

3. Для демпфування високочастотних коливань, що виникають у контурі, утвореному паразитною ємністю транзистора та резонансною індуктивністю, доцільно шунтувати транзистор зворотнім діодом.

#### Список використаних джерел

1. Tomioka S. A zero-current-switched quasi-resonant boost converter in power factor correction application / S. Tomioka, S. Abe, M. Shoyama, T. Ninomiya, E. Firmansyah // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2009, Twenty-Fourth Annual IEEE, February 6. – P. 5.
2. Ли Ф. К. Высококачественные квазирезонансные преобразователи. ТИИЭР / Ф. К. Ли // Энергетическая электроника / под ред. В. А. Лабунцова. – М.: Мир, 1988. – № 4. – Т. 76. – С. 83-97.
3. Денисов Ю. О. Розрахунок інтегральної потужності розсіювання в силових ключах ПП / Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. М. Зозуля // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”: наук. зб. – Чернігів: ЧДТУ, 2009. – № 40. – С. 388 с.
4. Денисов Ю. О. Моделирование процессов коммутации в КРИП ПНТ с учетом паразитных параметров / Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. В. Савченко // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 1. – С. 87-90.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
6. Денисов Ю. О. Особливості роботи та статичні характеристики КРП-ПНС паралельного типу / Ю. О. Денисов, О. М. Городній, О. А. Купко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки”: наук. зб. – Чернігів: ЧДТУ, 2012. – № 1 (55). – С. 247-253.

УДК 004.852:681.516.77

**К.К. Кадомский**, мл. науч. сотруд.

Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина

**А.Л. Красников**, инж. I кат.

Институт прикладной математики и механики НАН Украины, г. Донецк, Украина

### ПРИМЕНЕНИЕ ИНКРЕМЕНТНЫХ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ ВЫДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПАРОВОДЯНОГО ТРАКТА ЭНЕРГОБЛОКА СКД

*Рассматривается задача синтеза регулятора охлаждающих впрысков в пароводяной тракт энергоблока СКД. Предложен алгоритм синтеза ПИ-регулятора впрыска для отдельных режимов функционирования. Рассмотрена задача нечеткой кластеризации, предложен инкрементный алгоритм, на основе которого выделены отдельные режимы функционирования энергоблока в реальном времени. Предложен и реализован алгоритм настройки параметров ПИ-регулятора на основе данных измерений мощности, давления и расхода пара. Выполнен численный эксперимент на основе данных измерений энергоблока СКД 300 МВт при нагрузке 150-300 МВт.*

**Ключевые слова:** энергоблок СКД, билинейная система, настройка регулятора, нечеткая кластеризация, расстояние Махаланобиса.

*Розглядається задача синтезу регулятора охолоджуючих впорсків у пароводяний тракт енергоблоку НКТ. Запропоновано алгоритм синтезу ПІ-регулятора впорску для окремих режимів функціонування. Розглянуто завдання нечіткої кластеризації, запропоновано інкрементний алгоритм, на основі якого можна виділити окремі режими функціонування енергоблоку в реальному часі. Запропоновано та реалізовано алгоритм настроювання параметрів ПІ-регулятора на основі даних вимірювань потужності, тиску і витрати пару. Виконано чисельний експеримент на основі даних вимірювань енергоблоку НКТ 300 МВт при навантаженні 150-300 МВт.*

**Ключові слова:** енергоблок НКТ, білінійна система, настроювання регулятора, нечітка кластеризація, відстань Махаланобіса.

*The problem of synthesis of spray attemperation controller in water-steam circuit of supercritical pressure power plant was reviewed. An algorithm for the synthesis of PI-controller of spray attemperation for separate operation mode is proposed. The problem of fuzzy clustering is reviewed incremental algorithm which can be used in real-time operational conditions separation is proposed. An algorithm of gain scheduling of the PI-controller based on power, pressure and steam flow measurements is proposed and implemented. The numerical experiment with measurement data of supercritical pressure power plant at a load of 150-300 MW is carried.*

**Key words:** supercritical pressure power plant, bilinear system, gain scheduling, fuzzy clustering, Mahalanobis distance.

**Введение.** Котел энергоблока сверхкритического давления (СКД) 300 МВт в основных режимах работы имеет паропроизводительность до 1000 т/ч острого пара темпера-

туры 545 °С при давлении до 255 кгс/см<sup>2</sup>. Коррекцию температуры острого пара выполняет система управления охлаждающими впрысками, которые должны обеспечить нормативную температуру с точностью ±5 °С [1]. Тем не менее, существующие системы управления не всегда способны выдерживать заданную температуру, что часто приводит к аварийным остановкам энергоблока [2]. При этом возникающий перегрев значительно снижает ресурс пароперегревателей.

При синтезе регулятора нужно учитывать нестационарный и нелинейный характер процесса перегрева пара, так как параметры теплообмена изменяются в процессе функционирования энергоблока [3; 4]. Более того, в процессе функционирования может изменяться коэффициент теплоотдачи при возникновении отложений на стенках пароперегревателя.

