

УДК 620.9:662.6:004.8

ББК 30:32.97

## **ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ И ПРИЧИНЫ ЕЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ, ВЫЯВЛЕННЫЕ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

**Г.Д. Крохин**

Новосибирский государственный университет

экономики и управления «НИНХ»

E-mail: g.d.krokhin@nsuem.ru

Диагностический контроль энергоустановок тепловой электростанции (ТЭС) осуществляется с помощью экспертной диагностической системы функционально-гибридного типа с именем SKAIS. SKAIS – «Система контроля, анализа и слежения за изменением состояния энергоустановки» – управляемый в диалоговом режиме человеко-машинный комплекс, ориентированный на диагностирование и экспертизу энергоустановок любого типа. SKAIS позволяет (с использованием получаемой в экспресс-испытаниях информации) диагностировать снижение экономичности, определять величину, причины и опасность происходящих изменений в технологии процесса выработки электро- и теплоэнергии, принимать решения, прогнозировать состояние, оценивать надежность, остаточный ресурс, долговечность, степень риска и ущерб от продолжения дальнейшей эксплуатации оборудования энергоустановки. Система SKAIS вместе с базой данных и знаний (БД и З) осуществляет глубокую обработку и анализ исходной информации для принятия обоснованных решений на выход из создавшейся конфликтной ситуации, подготавливает в базе знаний рекомендации (в виде продукций – решающих правил) и выдает их по запросу оперативному и ремонтному персоналу тепловой электростанции.

*Ключевые слова:* источники информации и причины ее неопределенности, мера оценки качества информации, четкая и нечеткая постановки решения, учет качественной и размытой информации, диагностика и экспертиза.

## **INFORMATION SOURCE AND CAUSE OF AN UN CERTAINTY, REVEALED FOR DIAGNOSIS POWERPLANT STATUS**

**G.D. Krokhin**

Novosibirsk State University of Economy and Management

E-mail: g.d.krokhin@nsuem.ru

The paper considers the features of the diagnostic control of power installations of power plant via expert diagnostic system of functional hybrid type named SKAIS. SKAIS, the system of control, analysis and monitoring of changes in the power plant state, is a dialogue, mode driven software system, designed for diagnostics and expertise of any power plants. SKAIS makes it possible to diagnose decline in economic efficiency, define amount, reasons and danger of current changes, forecast state, evaluate reliability, remaining life, longevity, risk level and damage from further power installation exploitation at early stages (with the use of accelerated tests). SKAIS system makes decisions toward surmounting the conflict (maintenance or restriction) with the presentation of recommendations, prepared in the knowledge base (in the form of end products – decision rules) to operative and maintenance personnel of a thermal plant. The data base and knowledge base about all forced stops and equipment defects, deviations from the exploitation norms are made for that end.

*Key words:* information source and cause of an uncertainty, measure estimation quality information, clear and fuzzy statement of a problem, account quality and fuzziness information, diagnostics and examination.

В реальных условиях оценки эффективности энергоустановок ТЭС, выполняемой на основе диагностики их состояния с целью определения готовности к работе, анализа дефектов и распознавания неисправностей, необходимо использовать и перерабатывать самую разнообразную информацию. Значительная часть этой информации может быть очень низкого качества, т.е. неопределенной, заданной неоднозначно, нечетко, неполно.

Неопределенность такой информации обусловлена существенными погрешностями измеренных значений параметров, неизбежными и значительными погрешностями оценок состояния, погрешностями принятых решений. При этом уровень получаемой неопределенности для разной информации будет различен, а также зависит от разных условий работы, что было отражено автором [9, 10] при диагностическом исследовании функционирующих энергоустановок (рис. 1, 2). Количественная оценка неопределенности наступления множества событий, имеющих различную вероятность, которая обращается в нуль при действительном наступлении одного из событий, позволила, по мнению К. Шеннона [24], рассматривать его энтропию

$$\Delta H = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

как «разумную» количественную меру возможности выбора или меру количества информации, являющейся не противоречивой ранее предложенной мерой Р. Хартли [23]. Однако с самим термином «количество информации» связана некоторая неясность, так как в неявном виде предполагается, что если известно, что такое количество информации, то должно быть известно и что такое информация.

К. Шеннон, занимаясь непосредственно вопросами математической теории связи, абстрагировался от всех качественных и человеческих аспектов информации. В работах УР. Эшби [26], Л. Бриллюэна [3], А.А. Харкевича [22], М. Мазура [12] и др. сделан вывод о существовании множества видов проявления информации и подмножествах логически выводимых форм ее представления. Среди этого множества существует лишь некоторое подмножество, занимаемое статистической информацией. А внутри уже этого множества существует свое подмножество, которое соответствует, по определению К. Шеннона, количеству информации о рассматриваемом объекте.

Второй важный вывод получен при анализе систем, для которых понятие информация является методологической основой для обобщения и упрощения [3, 9].

Это заключение особенно подчеркивается в работах УР. Эшби [26]. Возможность учета в информационных оценках неопределенности и размытости стала особенно важной в связи с тем, что сегодня учет качественной и размытой информации становится центральным в методах искусственного интеллекта, применяемых и в энергетике. Поэтому уточним понятия неопределенность, размытость, неразличимость и предпочтимость, которые получены в [9, 10] (рис. 1–5 и табл. 1–8) и применяются на практике.

