

ПРИНЦИПЫ ИНВАРИАНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

ЗАХАРОВ П.А., КРЮКОВ О.В., кандидаты техн. наук

Рассмотрены особенности функционирования электрооборудования компрессорных станций в условиях многофакторного воздействия случайных возмущений. Представлена методика реализации инвариантного управления электроприводами в рамках АСУ ТП, обеспечивающая учет и компенсацию возмущений различного характера. Приведен численный пример расчета регрессионных уравнений для управления АВО газа и результаты статистических исследований методами теории планирования эксперимента.

Ключевые слова: компрессорная станция; газоперекачивающий агрегат; аппарат воздушного охлаждения газа; автоматизированный частотно-регулируемый электропривод; случайные возмущения; инвариантная модель; статистический анализ.

PRINCIPLES OF THE INVARIANT ELECTRIC DRIVE CONTROL OF GAS TRANSMISSION SYSTEMS IN CASE OF RANDOM DISTURBANCES

P.A. ZAKHAROV, O.V. KRUKOV, Candidates of Engineering

The authors consider peculiarities of electrical equipment operation at compressor stations in case of multiple-factor influence of random disturbances. The article gives methodology of invariant control of electric drives within Automatic Process Control System which provides accounting and compensation of different disturbances. A numerical example of regression equation calculation to control gas air cooling unit is given. The results of statistic research by methods of experiment design theory are shown.

Key words: compressor station, gas-compressor unit, gas air cooling unit, automatic frequency-variable drive, random disturbance, invariant model, statistical analysis.

Эффективная и экономичная работа газотранспортной системы России в условиях сурового резкоконтинентального климата зависит от строгого соблюдения системных оптимальных технологий работы каждого локального объекта компрессорных станций (КС) [1]. Это в значительной степени определяется совершенством более 4 тыс. газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [1, 2] и 6 тыс. аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа [3], а также многочисленных систем водоснабжения и климатики помещений КС, которые в совокупности являются основными потребителями электроэнергии транспорта газа.

Анализ режимов и особенностей функционирования электроприводных ГПА, АВО, систем тепловентиляции и прочих механизмов с вентиляторной нагрузкой в реальных условиях показал, что рациональное применение автоматизированного частотно-регулируемого электропривода (АЭП) позволяет обеспечить высокие показатели транспорта газа, энерго- и ресурсосбережения, повысить надежность, долговечность работы оборудования и удобство обслуживания с диспетчерского поста АСУ КС [1, 4].

Однако АЭП всех механизмов и процессов газотранспортной системы функционирует в условиях, при которых момент нагрузки, скорость и многие технологические параметры не остаются постоянными, как принимается упрощенно [2, 3], а значительно изменяются во времени. Это обусловлено как факторами технологического характера (особенностями режимов газоподдачи, колебаниями механической нагрузки и переходными режимами), так и иными, внешними, воздействиями (метеороло-

гическими, рельефными, природными), которые носят преимущественно случайный характер (рис. 1). При этом коэффициент вариации для большинства процессов случайного нагружения АЭП велик и составляет 0,4–0,9; а энергетический частотный спектр их обычно заключен в диапазоне низких частот 0,01–4 Гц.

Поэтому АЭП в целях стабилизации выходных параметров (давления, подачи, температуры газа) на оптимальном уровне должен отрабатывать все изменения внешних параметров нагрузки в соответствии с требуемым законом управления и автоматически корректировать управляющие воздействия на механизм [4–6].

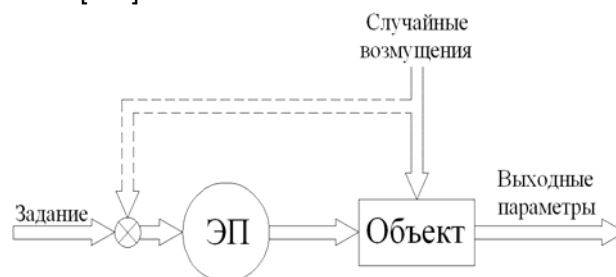


Рис. 1. Структура АЭП со случайными возмущениями

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 диаграм-

мой, для адекватного расчета основных параметров АЭП необходимо использовать статистические методы теории планирования эксперимента.