В работе рассматривается задача построения системы управления охлаждающими впрысками энергоблока СКД, которая включает подсистему настройки регулятора согласно текущему режиму функционирования блока. Для выделения режимов применен инкрементный алгоритм кластеризации, что снижает вычислительную нагрузку и позволяет использовать кластеризацию в реальном времени.

**Модель пароводяного тракта высокого давления.** Процесс нагрева пара в общем случае описывается набором дифференциальных уравнений в частных производных: уравнение сплошности, энергетическое уравнение, уравнение движения [3; 4]. С учетом существующей системы измерений, моделирование и параметрическая идентификация целесообразны только для энергетического уравнения:

$$c\rho\Delta V \frac{Dt(\tau, x)}{d\tau} = \alpha\Delta\tilde{S}(t^m(\tau, x) - t(\tau, x)), \quad (1)$$

где  $t, t^m$  – температура пара и металла паропроводов (как функция времени  $\tau$  и координаты  $x$  по длине паропровода);

$c, \rho$  – теплоемкость и плотность пара соответственно, рассчитанные при текущей температуре и давлении;

$\Delta V$  – единица объема ( $\Delta V = S\Delta x = \frac{\pi}{4}d^2\Delta x$ , где  $d$  – внутренний диаметр паропровода,  $\Delta x$  – единица длины);

$\frac{Dt}{d\tau}$  – полное изменение температуры (рассматривая только изменение по времени и

длине паропровода), представим в виде  $\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{dx}{d\tau} \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{dt}{d\tau}$ , где  $w_x$  – скорость

движения среды по координате  $x$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

$\Delta\tilde{S}$  – элемент площади поверхности теплообмена ( $\Delta\tilde{S} = \pi d\Delta x$ ).

В более детальном представлении уравнение (1), запишем в виде:

$$c\rho S \frac{\partial t(\tau, x)}{\partial \tau} + cG \frac{\partial t(\tau, x)}{\partial x} = \alpha\pi d(t^m(\tau, x) - t(\tau, x)), \quad (2)$$

где  $G = \rho\Delta V w_x$  – расход пара.

Для расчета параметров пара  $c, \rho$  использованы соотношения, предложенные «Международной ассоциацией по свойствам воды и водяного пара» (IAPWS) [5], в справочнике IAPWS-IF97 имеется библиотека программ на языке С, в которой реализованы функции расчета всех необходимых параметров.

Теплообмен в коллекторе впрыска описывается уравнением смешения. Упрощенно, данное уравнение можно рассматривать как:

$$G_n h_n + G_g h_g = (G_n + G_g) h_{cm}, \quad (3)$$

где  $G_n, G_g$  – расходы пара и воды на впрыск соответственно,  $h_n, h_g, h_{cm}$  – энтальпия пара, воды на впрыск и пароводяной смеси соответственно.

Связь между температурой и энтальпией в пароводяной смеси опишем уравнением  $h = c(t, p)t$  [3].

В задаче управления выделим следующие величины:

- вектор состояния  $x = (t_1 \ t_2 \ \dots \ t_M)^T$  – температура пароводяной смеси;

- управляемый вход (управление)  $u = (G_1, G_2)^T$  – расходы на впрыск;

- неуправляемый вход (возмущение)  $w = (t_0 \ t_1^M \ t_2^M \ \dots \ t_M^M)^T$  – температура пара на входе в пароперегреватель и температура металла теплообменника.

Вводя разбиение по длине паропровода на  $M$  точек и пренебрегая перепадом температур на отдельном участке пароводяного тракта, заменим в (2) частную производную конечно-разностной аппроксимацией. В выбранной точке  $i$ , соответствующей впрыску, дополним полученное уравнение уравнением смешения (3), которое запишем в виде [3]:

$$t_i^{cm} = t_i - \frac{h(t_i) - h_g}{c} \frac{G_g}{G + G_g}.$$

В таком случае исходная система может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + N(x)u + Bu + Dw; \\ y &= Cx. \end{aligned} \tag{4}$$

С матрицами коэффициентов:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{G}{\Delta l \rho S^c} - \frac{\alpha \pi d}{c \rho S^c} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \frac{G}{\Delta l \rho S^c} & -\frac{G}{\Delta l \rho S^c} - \frac{\alpha \pi d}{c \rho S^c} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{G}{\Delta l \rho S^c} & -\frac{G}{\Delta l \rho S^c} - \frac{\alpha \pi d}{c \rho S^c} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & \frac{h_1 - h_g}{c \Delta l S^c} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}^T \\ C &= (0 \ \dots \ 0 \ 1) \\ D &= \begin{bmatrix} \frac{G \Delta \tau}{\rho S \Delta x} & \frac{\pi d \Delta \tau}{c \rho S} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi d \Delta \tau}{c \rho S} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\pi d \Delta \tau}{c \rho S} \end{bmatrix} \\ N(x) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{\Delta l \rho S^c} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\Delta l \rho S^c} & -\frac{1}{\Delta l \rho S^c} \end{bmatrix} x. \end{aligned} \tag{5}$$

Данная модель является билинейной – частным случаем нелинейной системы вида  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ .