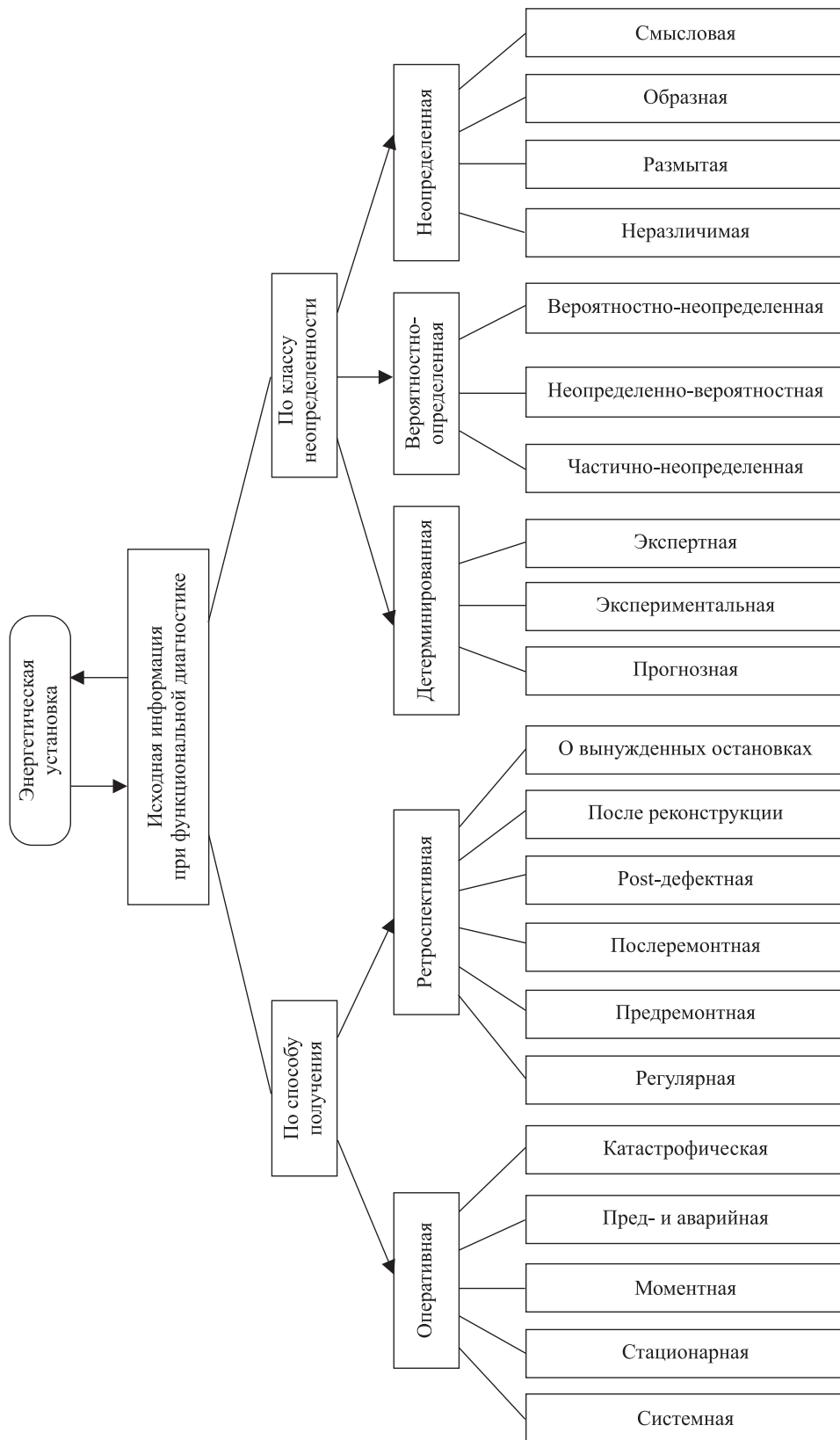


Рис. 1. Классификация исходной информации при диагностике функционирующих энергоустановок [9, 10]

