98–104.

14. Захаров П.А., Крюков О.В. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.

15. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15. – М.: Изд-во Ин-та проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2015. – С. 368–386.

16. Крюков О.В., Горбатушков А.В., Степанов С.Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.Ю. Островляничика. – Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.

17. Крюков О.В., Рубцова И.Е., Титов В.Г. Опыт проектирования и реализации электроприводов газотранспортных систем // Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2012): тр. XV МНТК; Екатеринбург, 12–16 марта 2012 г. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. – С. 239–242.

18. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // тр. VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 157–163.

19. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3(19). – С. 209–212.

20. Kryukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Т. 84. – С. 135–138.

21. Система управления аппаратами воздушного охлаждения: пат. №106310 Рос. Федерация, МПК F04D 27/00 ОАО «Гипрогазцентр» / Крюков О.В.; опубл. 10.07.2011.

22. Система управления аппаратами воздушного охлаждения газа: пат. №108511 Рос. Федерация, МПК F04D 27/00. ОАО «Гипрогазцентр» / Крюков О.В., Репин Д.Г.; опубл. 20.09.2011.

23. Управление и мониторинг электроприводов компрессорных станций в условиях стохастических возмущений / И.Е. Рубцова, О.В. Крюков, С.А. Бабичев [и др.] // тр. VI Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2010). – Тула, 2010. – С. 209–215.

24. Серебряков А.В., Крюков О.В., Васенин А.Б. Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах: материалы конф. / под ред. С.Н. Васильева. – М: Изд-во ИПУ им. В.А. Трапезникова. – С. 467–469.

25. Крюков О.В., Киянов Н.В. Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: монография. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2007. – 260 с.

26. Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градирнями / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, Д.Н. Прибытков [и др.] // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 62–67.

27. Крюков О.В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'12): материалы IX МНТК. – М.: Изд-во ИПУ им. В.А. Трапезникова, 2012. – С. 222–236.

28. Крюков О.В. Особенности инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Управление и информационные технологии (УИТ-2010): материалы 6-й науч. конф. / Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – СПб., 2010. – С. 163–166.

29. Крюков О.В. Регрессионные алгоритмы инвариантного управления электроприводами при стохастических возмущениях // Электричество. – 2008. – № 9. – С. 44–50.

30. Крюков О.В. Проектирование инвариантных САУ электроприводами газотранспортных систем // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 12. – С. 22–24.

31. Крюков О.В. Автоматизированные электроприводы для систем охлаждения с вентиляторными градирнями // Компрессорная техника и пневматика. – 2014. – № 8. – С. 25–31.

32. Крюков О.В. Интеллектуальные электроприводы с ИТ-алгоритмами // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 36–39.

33. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095–1101.

34. Крюков О.В. Стратегии инвариантных электроприводов газотранспортных систем // Интеллектуальные системы: XI междунар. симпозиум; Москва, 30 июня – 4 июля 2014 г. – М.: Изд-во РУДН, 2014. – С. 458–463.

35. Крюков О.В., Степанов С.Е., Бычков Е.В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов // тр. VIII Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу; Саранск, 7–9 октября 2014 г. – Саранск: Изд-во МГУ им. Н.П. Огарева, 2014. – Т. 2. – С. 409–414.

References

1. Kriukov O.V. Optimal'noe upravlenie tekhnologicheskimi protsessom magistral'nogo transporta gaza [Optimal control of cross-country gas pipeline processing]. *Materialy XII Vserossiiskogo soveshchaniia po problemam upravleniia (VSPU-2014)*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2014, pp. 4602-4613.

2. Kriukov O.V. Optimal'noe upravlenie magistral'nymi potokami gaza s pomoshch'iu elektroprivodnykh agregatov [Optimal control of the cross-country gas pipeline with the help of electrically driven unit]. *Truboprovodnyi transport: teoriia i praktika*, 2015, no. 5(51), pp. 20-25.

3. Kriukov O.V. Avtomatizatsiia gazotransportnykh agregatov [Automatic performance of gas transmission unit]. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 36-41.

4. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Povysenie ustoichivosti raboty elektroprivodov tsentrobezhnykh nagnetatelei na kompressornykh stantsiiakh OAO "Gazprom" [Stability improvement of electrically driven centrifugal blower used at JSC Gasprom gas-compressor station]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2014, no. 8(710), pp. 50-56.

5. Kriukov O.V. Virtual'nyi datchik nagruzki sinkhronnykh mashin [Virtually load sensing element of synchronous machines]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2014, no. 3, pp. 45-50.

6. Anikin D.A., Rubtsova I.E., Kriukov O.V., Kiianov N.V. Proektirovanie sistem upravleniia elektroprivodnymi gazoperekachivaiushchimi agregatami [Designing the control systems with electrically driven GPA]. *Gazovaia promyshlennost'*, 2009, no. 2, pp. 44-47.