Задача управления билинейными системами поставлена в 60-х годах XX века [6]. Часть методов, предложенных для решения задачи синтеза регулятора, предусматривают локальную либо глобальную линеаризацию и дальнейший синтез регулятора результирующей линейной системы. Такие методы просты, однако не всегда применимы: локальная линеаризация требует постоянного пересчета коэффициентов линейной системы и соответствующего регулятора при смене режимов работы, а глобальная линеаризация требует точного знания коэффициентов модели.

**Синтез ПИ-регулятора впрыска.** При построении системы управления впрыском представим сегмент пароводяного тракта в виде нестационарной билинейной системы и выполним синтез ПИ-регулятора на ограниченном множестве состояний. В данном случае процедура синтеза, основанная на прямом методе Ляпунова, гарантирует устойчивость системы на границах выпуклого многоугольника, задающего множество возможных параметров системы [7].

Для билинейной системы (4)-(5) построим регулятор:

$$u = K_p(x - x^*) + K_I \int (y - y^*) d\tau, \quad (6)$$

решая систему матричных неравенств:

$$Q > 0 \quad (7)$$

$$AQ + QA^T + (N(x_{(i)}) + B)W + W^T(N(x_{(i)}) + B)^T + 2\gamma Q < 0 \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x(0)^T \\ x(0) & Q \end{bmatrix} \geq 0, \begin{bmatrix} Q & W^T \\ W & \mu^2 I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (9)$$

где матричные неравенства задают: (7) – положительно определенную матрицу функции Ляпунова ( $V(x) = x^T P x, Q = P^{-1}$ ), (8) – условие устойчивости системы с ограничением на скорость переходного процесса  $\gamma$ , (9) – ограничения управления  $\|u\|_Q \leq \mu$ .

Решая систему матричных неравенств (7)-(9) в отдельном режиме для ограниченного множества входных температур, найдем коэффициенты  $(K_p \quad K_I)^T = WQ^{-1}$  ПИ-регулятора, обеспечивающего заданные свойства [8].

Однако следует учитывать, что такая процедура не гарантирует существования регулятора с заданными свойствами на всем множестве параметров. Так, возможно возникновение значительного перерегулирования в отдельных режимах.

Одним из вариантов построения системы управления нестационарными и нелинейными объектами является реализация отдельного контура настройки коэффициентов регулятора. Так как непосредственная адаптация и пересчет коэффициентов в реальном масштабе времени затруднительны, то типичный подход к построению системы регулирования заключается в синтезе системы с настройкой коэффициентов регулятора (gain scheduling) [9]. Данный подход встречается в литературе 70-х годов, однако только в 90-х данный подход начал активно развиваться [10; 11].

При таком подходе синтез системы управления заключается в следующем [11]:

1. Выполнить линеаризацию исходной нелинейной системы для набора точек  $\omega_i, i=1..p$ , задающих параметры системы:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\omega_i)x + B(\omega_i)u; \\ y &= C(\omega_i)x, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\omega_i$  – переменная, по которой производится настройка регулятора. Основная сложность данного шага заключается в выборе переменной, по которой будет выполняться выбор регулятора.

2. Выполнить синтез  $\rho$  регуляторов линейных систем (10) для отдельных режимов работы. В данном случае используется приведенный выше алгоритм синтеза регулятора линейной системы.

3. Построить нелинейный регулятор, который выполняет интерполяцию или переключение между полученными регуляторами. Использование системы переключения между регуляторами зачастую связано с конструктивными особенностями системы и не дает гладкого управления [12]. Следует отметить, что использование интерполяции может при определенных условиях ухудшить динамические свойства системы [11].

4. Экспериментально проверить работоспособность системы.

Функционирование сегмента пароводяного тракта непосредственно связано с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , который зависит от текущего расхода пара и режима сгорания. Фактически существует зависимость коэффициента теплоотдачи от мощности энергоблока ( $N$ , МВт), расхода ( $G$ , кг/с) и давления пара ( $P$ , кгс/см<sup>2</sup>) вида  $\alpha = g(N, P, G)$ . Введение температур пароводяной смеси и металла труб нецелесообразно ввиду того, что изменения температуры в нормативных режимах обычно происходят в небольшом диапазоне и незначительно влияют на коэффициенты (5) системы (4). Непосредственно коэффициент теплоотдачи определяет набор коэффициентов ПИ-регулятора в текущем режиме  $K = H(\alpha)$ . Контур настройки коэффициентов фактически должен реализовать суперпозицию функций  $K = f(N, P, G)$  и на основе текущих измерений рассчитывать коэффициенты регулятора (рис. 1).