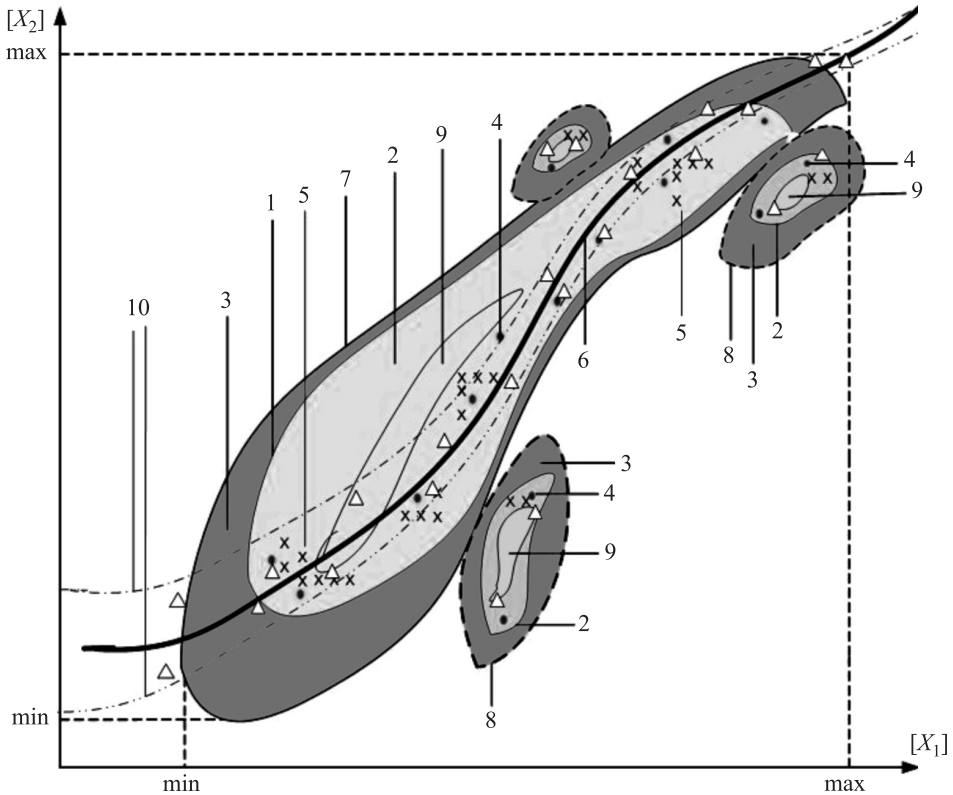


Рис. 2. Анализ результатов обработки информации с помощью системы SKAIS для заданного интервала наблюдения за работой энергоустановки [9, 10]

На рис. 2 представлен  $ij$ -й интервал доверия на нагрузочной характеристике в ее информационном пространстве:  $[X_1]$  – вектор наблюдаемых параметров состояния и оценок суждений экспертов;  $[X_2]$  – вектор параметров предельных состояний работы энергоустановки; 1, 2 – границы изолированных областей; 2 – изолированная внутри интервала область результатов измерений; 3 – зоны неустойчивых подобластей предельных состояний агрегата на рассматриваемом интервале нагрузочной характеристики; 1–7, 2–8 – границы подобластей предельных состояний агрегата; 4 – точки пространства состояний, к которым сводятся все численные решения задачи; 5 – точки наблюдения; 6 – гиперкривая регрессии; 9 – области неопределенности информации; 10 – нечеткие области экспертной информации;  $[\min \div \max]$  – параметры экспериментального интервала доверия на интервале наблюдения нагрузочной характеристики агрегата и экспертные данные.

**Неопределенность.** Рассматривается, как статистическое понятие и количественно находится из выражения К. Шеннона (1). Физически из соотношения неопределенности, открытого В. Гейзенбергом [4], следует: нельзя одновременно точно знать и положение  $x$  частицы, и ее импульс  $p$ . Математически это выражено следующим образом:

$$xp \geq h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}, \tag{2}$$

где  $h$  – постоянная Планка [14].

С помощью уравнения Эйнштейна  $E = mc^2$  это соотношение можно перенести в область обработки сигналов и интерпретировать его иначе: нельзя одновременно с любой точностью определить время и частоту.

Следовательно,

$$\Delta f \times T \geq 1, \quad (3)$$

где  $\Delta f$  и  $T$  описывают разрешение по частоте и по времени.

Если разрешение по времени высокое, то частота будет определяться менее точно, и наоборот. В результате может оказаться сложным одновременно измерить с необходимой точностью частоту компонента сигнала и время его появления, или разделить во времени различные частотные компоненты. Это обычно проявляется при работе турбоагрегата, когда паровые силы на турбине и электрические силы в генераторе вызывают в их роторах высокочастотные компоненты колебательных процессов противоположных знаков и со сдвигом во временной области. Измерить такую неперIODичность, особенно при нестационарных режимах работы теплоэнергoустановок, невозможно. Но связать дисперсиями (неопределенностями) неравенство (2) двух квантовых наблюдений  $x$  и  $y$  в произвольном состоянии  $s$  можно. Это было зафиксировано автором работы в отдельных натуральных опытах (до и после ремонта) с органами парораспределения турбоагрегата Т-100-130 ТМЗ и представлено на рис. 1–5, табл. 1–8 [9, 10] в виде отдельных коррелограмм и таблицах с расчетами – дисперсии и взаимной корреляционной функции.

В общем случае неопределенность было решено делить на качественную и количественную, а также на полную и частичную (см. рис. 1, 2). Качественная неопределенность (ее назовем «неопределенность границы интервала наблюдения») характеризует отсутствие различия в пределах рассматриваемых признаков между объективно различимыми множествами (образами). Количественная неопределенность характеризует отсутствие различия между элементами, находящимися внутри множества (образа). Понятия «множество» и «образ» в данном изложении равнозначны. В обоих случаях неопределенность может быть как статистической, так и детерминистской, а в общем случае комплексной, т.е. статистически детерминированной. Зоны, в пределах которых будут использоваться выбранные признаки, различимые образы или их элементы, являются неразличимыми для данного случая. Такие зоны будем называть далее зонами полной неопределенности, а зоны с частичной делимостью соответственно будем называть зонами частичной неопределенности.