7. Puzhailo A.F., Kriukov O.V., Rubtsova I.E. Energoberezhenie v agregatakh kompressornykh stantsii sredstvami chastotno-reguliruemogo elektroprivoda [Energy saving in compressor stations units by means of a frequency-controlled electric drive]. *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti*, 2012, no. 2(50), pp. 98-106.

8. Kriukov O.V. Energoberegaiushchii elektroprivod apparatov vozdushnogo okhlazhdeniia nefi [Energy-saving electric devices for self cooling of oil]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2014, no. 11, pp. 34-42.

9. Kriukov O.V., Serebriakov A.V., Khlynin A.S. Sintez energoberegaiushchikh algoritmov chastotno-reguliruemykh privodov gazotransportnykh sistem [Synthesis of energy-saving algorithms, variable speed drives of gas transmission systems]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka (EPPT-2015)"*. Ekaterinburg, 2015, pp. 205-208.

10. Puzhailo A.F., Spiridovich E.A., Kriukov O.V. [et al.]. Energoberezhenie i avtomatizatsiia elektrooborudovaniia kompressornykh stantsii [Energy saving and electric equipment automation of electrical compressor stations]. Nizhniy Novgorod: Vektor TiS, 2010. 560 p.

11. Kriukov O.V. Kompleksnaia sistema monitoringa i upravleniia elektroprivodnymi gazoperekachivaiushchimi agregatami [Comprehensive monitoring system and electrically driven gas pumping units management]. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Peredovye informatsionnye tekhnologii, sredstva i sistemy avtomatizatsii i ikh vnedrenie na rossiiskikh predpriatiiakh" AITA-2011*. Moscow, 2011, pp. 329-350.

12. Kriukov O.V. Sintez i analiz elektroprivodnykh agregatov kompressornykh stantsii pri stokhasticheskikh vozmushcheniiah [Synthesis and analysis of electric drive units of compressor stations with stochastic perturbations]. *Elektrotekhnika*, 2013, no. 3, pp. 22-27.

13. Zakharov P.A., Kriukov O.V. Printsipy invariantnogo upravleniia elektroprivodami gazotransportnykh sistem pri sluchainykh vozmushcheniiah [The principles of the invariant control electronic gas transportation systems with random perturbations]. *Vestnik ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. Ivanovo, 2008, no. 2, pp. 98-104.

14. Zakharov P.A., Kriukov O.V. Metodologiya invariantnogo upravleniia agregatami kompressornykh stantsii pri sluchainykh vozdeistviiakh [The methodology of the invariant control compressor station units at random input]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2009, no. 5, pp. 64-70.

15. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh sistem upravleniia elektroprivodami ob"ektov OAO "Gazprom" [Invariant electrical control systems strategy of the JSC Gazprom facilities]. *Identifikatsiia sistem*

i zadachi upravleniia SICPRO'15. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2015, pp. 368-386.

16. Kriukov O.V., Gorbatushkov A.V., Stepanov S.E. Printsipy postroeniia invariantnykh elektroprivodov energeticheskikh ob"ektov [Invariant electric power facilities construction principles]. *Trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizirovannyi elektroprivod i promyshlennaia elektronika"*. Novokuznetsk, 2010, pp. 38-45.

17. Kriukov O.V., Rubtsova I.E., Titov V.G. Opyt proektirovaniia i realizatsii elektroprivodov gazotransportnykh sistem [Experience in construction and implementation of the electric drive gas transportation systems]. *Trudy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka (EPPT 2012)"*, 12-16 March 2012. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet, 2012, pp. 239-242.

18. Kriukov O.V. Opyt sozdaniia energoeffektivnykh elektroprivodov gazoperekachivaiushchikh agregatov [Experience in energy-efficient electric drives for gas pumping units creation]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AITA-2014*. Saransk, 2014, pp. 157-163.

19. Kriukov O.V., Stepanov S.E. Puti modernizatsii elektroprivodnykh gazoperekachivaiushchikh agregatov [Ways of electrically driven gas pumping units modernization]. *Elektromekhanichni i energozberigaiuchi sistemi*, 2012, no. 3(19), pp. 209-212.

20. Kriukov O.V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, pp. 135-138.

21. Kriukov O.V. Sistema upravleniia apparatami vozdušnogo okhlazhdeniia [Air cooling apparatus control system]. *Patent RF No. 106310*, 2011.

22. Kriukov O.V., Repin D.G. Sistema upravleniia apparatami vozdušnogo okhlazhdeniia gaza [Device management system for self cooling gas]. *Patent RF No. 108511*, 2011.