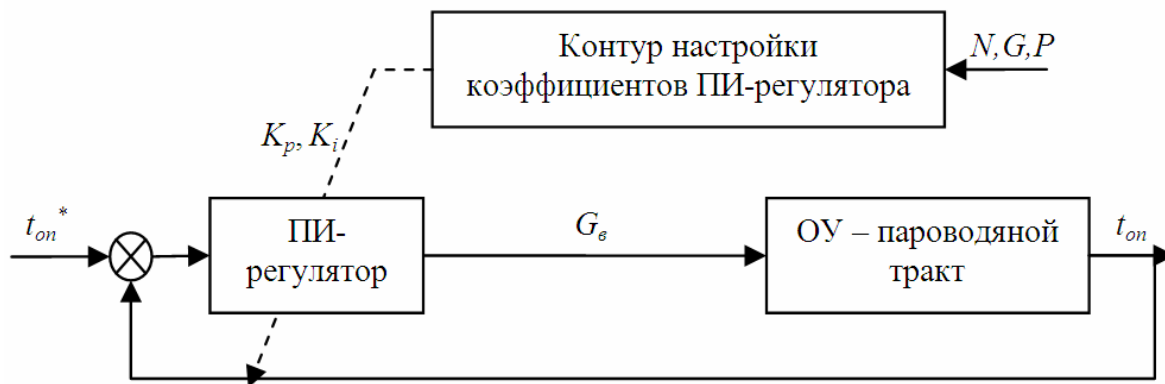


Рис. 1. Система настройки коэффициентов ПИ-регулятора впрыска

**Формальная постановка задачи выделения режимов функционирования.** Имеется конечный набор входных образов  $\omega = (N, P, G) \in \Omega \in R^3$  – значений датчиков, которые характеризуют текущий режим функционирования энергоблока. Необходимо построить разбиение множества входных образов на подмножества (кластеры), которые будут соответствовать различным режимам.

Входные образы предъявляются по одному, и для каждого нового образа  $\omega_i$  необходимо: а) построить нечеткое разбиение  $\Omega$  на кластеры по данным  $\{\omega_1, \dots, \omega_i\}$ ; б) определить степень принадлежности  $\omega_i$  каждому из кластеров.

В системах управления и поддержки принятия решений задача кластеризации данных динамических измерений имеет следующие особенности. Во-первых, обработка данных должна производиться в режиме он-лайн, т. е. элементы обучающей выборки подаются по одному, и в каждый момент времени доступна лишь часть обучающей вы-

борки. Во-вторых, количество кластеров не может быть оценено заранее. В-третьих, предъявляются жесткие требования к временной сложности алгоритма кластеризации.

В подобных задачах итеративные методы кластеризации, такие как EM-алгоритм, не применимы [13; 14]. Инкрементные алгоритмы [13; 14; 15] рассматривают каждый входной образ  $\omega_l$  независимо, используя его для модификации текущей модели классификатора  $\Theta = (M, \theta(C_1), \dots, \theta(C_M))$ , где  $\theta(C_k)$  – статистическая модель кластера  $C_k$ , согласно инкрементным соотношениям вида  $\Theta' = F(\Theta, \omega_l)$ . Инкрементные алгоритмы, как правило, не являются итеративными (обрабатывают входные образы либо окна однократно) и не требуют хранения в памяти всей обучающей выборки. Поэтому они имеют меньшую временную и емкостную сложность, по сравнению с EM-алгоритмом. В отличие от итеративных методов, они не требуют выбора начальных значений параметров модели, не требуют дополнительной памяти и многократной обработки обучающей выборки.

Однако существующие инкрементные алгоритмы либо не адаптированы к обработке нечетких входных данных [15; 16; 17], либо не поддерживают сложные нечеткие и статистические модели, учитывающие форму кластеров [18; 19]. Также их недостатком является проблема соотношения стабильности – пластичности обучения. Качество кластеризации существенно зависит от выбора типа модели и оценки расстояния между моделями.

Инкрементный алгоритм жесткой кластеризации известен как алгоритм ведущего кластера (Sequential Leader Clustering) [14; 16] и широко применяется в задачах сжатия обучающей выборки, обучения ИНС и нейроподобных сетей. В качестве модели кластера используется пара  $\theta(C_k) = \langle w_k, m_k \rangle$ , где  $w_k$  – мощность кластера, и  $m_k = E(C_k)$  – центроид. Каждый входной образ  $\omega_l$  либо относится к одному из существующих кластеров  $C_k$ , либо служит прототипом нового кластера. Данный алгоритм также обобщен на случай нечеткой кластеризации [17; 19].

Качество кластеризации существенно зависит от выбора типа модели и оценки расстояния между моделями. В качестве модели распределения наиболее часто используется пара  $\langle E(C), \text{cov}(C) \rangle$ , где  $E(C)$  – матожидание (центроид),  $\text{cov}(C)$  – ковариация. Реже вместо матожидания и ковариации используются мода и вариация относительно моды, что позволяет уменьшить чувствительность алгоритма к случайным выбросам.