На рис. 3 представлены полученные автором [9, 10] зоны полной (ПН) и частичной (ЧН) неопределенности для вероятностной величины  $P(W)$  и одного из выбранных детерминированных показателей  $\mathcal{E}(W)$  или  $P_2(W)$ . На рис. 3 показано следующее: на основе прогноза на 2000 г. установлено, что предельная мощность турбоустановки будет находиться в интервале  $(W_1 \div W_2)$ , при этом  $P(W)$  – вероятностная кривая прогноза предельной мощности турбоустановки на 2000 г.;  $\mathcal{E}(W)$  – эффективность работы электростанции в зависимости от мощности турбоустановки (турбина + генератор) по расчетным данным на 2000 г., при этом приращение

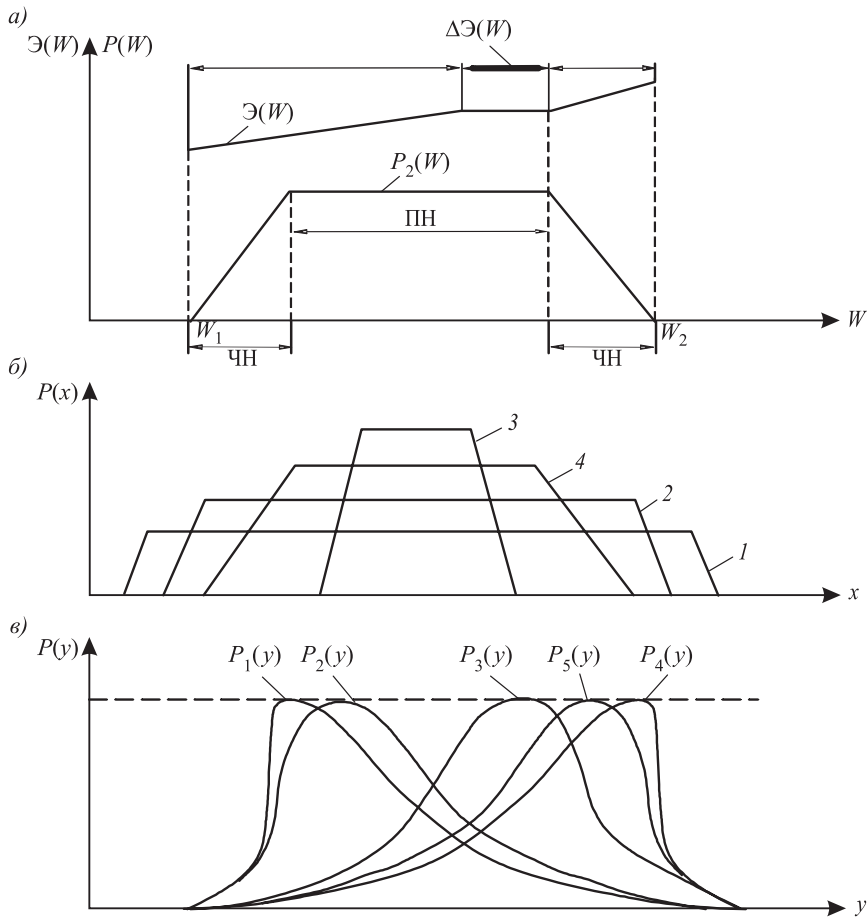


Рис. 3. Примеры областей неопределенностей [9, 10].

*a* – зоны полной (жирная стрелка) и частичной (простая стрелка) неопределенностей (ПН и ЧН); *б* – вероятности – неопределенностей; *в* – неопределенности – вероятностей

$\Delta \mathcal{E}(W)$  в зонах частичной неопределенности находим в пределах точности расчета  $\xi$ , т.е.

$$\Delta \mathcal{E}(W)_{\text{чн}} \leq \xi. \tag{4}$$

Далее было уточнено, что в случае статистической неопределенности и в предельном случае, когда для всей рассматриваемой области  $P(W) = \text{const}$ , неопределенность будет полной и равной

$$H = \log_2 \frac{1}{P(W)}. \tag{5}$$

При отсутствии в рассматриваемой области полностью неразличимых участков

$$H = -\sum_{i=1}^n P(W_i) \log_2 P(W_i), \tag{6}$$

где  $n$  – число различных значений мощностей ( $W_i$ ), находящихся в интервале точности их определения  $\xi$  для фактических условий.

Неопределенность может быть собственной, т.е. обусловленной внутренними свойствами диагностируемого объекта, и внешней (информационной), когда неопределенность вызывается объективными и субъективными причинами, действующими во всем канале получения (измерения, передачи, переработки и представления) информации. В случае, когда весовой показатель различия структуры конструкции или свойств отдельных элементов ( $W$ ) диагностируемой энергоустановки обладает свойствами (7):

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1, \quad \forall W_i \geq 0, \quad (7)$$

то нестатистическая неопределенность может находиться по аналогии с статистической неопределенностью

$$H = \sum_{i=1}^n W_i \log_2 W_i. \quad (8)$$

В общем случае мерой неопределенности является функция отношения различающихся и неразличающихся образов или их элементов. Выражение, оценивающее величину аддитивной (суммарной) неопределенности, соответствует

$$H = \sum_{i=1}^n f(P_i W_i), \quad (9)$$

где  $f$  – функция, обеспечивающая заданную связь  $H$  с  $P$  и  $W$  при выполнении условий аддитивности.