Исследования с привлечением аппарата теории вероятности показали [4–6], что процесс нагружения АЭП установок газотранспортной системы обычно распределен по закону Райса, плотность распределения которого определяется выражением

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

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 КС целесообразно использовать таблицы этих распределений.

Методология оптимизации параметров АЭП со случайной нагрузкой основана на статистических функциях распределения (1) конкретной системы механизма и методе регрессионного анализа. При этом, в зависимости от глубины предварительных статистических исследований, используются методы коэффициентов случайного действия, статистически упорядоченных диаграмм или статистически эквивалентной случайной величины.

Коррекцию воздействия совокупности стохастических возмущений на электрические и механические органы АЭП КС целесообразно организовать с применением инвариантной системы управления, адекватно учитывающей все частные влияния возмущений на объект [4–6]. Для этого все основные влияющие возмущения после формализации вводятся в закон управления электроприводом (рис. 1, пунктирная линия), обеспечивая адекватность задания момента и скорости текущему состоянию конкретного объекта КС.

Общими особенностями для данных АСУ ТП и требованиями к локальным установкам с частотно-регулируемыми АЭП в КС являются:

- 1) продолжительный режим работы $S1$ со спокойной нагрузкой;
- 2) стабильная работа при непрерывном и плавно изменяющемся воздействии нескольких независимых стохастических возмущений;
- 3) плавное регулирование скорости при нагрузке вентиляторного типа $M_{ст} \equiv \omega^2$;
- 4) необходимость стабилизации скорости вращения и/или момента АЭП;
- 5) большой суммарный момент инерции механизма и АЭП;
- 6) необходимость периодической работы на низких («ползучих») скоростях;

7) большая постоянная времени процессов в объекте, на несколько порядков превосходящая электромеханические постоянные времени АЭП;

8) высокая технико-экономическая эффективность при частотном регулировании;

9) повышенная надежность и живучесть работы;

10) интеграция локальных АЭП в АСУ КС и оптимизация их работы по критериям качества выходных технологических параметров.

Анализ рассмотренных требований показывает, что все они, за исключением второго, могут быть реализованы на основе современных серийных ПЧ и типового электрооборудования. Аппаратные средства позволяют интегрировать локальные микропроцессорные системы управления ЭГПА и АВО с системами диагностики, создавая технически законченные, многофункциональные и недорогие системы.

Однако реализация второго требования является определяющей и наиболее специфичной задачей, относя рассматриваемые АЭП к классу систем со случайными возмущениями, теоретическая и методологическая база для реализации которых практически отсутствует. Это предполагает применение для создания инвариантных АСУ АЭП и их формализации статистических методов, основанных на приложениях центральной теоремы теории вероятности, входящих в общую теорию планирования эксперимента. Действительно, все основные возмущения, воздействующие на рассматриваемые объекты, носят случайный характер, независимы друг от друга, и каждый из них вносит неопределяющую долю в общее изменение параметров. Поэтому искомые многопараметрические алгоритмы управления необходимо получить в виде нелинейных или линеаризованных регрессионных моделей с использованием матричных способов наименьших квадратов [2, 3].

Теоретическое обоснование. Метод регрессионного анализа целесообразно использовать в практике проектирования АЭП, когда:

- после проведения экспериментов имеются кривые или таблицы с числовыми значениями, характеризующими изменение регистрируемых признаков (полученные таким образом массивы информации обрабатываются на ПК);
- непосредственно в ходе эксплуатации системы управления сигналы, снимаемые с датчиков с определенной дискретностью, обрабатываются на управляющем промышленном компьютере.

При разработке новых АСУ ТП обработка исходных экспериментальных данных прототипа относится к задачам 1-го случая, а их анализ на действующем объекте – к задачам 2-го случая.

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

$$Y = Xa + \zeta, \quad (2)$$

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 (прочих факторов).

На рис. 2 приведена функциональная схема взаимодействия переменных реального объекта (механизма преобразования входных переменных в результирующие показатели – (1). Входные переменные $x^{(p)}$ (2) описывают условия функционирования и являются независимыми факторами-аргументами, предсказывающими (предикторными) и объясняющими поведение.