В простейшем случае расстояние между моделью  $C$  и точкой  $\omega$  есть расстояние (евклидово, манхэттенское, либо расстояние Чебышева) между точками  $E(C)$  и  $\omega$ . Для учета размера и формы кластеров используются нормализованное евклидово расстояние и расстояние Махаланобиса [20; 21].

**Нечеткая инкрементная кластеризация.** Каждому входному образу и каждому нечеткому кластеру ставится в соответствие статистическое распределение  $C$  элементов данного нечеткого множества. Распределение  $C$  задается параметрической моделью  $\theta(C) = (w, m, S)$ , где  $w(C)$  – количество наблюдений элементов  $C$ ;  $m = E(C)$  – оценка математического ожидания распределения  $C$ ;  $S = \text{cov}(C)$  – оценка его матрицы ковариации.

Оценка параметров модели кластера  $\theta(C) = (w, m, S)$  выполняется на основе последовательных динамических наблюдений элементов этого кластера  $\{\omega_r | \mu(\omega_r)\}_{r=1}^N$ , где  $\omega_r \in \Omega$  –  $r$ -е наблюдение;  $\mu(\omega_r)$  – степень уверенности, в том, что  $\omega_r \in C$ . Наблюдения обрабатываются по одному, и на каждом шаге производится уточнение оценки параметров, полученной на предыдущем шаге с учетом нового наблюдения. В отличие от итеративных методов, данный метод не требует выбора начальных значений параметров модели, не требует дополнительной памяти и многократной обработки обучающей выборки.

Поскольку параметр  $w$  есть мощность множества наблюдений, отнесенных к кластеру, то

$$w_N = \sum_{r=1}^N \mu(x_r). \quad (11)$$

Для каждого  $k = \overline{1, N}$  функция плотности распределения  $C$  на выборке  $\{x_r | \mu(x_r)\}_{r=1}^k$  есть

$$p_C(x) = \mu(x) / \sum_{r=1}^k \mu(x_r), \quad x \in \{x_1, \dots, x_k\}.$$

Обозначим  $p_r = p_C(x_r)$ . Выборочные оценки параметров  $m$  и  $S$  на этой выборке есть соответственно:

$$m_k = \sum_{r=1}^k x_r p_r; \quad (12)$$

$$S_{kij} = \sum_{r=1}^k (x_{ri} - m_{ki})(x_{rj} - m_{kj}) p_r, \quad i, j = \overline{1, N_f}. \quad (13)$$

Обозначим  $m = m_{k-1}$  и  $S = S_{k-1}$ ;  $m' = m_k$  и  $S' = S_k$ . Применяя к (12) условие нормировки  $\sum_{r=1}^k p_r = 1$ , для оценки  $m$  получим

$$m' = m \sum_{r=1}^{k-1} p_r + x_k p_k = (1 - p_k)m + p_k x_k.$$

Для оценки  $S$  путем преобразований (13) получим

$$\begin{aligned} S'_{ij} &= (1 - p_k)S_{ij} + p_k(1 - p_k)(x_{ki} - m_i)(x_{kj} - m_j) = \\ &= \left(1 - \frac{\mu(x_k)}{w_k}\right) \left(S_{ij} + \frac{\mu(x_k)}{w_k}(x_{ki} - m_i)(x_{kj} - m_j)\right). \end{aligned}$$

**Алгоритм кластеризации.** Данный алгоритм использует модификацию расстояния Махаланобиса для оценки степени принадлежности входного образа кластеру и инкрементные соотношения для выборочной оценки параметров модели кластера. Алгоритм кластеризации имеет следующий вид.

1. Инициализировать модель первого кластера параметрами первого входного образа  $\Theta = (1, \theta(\omega_1))$ .

2. При получении нового входного образа  $\omega$  для каждого кластера вычислить расстояние по формуле:

$$d_{M^*}(C, \omega) = \sqrt{(\omega - m)^T (I + \gamma^{-2} S)^{-1} (\omega - m)}, \quad \gamma > 0. \quad (14)$$

Расстояние (14) является модификацией расстояния Махаланобиса между моделью распределения и точкой, которая сохраняет обычное евклидово расстояние в случае одноточечного распределения.

3. Если все расстояния превышают заданный порог  $d_{\max}$ , то добавить новый кластер  $\theta(\omega)$  и перейти на шаг 2.

4. Вычислить степени принадлежности входного образа каждому из кластеров

$$\mu_{C_k}(\omega) = d_k^{-p} / \sum_{j=1}^M d_j^{-p},$$

где  $p > 1$  – параметр, определяющий степень нечеткости алгоритма кластеризации. При малых  $p$  получаем алгоритм нечеткой кластеризации, а в предельном случае  $p \rightarrow \infty$  – алгоритм жесткой кластеризации.