В частном случае  $W$  может характеризовать предпочтимость того или иного элемента, например, предпочтимость того или иного алгоритма развития системы, предпочтимость режима работы энергоустановки и т.д.

Таким образом, неопределенностью будем считать субъективную или объективную характеристику отсутствия статистического и (или) детерминированного различия между образами или их элементами.

**Неразличимость.** Под неразличимостью подразумевается «суммарная» неопределенность объекта, т.е. неопределенность состояния управляемого энергетического агрегата и неопределенность наблюдателя (человека-оператора или машины-автомата), выполняющего функции различения.

Следует иметь в виду, что неопределенность при принятии решений в большой системе энергетики снижается по мере движения вниз по иерархическим рангам управления.

Действительно, если неопределенность оценивать статистической мерой, то неопределенность решения задачи в этом случае можно представить в виде

$$H_\beta = - \sum_{j=1}^k \sum_{\alpha=1}^m \sum_{i=1}^n P_{j,\alpha,i} \log_2 P_{j,\alpha,i}, \quad (10)$$

где  $k$  – число подзадач, из которых складывается решение  $\beta$ -задачи;  $m$  – число координат, в пространстве которых ищется ответ на каждую подзадачу;  $n$  – число различимых отрезков, на которые разбивается каждая координата ( $n = N/\Delta$ ,  $N$  – рассматриваемая длина координаты,  $\Delta$  – потребительский порог различимости);  $P_{j,\alpha,i}$  – априорная вероятность попадания решения в  $i$ -й различимый отрезок  $\alpha$ -й координаты в  $j$ -й подзадаче.



Практически при анализе движения информации вниз по иерархическим рангам в работе было получено следующее соотношение по предпочтениям:

$$N_{\text{руководителя}} > N_{\text{операции}} > N_{\text{оператора}} \quad (11)$$

**Предпочтимость.** Предпочтимость образов или элементов в электроэнергетической системе (ЭЭС) меняется в зависимости от уровня иерархии и по задачам. Кроме того, предпочтимость на одном уровне иерархии может быть четкой, а на другом из-за недостатка информации или субъективных причин размытой или даже совсем неразличимой.

**Размытость.** Это относительно новое понятие в качественной теории информации. Оно было предложено и разработано Л. Заде [6, 7] и уже сегодня широко используется в теории систем, в методологии решения задач искусственного интеллекта и во многих технических областях, включая и электроэнергетику [13, 15, 17–19]. Размытость возникла как промежуточное качество между четкостью, с одной стороны, и неопределенностью – с другой, причем в предельных случаях размытость переходит в четкость или неопределенность. В качестве меры размытости в работе используется показатель принадлежности  $\mu_i(x)$ , характеризующий степень принадлежности  $X$  к  $i$ -му образу. В отдельных случаях, помимо статистической принадлежности, применяется также детерминированная принадлежность  $\mu_i^D(x)$ , которая представляет собой степень сходства  $X$  (в отношении свойств, структуры или состава) с  $i$ -м образом.

**Образ** – это множество изображений (отображения объекта наблюдения на пространство признаков), характеризующее близостью классифицируемых объектов по свойствам и выделяемым в качестве классификационных признаков. При этом отдельному образу будет соответствовать элемент фактор – множества  $W$  изображений  $X$ , характеризующихся совокупностью признаков, или описанием подмножества  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ .

В задачах управления энергетическими установками (и особенно их диагностике) нас интересует, в первую очередь, не сам факт степени принадлежности  $X$  тому или иному образу, а следствие от этого. Однако знание степени принадлежности также необходимо при установлении диагноза. Так, к примеру, если известно, какая реакция системы (в виде выбросов) соответствует  $i$ -му образу, то представляет значительный интерес знание приведенной степени принадлежности  $\mu_i(x)$ , т.е. степень близости реакции системы, вызываемой элементом  $X$  к реакции (т.е. появившимся дисбалансом), имеющей место при  $i$ -м образе.

Размытость может иметь место как в отношении границ между образами – внешняя размытость, так и внутри образов между их элементами – внутренняя размытость. Размытость между образами может проявляться в двух видах: как наличие промежуточного образа, элементы которого имеют определенную степень принадлежности к основным образам, например, А и В, так и границы между множествами, переход через которые не вызывает качественного (как минимум на зону различимости) изменения рассматриваемых признаков. При этом показатель принадлежности  $\mu_i(x_i)$   $i$ -го элемента к тому или иному  $M_i$  образу имеет упорядоченный характер. Например, показатель принадлежности элемента  $\mu_A(x)$ , для  $i$ -го элемента



промежуточного образа будет увеличиваться по мере приближения этого элемента к границе  $M_A$ .

Возможны следующие типы размытости: а) размытые границы между четкими (неразмытыми) образами; б) промежуточные образы, имеющие с основными образами четкие и размытые границы.

Размытость элементов внутри образа означает, что хотя все эти элементы качественно однородны, но существуют какие-то имеющие значения для решаемой задачи количественные различия, которые имеют определенную упорядоченность от центра (фокуса) образа до его внешних границ.