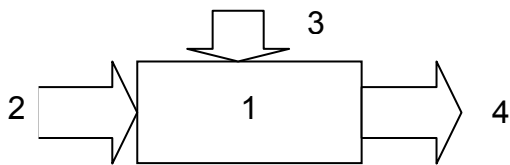


Рис. 2. Общая схема взаимодействия переменных при статистическом исследовании

Выходные переменные $y^{(n)}$ (4) характеризуют результат (эффективность) функционирования объекта и представляют собой зависимые (эндогенные) результирующие отклики. Неучтенные остаточные компоненты $\zeta^{(m)}$ (3) 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 итогам n измерений $\{[x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(p)}; y_i^{(1)}, y_i^{(2)}, \dots, y_i^{(n)}]\}, i = 1, 2, \dots, n,$ (3)

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

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

которая позволила бы наилучшим образом (в определенном смысле) 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 поставленные 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 технико-экономических показателей автоматизации (диапазона, плавности, точности регулирования, эффективности и окупаемости проекта) средствами АЭП;

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

Регрессионная модель (2) получается из (4) в результате обработки экспериментальной информации по методу наименьших квадратов [2], обеспечивающему высокую достоверность реального поведения системы. Алгоритм получения модели при этом следующий.

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 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:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= a_1 x_{11} + a_2 x_{12} + \dots + a_m x_{1m} + \zeta_1, \\ y_2 &= a_1 x_{21} + a_2 x_{22} + \dots + a_m x_{2m} + \zeta_2, \\ &\dots \\ y_n &= a_1 x_{n1} + a_2 x_{n2} + \dots + a_m x_{nm} + \zeta_n, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где a_1, a_2, \dots, a_m – определяемые параметры; $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$ – случайные составляющие 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 – $M\{\zeta_i\} = 0$. Из выражения (5) следует, что из-за неучтенных факторов и случайных помех измерения y будут отличаться от линейной зависимости.

Для удобства вычислительных процедур выражения (5) запишем в матричном виде (2), тогда вектора отдельных матриц можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{y} &= |y_1, y_2, \dots, y_n|^T; \quad \mathbf{a} = |a_1, a_2, \dots, a_m|^T, \\ \zeta &= |\zeta_1, \zeta_2, \zeta_n|^T, \\ \mathbf{X} &= \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix}. \end{aligned} \right\}$$

Для определения математической модели АЭП объекта с возмущениями 2-го рода в виде линейной регрессии необходимо использовать один из трех способов преобразований (6) [6].

Наиболее удобным и точным способом получения регрессионных моделей для круга задач с реальными случайными возмущениями является следующий подход. Модель линейной регрессии на основании выражений (2)–(6) представляется в виде

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\mathbf{a}, \tag{7}$$

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

$$F(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^n (y_i - a_1x_{i1} - a_2x_{i2} - \dots - a_mx_{im})^2. \tag{8}$$

При наличии в линейной регрессии свободного члена целесообразно сначала вычислить средние арифметические значения:

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

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

$$\left. \begin{aligned} x'_{ij} &= x_{ij} - \bar{x}_j, \\ y'_i &= y_i - \bar{y}_j, \end{aligned} \right\}$$

где $j = 1, 2, \dots, k$ (при $k = m - 1$); $i = 1, 2, \dots, n$.

Из соотношения (8) найдем

$$F(\mathbf{a}) = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{a})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\mathbf{a}). \tag{9}$$

Для определения из (9) значений \mathbf{a} , при которых функция $F(\mathbf{a})$ будет минимальной, продифференцируем (9) при $\text{rank } \mathbf{X} = m$:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}. \tag{10}$$

Матрицу $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ в (10) вычисляем в системе

$$\left. \begin{aligned} &\sum_{i=1}^n x_{i1}^2 && \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} && \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i3} && \dots && \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{im}, \\ &\sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i1} && \sum_{i=1}^n x_{i2}^2 && \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{i3} && \dots && \sum_{i=1}^n x_{i2}x_{im}, \\ &\sum_{i=1}^n x_{i3}x_{i1} && \sum_{i=1}^n x_{i3}x_{i2} && \sum_{i=1}^n x_{i3}^2 && \dots && \sum_{i=1}^n x_{i3}x_{im}, \\ &\vdots && \vdots && \vdots && \vdots && \vdots \\ &\sum_{i=1}^n x_{im}x_{i1} && \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i2} && \sum_{i=1}^n x_{im}x_{i3} && \dots && \sum_{i=1}^n x_{im}^2. \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

Матрица (11) является симметричной, и нахождение вектора \mathbf{a} сводится к обращению матрицы меньшего порядка $m - 1$, а свободный член вычисляется по формуле

$$a_m = \bar{y} - \sum_{j=1}^k a_j \bar{x}_j.$$

В результате получаем искомое выражение

$$\hat{\mathbf{y}} = a_m + \sum_{j=1}^k a_j x_j. \tag{12}$$

Инвариантные модели АЭП АВО газа.