5. Составить подмножество активных кластеров, для которых  $\mu_{C_k}(\omega) \geq \mu_{\min}$ . Для каждого активного кластера уточнить оценки параметров (11)-(13):

$$w' = w + \mu(\omega), \quad \beta = \max\{\mu(\omega)/w', \beta_{\min}\mu(\omega)\};$$

$$m' = (1 - \beta)m + \beta\omega;$$

$$S' = (1 - \beta)(S + \beta(\omega - m)(\omega - m)^T),$$

где  $\beta_{\min} \in [0; 1)$  – параметр, определяющий скорость забывания старых наблюдений.

6. Вычислить обратные матрицы  $(I + \gamma^{-2}S)^{-1}$  и перейти на шаг 2.

**Интерполяция коэффициентов регулятора.** Каждой модели кластера  $\theta(C) = (w, m, S)$ , соответствует свой набор коэффициентов ПИ-регулятора вида (6).

Для интерполяции коэффициентов регулятора для произвольного текущего режима построим нечеткую систему Такаги-Сугено-Канга [22]. В случае нечеткой системы, когда исходный набор регуляторов определяется на основе множества кластеров, построенных по исходным данным, для каждого кластера задаются отдельные термы входных лингвистических переменных (задаваемые параметрами модели кластера) и формируется одно правило вида:

$$\text{ЕСЛИ } N=N^{(i)} \text{ И } G=G^{(i)} \text{ И } P=P^{(i)}, \text{ ТО } K=K^{(i)}.$$

Выполняя процедуру нечеткого вывода, получим коэффициенты стабилизирующего регулятора для отдельного момента времени.

Оценивая изменение параметров модели  $\theta(C)$  рассчитаем отклонения  $\Delta_j^s, \Delta_j^i$  между наибольшими и наименьшими значениями коэффициентов, задаваемых старой и новой моделью кластера. Обновление набора правил будем выполнять в двух случаях (рис. 2):

1) для нового кластера, когда изменения параметров модели  $\theta(C)$  не превышают точности измерений;

2) для существующего кластера, когда параметры модели  $\theta(C)$  кластера изменились на величину, превышающую точность измерений.

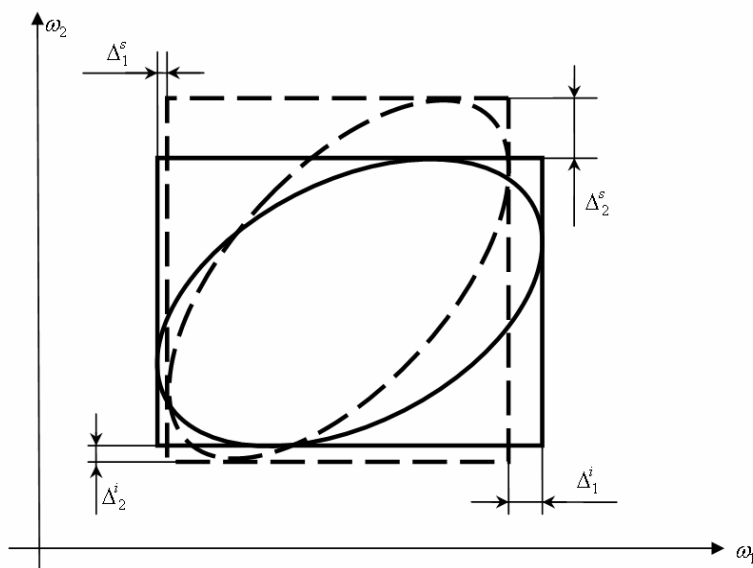


Рис. 2. Оценка изменений модели кластера



**Численный эксперимент.** В качестве исходных данных выбраны данные измерений, полученные в результате функционирования энергоблока СКД 300 МВт на протяжении 35 часов. Данные включают как измерения соответствующие основным режимам (150, 200 и 300 МВт), так и переходные режимы (рис. 3).