23. Rubtsova I.E., Kriukov O.V., Babichev S.A. [et al.]. Upravlenie i monitoring elektroprivodov kompressornykh stantsii v usloviiakh stokhasticheskikh vozmushchenii [Management and monitoring of electric compressor stations in stochastic perturbation conditions]. *Trudy VI Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2010)*. Tula, 2010, pp. 209-215.

24. Serebriakov A.V., Kriukov O.V., Vasenin A.B. Nechetkie modeli i algoritmy upravleniia vetroenergeticheskimi ustanovkami [Fuzzy models and the wind power plant control algorithms]. *Materialy konferentsii "Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh"*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova. pp. 467-469.

25. Kriukov O.V., Kiianov N.V. Elektrooborudovanie i avtomatizatsiia vodooborotnykh sistem predpriatii s ventilatornymi gradirniami [Electrical equipment and automation of water circulation systems at enterprises with fan-cooling towers]. Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 260 p.

26. Kiianov N.V., Kriukov O.V., Pribytkov D.N. [et al.]. Kontseptsii razrabotki invariantnykh avtomatizirovannykh elektroprivodov dlia vodooborotnykh sistem s ventilatornymi gradirniami [Concept development of invariant automated electric drives for water circulation systems with cooling towers]. *Elektrotehnika*, 2007, no. 11, pp. 62-67.

27. Kriukov O.V. Prikladnye zadachi teorii planirovaniia eksperimenta dlia invariantnykh ob"ektov gazotransportnykh sistem [Applied tasks of experimental design theory for the invariant objects of gas transportation system]. *Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Identifikatsiia sistem i zadachi upravleniia (SICPRO'12)"*. Moscow: Institut problem upravleniia imeni V.A. Trapeznikova, 2012, pp. 222-236.

28. Kriukov O.V. Osobennosti invariantnogo upravleniia elektroprivodami pri stokhasticheskikh vozmushcheniiakh [Features of the invariant electrical control during the stochastic disturbances]. *Materialy VI nauchnoi konferentsii "Upravlenie i informatsionnye tekhnologii (UIT-2010)"*. Saint Petersburg: Kontsern "TsNII «Elektropribor», 2010, pp. 163-166.

29. Kriukov O.V. Regressionnyye algoritmy invariantnogo upravleniia elektroprivodami pri stokhasticheskikh vozmushcheniiakh [Regression algorithms of invariant electrical control in the case of stochastic disturbances]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 9, pp. 44-50.

30. Kriukov O.V. Proektirovanie invariantnykh sistem avtomaticheskogo upravleniia elektroprivodami gazotransportnykh sistem [Designing invariant systems by electric gas transportation systems]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiia i remont*, 2013, no. 12, pp. 22-24.

31. Kriukov O.V. Avtomatizirovannye elektroprivody dlia sistem okhlazhdeniia s ventiliatornymi gradirniami [Automated electric drives for cooling systems with cooling towers]. *Kompressornaia tekhnika i pnevmatika*, 2014, no. 8, pp. 25-31.

32. Kriukov O.V. Intellektual'nye elektroprivody s IT-algoritmami [Intellectual electrical drives with IT-algorithms]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 36-39.

33. Milov V.R., Suslov B.A., Kryukov O.V. Intellectual management decision support in gas industry. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72, no. 5, pp. 1095-1101.

34. Kriukov O.V. Strategii invariantnykh elektropri-vodov gazotransportnykh sistem [Strategy of the invariant electric gas transportation systems]. *XI mezhdunarodnyi simpozium "Intellektual'nye sistemy"*, 30 June - 4 July 2014. Moscow: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 2014, pp. 458-463.

35. Kriukov O.V., Stepanov S.E., Bychkov E.V. Invariantnye sistemy tekhnologicheski sviazannykh elektroprivodov ob"ektov magistral'nykh gazoprovodov [Invariant systems of technologically connected electric drives of main gas pipelines objects]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu, 7-9 October 2014*. Saransk: Mordovskii gosudarstvennyi universitet imeni N.P. Ogareva, 2014, vol. 2, pp. 409-414.

Сведения об авторе

Крюков Олег Викторович (Нижний Новгород, Россия) – доктор технических наук, доцент, главный специалист ОТД и НТИ АО «Гипрогазцентр» (603950, Н. Новгород, ГСП-926, ул. Алексеевская, 26, тел./факс. (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

About the author

Kryukov Oleg Victorovich (Nizhny Novgorod, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Associate Professor, Main Expert of Technical Documentation and STI Department JSC «Giprogazcenter» (603950, Nizhny Novgorod, 26, Alekseevskaya St., GSP-926, tel./fax.: (831)428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru).

Принято 20.04.2016