В качестве примера рассмотрим методологию оптимизации инвариантного управления АЭП АВО газа, являющихся главными потребителями электроэнергии в газотранспортной системе [3]. Поскольку охлаждение газа является энергоемким процессом (до 70 % расхода КС), а мощность, потребляемая АВО, составляет сотни киловатт, энергосберегающее регулирование является актуальной задачей. Величина температуры охлажденного газа на выходе АВО существенно влияет на работу всех систем КС и состояние трубопроводов. Поэтому точная стабилизация температуры охлажденного газа в условиях реализации графика газоподачи и изменений нескольких случайных воздействий определяет эффективность функционирования производственного цикла всей КС.

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

- температуры окружающего воздуха θ , изменяющейся в диапазоне ± 40 °С;
- его влажности $\beta = 30-100$ %;
- температуры газа на входе или перепада температур компримирования $\Delta t = 15$ °;
- массового расхода газа (подачи газопровода) Q обычно в диапазоне 2:1.

Действительно, все эти возмущения на АВО газа имеют стохастический характер, независимы друг от друга, и каждый из них вносит неопределяющую долю в общее изменение состояния. Поэтому искомые многопараметрические алгоритмы получены в виде нелинейных и линеаризованных моделей регрес-

сии с использованием матричных способов наименьших квадратов.

Так как скорость вращения ω вентилятора АВО задается в условиях случайного изменения всех параметров, для получения стабильной температуры охлажденного 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:

$$\omega_3 = f(\Delta t, \theta, \beta, Q); \quad (13)$$

- 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

$$\omega_3 = K(a_1 \Delta t + a_2 \theta + a_3 \beta + a_4 Q) \quad (14)$$

или

$$\omega_3 = A \Delta t^{a_1} \beta^{a_2} \theta^{a_3} Q^{a_4}, \quad (15)$$

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

Например, в результате анализа массивов численных данных АВО газа с АЭП по системе ПЧ-АД мощностью $P_{\text{ном}} = 90$ кВт, работающего на вентилятор по закону $UIf^2 = \text{const}$, с использованием программных средств Mathcad и выражений (7)–(12) получены следующие искомые управляющие функции:

- для линеаризованной 2-факторной модели $\omega_2 = 3,8\theta + 0,38\beta + 30,99;$ (16)

- для линеаризованной 4-факторной модели $\omega_4 = 12,21\Delta t + 9,20\theta + 0,22\beta - 0,22Q + 9,6.$ (17)

При формализации зависимостей $\omega = f(\theta, \beta)$ показательных степенных функций (15) искомые регрессионные модели имеют вид

$$\omega_4' = 61,33 \Delta t^{1,01} \beta^{0,12} \theta^{0,40} Q^{-0,3}. \quad (18)$$

Аналогично получается нелинейная 2-факторная регрессионная модель:

$$\omega_2' = 43,82 \beta^{0,08} \theta^{0,24}. \quad (19)$$

Статистический анализ регрессионных алгоритмов управления АЭП. Анализ сходимости результатов моделирования для 4-факторных моделей (рис. 3) показал, что обе регрессионные модели (17) и (18) обеспечивают достаточную точность инвариантного задания ω_3 во всем диапазоне изменения возмущений. Поэтому для расчета ω_3 целесообразнее использовать более простое линеаризованное уравнение (17). Аналогичный вывод – в отношении 2-факторных моделей (16) и (19).