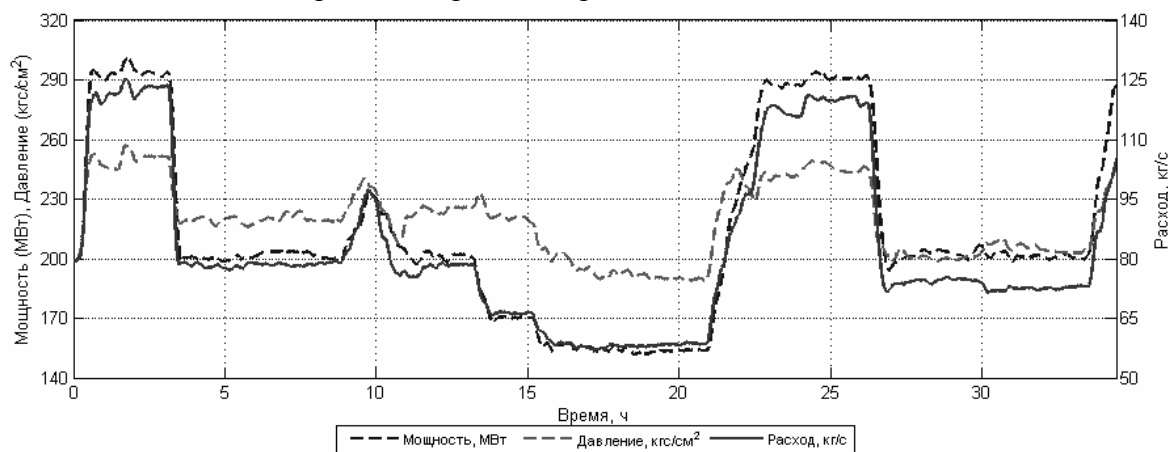


Рис. 3. Данные функционирования энергоблока СКД 300 МВт

Для выбранных данных решена задача нечеткой инкрементной кластеризации с параметрами:

- пороговое расстояние  $d_{\max} = 0,1$ ;
- степень нечеткости алгоритма кластеризации  $p = 2$ ;
- пороговое значение функции принадлежности активных кластеров  $\mu_{\min} = 0,25$ ;
- скорость забывания  $\beta_{\min} = 0,0005$ .

В процессе кластеризации выделено 8 кластеров (рис. 4), которые соответствуют как основным режимам (4 кластера, которые соответствуют мощности 150, 200 и 300 МВт), так и переходным при повышении и понижении мощности блока (4 кластера). При расширении набора измерений число кластеров не изменяется, происходит лишь уточнение моделей кластеров.

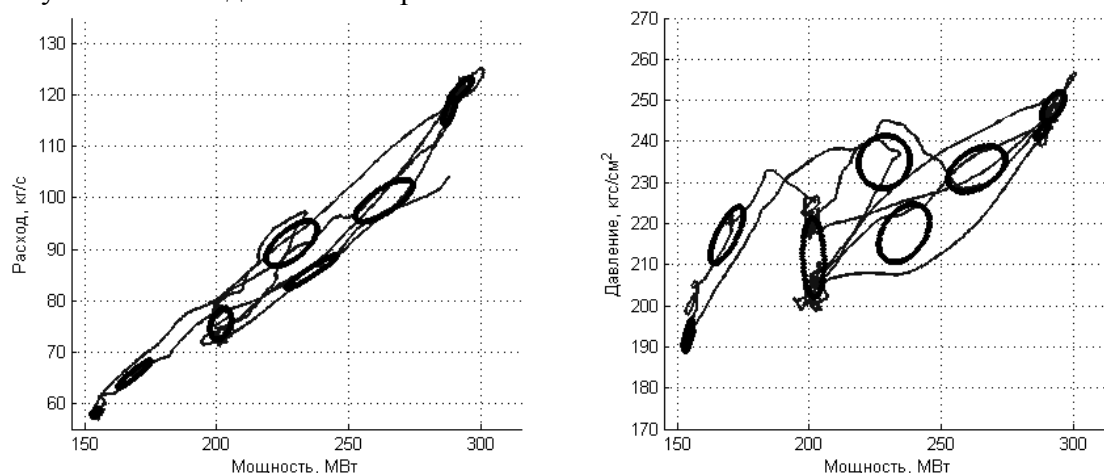


Рис. 4. Выделенные кластеры, соответствующие отдельным режимам работы энергоблока СКД

На основе выделенных кластеров формировались области параметров (рис. 5), для которых рассчитывались коэффициенты ПИ-регулятора, как решение системы матричных неравенств (7)-(9).

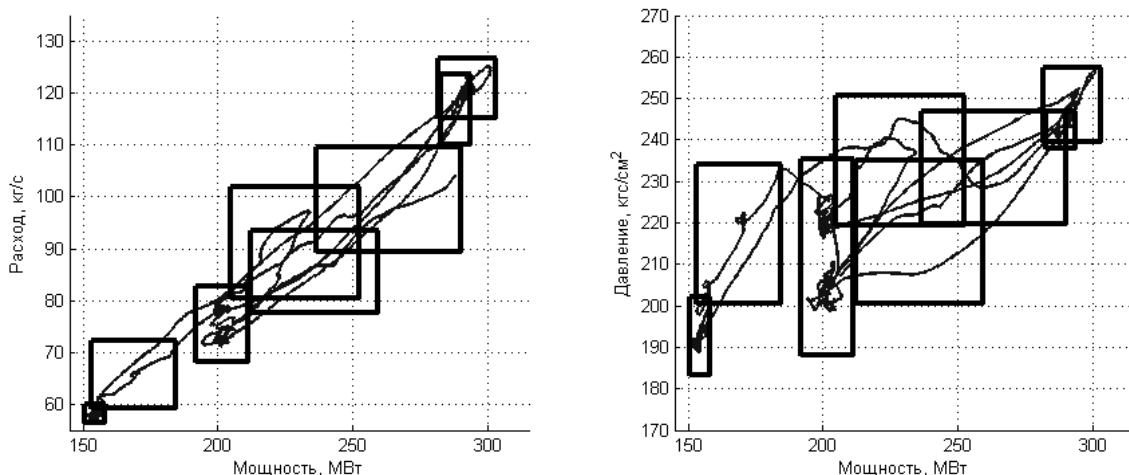


Рис. 5. Области параметров, для которых рассчитываются коэффициенты ПИ-регулятора