Неопределенность и размытость имеют некоторую общность как показатели недостаточного знания, осведомленности, наблюдаемости об объектах и явлениях. Упрощенно можно представить, что неопределенность – это низшая ступень нашего знания, а размытость – это некоторые дополнительные знания внутри неопределенности, выраженные через показатели принадлежности. Причем, в отличие от вероятностей, если говорить только о статистической принадлежности, она может отражать не только объективные закономерности, но и различные субъективные факторы.

Таким образом, исходя из изложенного, будем считать размытостью некоторую степень неопределенности при сравнении между образами или их элементами, представляемую функциями принадлежности и упорядоченными таким образом, что они меняются до полной определенности (четкости), при приближении к границам образа или его предельным элементам. Размытость также связана с понятиями различимость и предпочтимость. В результате будем считать, что неопределенность и вероятность – это связанные понятия, сложность которых все же требует приложения еще и философского осмысления и объяснения [19, 20].

При диагностике состояния функционирующих энергоустановок исходную информацию будем классифицировать по способу ее получения и по характеру неопределенности (см. рис. 1). По способу получения диагностическую информацию разделим на оперативную и ретроспективную. Оперативная информация при диагностике необходима для управления энергоустановок в темпе реального технологического процесса. Она поступает периодически из энергосистемы или по контрольному запросу от диспетчера и отражает функциональную работу энергоустановки электростанции за короткий промежуток времени (так называемый моментный диагноз) как внутри электростанции, так и в энергетической системе.

Ретроспективная информация есть результат статистической обработки данных о параметрах состояния энергоустановки, ее дефектах, происшедших отказах за «время жизни» механизма, модернизациях и реконструкциях, текущих и капитальных ремонтах, всех вынужденных остановах и post-дефектных состояний.

По характеру неопределенности выделим исходную диагностическую информацию и разделим ее на следующие группы: детерминированная, вероятностно-определенная и неопределенная (нечеткая и размытая). Основой такого разделения является анализ и результаты измерений и экспериментов, полученные автором в процессе продолжительных диагностических исследований на функционирующих энергоустановках [8–10], а

также другими авторами [2, 5, 11, 13, 17–19, 21] в ремонтных кампаниях, прогнозной и экспертной информации.

Следует отметить также, что с переходом на более низкие уровни управления и технического обслуживания энергоустановок (по иерархии) степень неопределенности возрастает до неразличимости состояния элемента механизма.

Детерминированная информация и ее получение основаны на закономерных причинно-следственных связях, протекающих в энергоустановке, физических процессах и производимых ею операций во время технологического процесса производства электрической и тепловой энергии. К детерминированной, т.е. однозначно заданной, можно отнести информацию о номинальных параметрах рабочего тела (пара, питательной воды, масла, частоты тока и напряжения в сети и т.д.), паспортные данные на оборудование, установленное в технологической схеме энергоустановки и т.п.

Вероятностно-определенная информация отражает причинно-следственные отношения, имеющие вероятностную (стохастическую) природу, и может описываться известными законами распределения или его характеристиками. В работе принимается, что вероятностно-определенная информация обладает также и статистической устойчивостью, однако для нее закон распределения неизвестен, или же вид закона распределения всего лишь приближенный, так как известны не все его параметры.

Вероятностно-неопределенная информация обусловлена, с одной стороны, тем, что нельзя точно задать фактические энергетические характеристики энергоустановок. Необходимо выполнение специальных экспресс-испытаний или больших балансовых испытаний, по результатам которых уже можно приближенно установить для них вероятностные законы распределения, получить числовые характеристики, которые и будут характеризовать средние значения или вариации параметров и выборок из них. А с другой стороны, она характеризуется вероятностным характером выбираемого закона распределения, точнее тем, кто принимает решение по установлению выбранного (наиболее близкого к действительным характеристикам) закона распределения, т.е. человека – исследователя состояния данной энергоустановки.

Нечеткая информация характеризуется отсутствием причинно-следственных связей. Поэтому при решении задач диагностики энергоустановок в условиях неопределенности исходной информации необходимо определять только диапазоны (интервалы) измерения неопределенных факторов [1, 2, 8–10, 13, 15, 17–19, 21, 25].

Наиболее существенными из неопределенных параметров в задачах диагностики технического состояния энергоустановок автором [9, 10] были определены:

- полный ресурс энергоагрегата,
- остаточный ресурс основных узлов агрегата,
- максимальные годовые нагрузки,
- длительность максимальных нагрузок,
- число неплановых пусков/остановов агрегата,
- работоспособность энергоустановки,
- живучесть энергоагрегата в резкопеременных режимах,

- живучесть энергоагрегата в предотказовых и аварийных состояниях,
- потери экономичности энергоустановки в процессе эксплуатации,
- потери надежности и эффективности энергоустановки в процессе ремонтов,
- замыкающие затраты на восстановление работоспособности энергоустановки,
- срок жизни энергоустановки до перехода в состояние деградации и выход в утилизацию и т.п.

Значения этих факторов представляются интервальными оценками типа «от ... до... около» (см. рис. 2), а также в табл. 1–8 и коррелограммах (рис. 4, 5) с результатами обработки и анализа экспериментальных данных [9, 10].