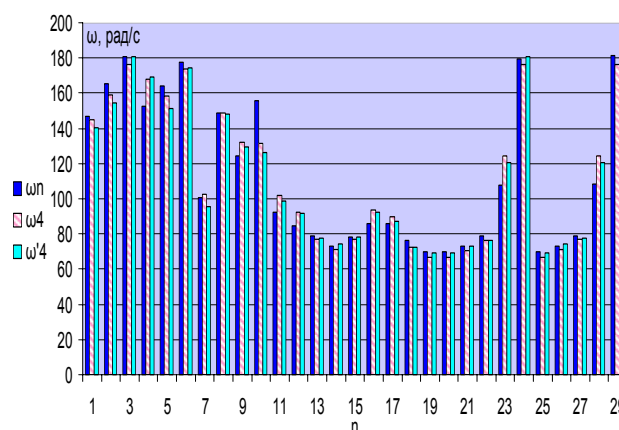


Рис. 3. Гистограммы моделирования 4-факторных регрессий

Численные значения полученных данных для индивидуальных АВО газа необходимо проанализировать в рамках общей теории планирования эксперимента методами корреляционного, дисперсионного, факторного и ковариационного анализа [6]. Положительный результат подтверждает корректность расчетов алгоритмов.

Однако особенностью систем управления АЭП АВО по возмущению является то, что управляющий сигнал зависит от внешних воздействий и уменьшает влияние их на выходную величину объекта путем компенсации. При этом строго учесть и точно измерить все случайные возмущения невозможно, и для точной стабилизации температуры t_2 необходимо реализовать комбинированную САР [4] АЭП АВО с отрицательной обратной связью по параметру t_2 (рис. 4).

В результате проведенного регрессионного анализа определили аналитические выражения связи, в которых изменение результативного признака (ω вентилятора или t_2 газа) обусловливается влиянием нескольких факторных признаков (метеорологических и технологических), а множество прочих факторов принимается за постоянные величины. Тогда после получения моделей необходимо проверить правильность учета факторных признаков, установить, имеется ли связь между переменными, и оценить тесноту и структуру этой связи. Это задачи корреляционного, ковариационного, факторного и дисперсионного анализа.

Корреляционный анализ необходим для исследования структуры и статистической тесноты связи между переменными. Этапы корреляционного анализа следующие:

- выбор подходящего 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 0;

– анализ структуры связей между компонентами многомерного признака.

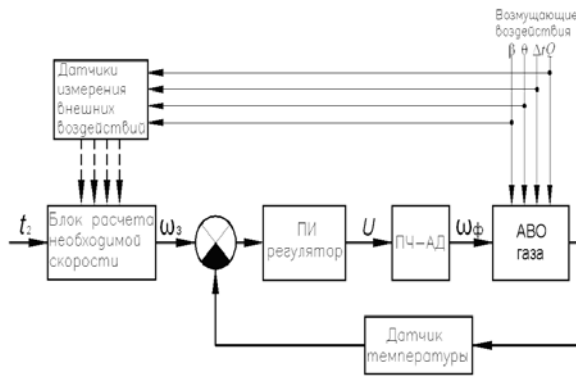


Рис. 4. Схема комбинированной САР АЭП АВО газа

При анализе регрессионных алгоритмов АЭП целесообразны линейные инвариантные алгоритмы управления. Автокорреляционные функции сигналов входных X и выходных Y данных дают представление о скорости их изменения, оценку среднестатистической зависимости текущих отсчетов сигнала от своих предыдущих и последующих значений («радиус корреляции»), а также определяют наличие в сигнале периодически повторяющихся элементов.

Однако более информативную, наглядную оценку связей между двумя различными процессами и описание степени сходства формы сигналов с их взаимным расположением дает взаимокорреляционная функция (ВКФ). Для полученного выше регрессионного алгоритма (14) на рис. 5 представлены результаты расчетов ВКФ для парных сочетаний взаимовлияющих параметров скорости вентилятора, температуры и влажности воздуха.

Амплитуда колебаний ВКФ указывает на существенную зависимость выходного сигнала ω АЭП от входных θ и β , что соответствует реальности. Незначительное взаимовлияние возмущений θ и β позволяет принять их независимыми. Интервал корреляции, в пределах которого наблюдается статистическая связь между процессами, составляет несколько десятков отсчетов, и поэтому процессы являются стационарными и эргодичными.