**Выводы.** Рассмотрена задача выделения режимов работы на основе методов инкрементной кластеризации и задача управления впрысками в отдельных режимах работы энергоблока. Для аппроксимации значений коэффициентов регулятора в текущем режиме предложена и реализована нечеткая система Такаги-Сугено-Канга. Исходные данные для алгоритма кластеризации сформированы на основе результатов измерений. Для выбранных параметров алгоритма кластеризации получено разбиение данных измерений на 8 кластеров, которые соответствуют основным и переходным режимам работы. Для выделенных кластеров решена задача параметрического синтеза ПИ-регулятора и предложена система управления охлаждающим впрыском с контуром настройки параметров ПИ-регулятора.

#### Список использованных источников

1. Волошенко А. В. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподачи / А. В. Волошенко, В. В. Медведев, И. П. Озерова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 100 с.
2. Port R.D., Herro H.M. The Nalco guide to boiler failure analysis – New York: McGraw–Hill, 1991. – 279 p.
3. Makovicka J, Havlena V, Benes M. A simulation model of steam and flue gas flow in heat exchangers // Proceedings of ALGORITMY 2002 – 16th Conference on Scientific Computing. – Vysoke Tatry–Podbanske, Slovakia, September 8–13, 2002. – 171–178 pp.
4. Красніков О. Л. Ідентифікація коефіцієнта теплообміну пароперегрівачів енергоблоку НКТ за умови неповного набору даних / О. Л. Красніков // XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика/Automatics – 2011»: матеріали конференції; 28-30 вересня 2011 р. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 104-105.
5. Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. – International Association for the Properties of Water and Steam. – Erlangen, 1997. – 48 p.
6. Mohler R.R. Bilinear control processes: with applications to engineering, ecology, and medicine – NY: Academic Press, 1973 – 224 с.
7. Amato F., Cosentino C., Merola A. Stabilization of Bilinear Systems via Linear State Feedback Control // IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs 56(1). – 2009 – P. 76-80.
8. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory – Philadelphia: SIAM Press, 1994. – 193 с.
9. Astrom K.J., Hagglund T. PID Controllers. 2<sup>nd</sup> edition – Research Triangle Park, 1995. – 343 p.
10. Rugh W.J., Shamma J.S. Research on gain scheduling // Automatica, 36 (2000). – P. 1401–1425.
11. Bruzelius F. Linear Parameter-Varying Systems. An approach to gain scheduling. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. – Goteborg: Chalmers University of Technology, 2004. – 181 p.

12. Bengea S., DeCarlo R., Corless M., Rizzoni G. A polytopic system approach for the hybrid control of a diesel engine using VGT/EGR // *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. – March 2005, Vol. 127. – pp. 13-21.
13. Gupta M.R., Chen Y. Theory and use of the EM algorithm // *Foundations and trends in signal processing*. – 2010. – Vol. 4. No. 3. – pp. 223–296.
14. Hartigan J.A. *Clustering Algorithms*. – New York: Wiley, 1975. – 351 p.
15. Li D., Simske S. Training set compression by incremental clustering // *Journal of pattern recognition research*. – 2011. – Vol 6. No 1. – pp. 56-64.
16. Charikar M. Incremental clustering and dynamic information retrieval / C. Chekuri, T. Feder, R. Motwani // *Twenty-ninth annual ACM symposium on theory of computing: STOC '97 proc. of*. – 1997. – pp. 626 635.
17. Gupta C. GENIC: a single pass generalized incremental algorithm for clustering / C. Gupta, R. Grossman // *Fourth SIAM international conference on data mining : proc. of*. – 1987. – pp. 147-153.
18. Nefti S. A modified fuzzy clustering for documents retrieval: application to document categorization / S. Nefti, M. Oussalah, Y. Rezgui // *Journal of the Operational Research Society*. – 2009. Vol. 60. No. 3. – pp. 384-394.
19. Бодянский Е. В. Нейронная сеть Т. Кохонена с нечетким выводом и алгоритм ее самообучения / Е. В. Бодянский, В. В. Волкова, Е. В. Махиборода // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – 2009. – Вип. 2 (20). – С. 74-78.
20. Maesschalck R. de., Jouan-Rimbaud D., Massart D.L. The Mahalanobis distance // *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. – 2000. – Vol. 50. Issue 1. – pp. 1-18.
21. Vaart, van der A. W. *Asymptotic statistics*. – Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2000. – 460 p.
22. Wang L.X. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. – NJ: Prentice Hall, 1997. – 424 p.