Таблица 1

**Исходный массив параметров состояния турбоустановки Т-100-130 ТМЗ  
ст. № 7 Новосибирской ТЭЦ-4 после капитального ремонта (1984 г.).  
Режим работы – конденсационный**

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Опыты				
				1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Мощность турбины	$N_3^{оп}$	МВт	80,27	82,45	77,35	69,88	78,47
2	Расход свежего пара турбиной	$D_0^{оп}$	т/ч	336,1	346,5	329,0	296,7	340,0
3	Давл. свежего пара перед турбиной	$P_0^{оп}$	МПа	12,78	12,88	12,92	13,04	12,93
4	Температура свежего пара	$t_0^{оп}$	°С	550,0	543,0	556,0	551,0	543,0
5	Давл. пара на выхлопе турбины	$P_2^{оп}$	МПа	0,01022	0,0060	0,0052	0,0058	0,0062
6	Давление пара за регулir. кл. 1	$P_{1кл}$	МПа	–	–	12,25	11,94	12,79
7	Давление пара за регулir. кл. 2	$P_{2кл}$	МПа	–	–	12,42	9,88	12,92
8	Давление пара за регулir. кл. 3	$P_{3кл}$	МПа	–	6,52	6,04	5,54	6,46
9	Давление пара за регулir. кл. 4	$P_{4кл}$	МПа	–	6,57	6,22	5,65	6,58
10	Давл. пара в камере рег. ступ.	$P_{рег. ст}$	МПа	6,52	6,65	6,14	5,64	6,58
11	Давл. пара I отбора к ПВД-7	$P_{I отб}$	МПа	–	2,83	2,63	2,38	2,87
12	Давл. пара II отбора к ПВД-6	$P_{II отб}$	МПа	–	–	–	–	–
13	Давл. пара III отбора к ПВД-5	$P_{III отб}$	МПа	–	0,919	0,838	0,751	0,893
14	Давл. пара IV отбора к ПНД-4	$P_{IV отб}$	МПа	–	0,402	0,337	0,294	0,361

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	Давл. пара V отбора к ПНД-3	$P_{V\text{отб}}$	МПа	–	0,143	0,119	0,096	0,131
16	Давл. пара VI отбора к ПНД-2	$P_{VI\text{отб}}$	МПа	0,099	0,101	0,099	0,099	0,103
17	Давл. пара VII отбора к ПНД-1	$P_{VII\text{отб}}$	МПа	0,099	0,101	0,098	0,099	0,103
18	Температура охлажд. воды на входе в конденсатор	$t_{1\text{ОВ}}$	°С	19,0	8,0	5,1	5,8	4,0
19	Температура охлажд. воды на выходе конденсатора	$t_{2\text{ОВ}}$	°С	24,6	13,6	11,4	10,8	19,3
20	Температура конденсата после конденсатора	$t_K$	°С	38,0	28,0	28,0	27,4	38,6
21	Давление пара перед I ступ. эжектора	$P_{I\text{ст}}^{\text{эж}}$	МПа	0,687	0,701	0,690	0,694	0,705
22	Температура пара перед I ступ. эжектора	$t_{\text{гр. пар}}^{\text{эж}}$	°С	170,0	170,0	170,0	170,0	170,0
23	Расход сухого воздуха отсасыв. эжектором	$G_{\text{возд}}^{\text{эж}}$	кг/ч	17,5	15,7	10,5	13,3	17,8
24	Температура паровоздушной смеси на всасе эжектора	$t_{\text{ПВС}}^{\text{эж}}$	°С	31,1	22,0	44,8	44,7	35,4
25	Давление паровоздушной смеси на всасе эжектора	$P_{\text{ПВС}}^{\text{эж}}$	МПа	0,011	0,0028	0,0020	0,0028	0,0049
26	Давление паровоздушной смеси на выхлопе эжектора	$P_{\text{выхл}}^{\text{эж}}$	МПа	0,098	0,099	0,097	0,097	0,101
27	Температура дренажа III ступ. эжектора	$t_{\text{др. III ст}}^{\text{эж}}$	°С	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
28	Год эксплуатации: до ремонта /после ремонта	GOD	Ø/1	I	I	I	I	I

Таблица 2

**Экспресс-испытание т.у. Т-100-130 ТМ 3 ст. № 7 НТЭЦ-4 до ремонта. Определение дисперсии погрешности измеренных параметров системы парораспределения**

№ п/п	$N_{\text{эл}}$ , МВт	79,728	75,096	64,5	55,84
	$D_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	$D_{\text{ррк 1}}$	Не исправен первичный вентиль			
2	$D_{\text{ррк 2}}$	3,72	5,04	4,95	9,86
3	$D_{\text{ррк 3}}$	1,25	2,5	5,7	1,7
4	$D_{\text{ррк 4}}$	0,4375	0,842	0,644	0,1062
5	$D_{\text{рег. ст}}$	0,358	4,15	6,26	0,274
6	$D_{\text{р перед ст. кл}}$	0	1,16	1,55	0,3125
7	$D_{\text{р за ст. кл}}$	0,9043	1,41	1,25	2,03

Таблица 3

**Экспресс-испытание т.у. Т-100-130 ТМ 3 ст. № 7 НТЭЦ-4 до ремонта.  
Определение среднеквадратичной погрешности измеренных параметров  
системы парораспределения**