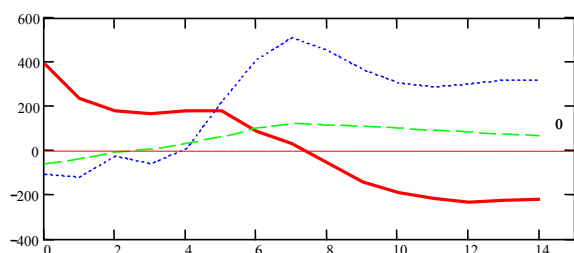


Рис. 5. ВКФ параметров АЭП АВО газа: — — $C\theta\omega$; — — — $C\beta\omega$; — — — $C\theta\beta$

Если между случайными величинами существует стохастическая связь, то одним из параметров, характеризующих меру этой связи, является ковариация – среднее произведение отклонений точек от средних значений.

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, малые значения одного набора связаны с большими значениями другого (отрицательная ковариация), или данные двух диапазонов никак не связаны (ковариация близка к нулю).

Функция MathCAD $cvar(A,B)$ вычисляет значения выборочной ковариации. В нашем случае значения ковариаций следующие:

$$cvar(\omega, \theta) = 393,911;$$

$$cvar(\omega, \beta) = 108,018;$$

$$cvar(\theta, \beta) = -59,517.$$

Эти данные подтверждают наличие связи между скоростью вращения АЭП и величиной температуры окружающего воздуха, а также отсутствие взаимного влияния температуры и влажности воздуха, что позволяет считать каждый из этих параметров независимым случайным фактором внешнего воздействия.

Функция MathCAD $corr(A,B)$ определяет парный коэффициент корреляции Пирсона, который для двухфакторных регрессионных уравнений (17) АЭП составляет:

$$corr(\omega, \theta) = 0,932;$$

$$corr(\omega, \beta) = -0,147;$$

$$corr(\theta, \beta) = -0,32.$$

Низкий коэффициент корреляции (менее $\pm 0,10$) означает, что связь между переменными слаба или вовсе отсутствует. Высокий коэффициент корреляции (ближе к +1 или 1) показывает, что зависимая переменная обычно изменяется при изменении 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 соотносит искомые модели экспериментальным данным по критерию Фишера путем сравнения дисперсии адекватности и дисперсии уровня относительно среднего. По значениям критерия Фишера, полученным для регрессионных уравнений (17) и (18), соответственно $F_n = 9,3$ и $F_n = 2,9$, можно сделать вывод о том, что большей точностью обладает линеаризованная модель (17). При уровне значимости $\alpha = 0,05$ значение критерия Фишера для имеющихся степеней свободы $f_1 = f_2 = 26$ составляет менее 1,95, что позволяет судить об адекватности обеих моделей.

Список литературы

1. **Захаров П.А., Захаров М.А.** К вопросу повышения надежности электроприводного газоперекачивающего агрегата: Тр. V Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. – СПб., 2007. – С. 495–496.
2. **Аникин Д.А., Зуйков А.В., Крюков О.В.** Энергосбережение в электроприводе турбокомпрессора газоперекачивающего агрегата: Тр. IV Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. Ч. II. – Магнитогорск, 2004. – С. 241–243.
3. **Аршакян И.И., Тримбач А.А.** Повышение эффективности работы установок охлаждения газа // Газовая промышленность. – 2006. – № 12. – С. 52–55.
4. **Киянов Н.В., Крюков О.В., Блинов М.В.** Методология оптимизации инвариантного управления электроприводом в условиях стохастических возмущений: Тр. V Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. – СПб., 2007. – С. 54–57.
5. **Киянов Н.В., Крюков О.В., Прибытков Д.Н.** Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градирнями // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 62–68.
6. **Крюков О.В., Киянов Н.В.** Электрооборудование и автоматизация водооборотных систем предприятий с вентиляторными градирнями: Монография / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Нижний Новгород, 2007.

Захаров Петр Алексеевич,
Управление по сопровождению эксплуатации объектов ЕСГ ДООАО «Оргэнергогаз»,
начальник, кандидат технических наук,
адрес: г. Москва, ул. Луганская, д. 11,
телефон (495) 355-91-90.

Крюков Олег Викторович,
ООО «Интермодуль»,
технический директор, кандидат технических наук,
адрес: г. Нижний Новгород, ул. Ломоносова, д. 9,
телефоны: (831) 2-184-183, 2-189-203.