№ п/п	$N_{эл}$ , МВт	79,728	75,096	64,5	55,84
	$\sigma_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	$\sigma_{p_{рк 1}}$	Не исправен первичный вентиль			
2	$\sigma_{p_{рк 2}}$	0,860	0,917	0,995	1,410
3	$\sigma_{p_{рк 3}}$	0,500	0,645	1,068	0,583
4	$\sigma_{p_{рк 4}}$	0,300	0,374	0,360	0,021
5	$\sigma_{p_{рег. ст}}$	0,268	0,832	1,120	0,234
6	$\sigma_{p_{перед ст. кл}}$	0	0,440	0,560	0,250
7	$\sigma_{p_{за ст. кл}}$	1,340	0,485	0,500	0,637

Таблица 4

**Экспресс-испытание т.у. Т-100-130 ТМ 3 ст. № 7 НТЭЦ-4 после ремонта.  
Определение дисперсии погрешности измеренных параметров системы  
парораспределения**

№ п/п	$N_{эл}$ , МВт	82,447	77,353	69,88	78,467
	$D_p$ , кгс/см <sup>2</sup>	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	$D_{p_{рк 1}}$	0,267	0,839	3,9	0,689
2	$D_{p_{рк 2}}$	не измер.	1,125	1,099	3,054
3	$D_{p_{рк 3}}$	0,4	0,21	0,27	0,418
4	$D_{p_{рк 4}}$	0,167	0,214	0,3	0,491
5	$D_{p_{рег. ст}}$	0,052	0,116	0,338	0,156
6	$D_{p_{перед ст. кл}}$	0	0,5	1,067	0,091
7	$D_{p_{за ст. кл}}$	Не измер.	0,5	1,067	0,091

Здесь статистические характеристики определены следующим образом:

математическое ожидание измеренных параметров –  $m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i$ ;

$$\text{дисперсия} - D = \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{N} - m_x^2 \right) \cdot \frac{N}{N-1};$$

среднеквадратичное отклонение –  $\sigma_x = \sqrt{\frac{D}{N}}$ ;

число измерений одного параметра в опыте –  $N$ .

Таблица 5

**Экспресс-испытание т.у. Т-100-130 ТМ 3 ст. № 7 НТЭЦ-4 до ремонта. Определение доверительных интервалов измеренных параметров системы парораспределения**

№ п/п	Параметр, $P$ , кгс/см <sup>2</sup>	Опыт 1: 79,728 МВт		Опыт 2: 75,096 МВт		Опыт 3: 64,5 МВт		Опыт 4: 55,84 МВт	
		$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$
1	$P_{рк 2}$	107,37 108,73 109,11	112,13 110,77 110,39	98,84 100,14 100,54	103,56 102,26 101,86	89,94 91,52 91,96	95,46 93,88 93,44	76,4 78,62 79,25	84,2 81,98 81,35
2	$P_{рк 3}$	64,11 64,9 65,13	66,89 66,1 65,87	60,84 61,75 62,03	64,16 63,25 67,97	55,74 55,43 55,91	59,66 57,97 56,49	49,94 50,86 51,12	53,16 52,24 51,98
3	$P_{рк 4}$	60,17 60,64 60,78	61,83 61,36 61,22	55,96 56,49 56,65	57,88 57,35 57,19	49,1 49,67 49,87	51,1 50,53 50,37	42,99 43,03 43,04	43,11 43,07 43,06
4	$P_{рег. ст}$	65,82 66,24 66,36	67,3 66,88 66,76	61,11 62,29 63,65	64,39 64,21 63,85	54,15 55,92 56,42	60,35 58,58 58,08	51,38 57,75 51,86	52,68 52,31 52,2
5	$P_{перед ст. кл}$	Нет измер.	Нет измер.	123,91 124,53 124,72	126,17 125,55 125,36	126,3 127,18 127,44	129,4 125,52 128,36	127,8 128,2 128,31	129,2 128,8 128,69
6	$P_{за ст.кл}$	116,24 118,35 118,95	123,66 121,55 120,95	122,55 123,24 123,45	125,05 124,36 124,15	124,1 124,9 125,13	126,9 126,1 126,87	125,24 126,24 126,53	128,76 127,76 127,47

Таблица 6

**Экспресс-испытание т.у. Т-100-130 ТМ 3 ст. № 7 НТЭЦ-4 после ремонта. Определение доверительных интервалов измеренных параметров системы парораспределения**

№ п/п	Параметр, $P$ , кгс/см <sup>2</sup>	Опыт 1: 82,447 МВт		Опыт 2: 77,353 МВт		Опыт 3: 69,88 МВт		Опыт 4: 78,467 МВт	
		$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$	$M_1$	$M_2$
1	$P_{рк 1}$	77,09 77,42 77,51	78,25 77,92 77,83	123,86 124,26 124,4	125,39 124,98 124,85	119,43 120,57 120,92	123,57 122,43 122,08	129,54 129,83 129,92	130,66 130,37 130,28
2	$P_{рк 2}$	Нет измер.	Нет измер.	125,5 125,96 126,11	127,27 126,8 126,65	97,7 99,24 99,71	103,3 101,76 101,29	130,18 130,78 130,99	132,54 131,94 131,73
3	$P_{рк 3}$	65,28 65,69 65,81	66,72 66,31 66,19	60,93 61,13 61,2	61,69 61,49 61,42	55,79 58,09 56,18	56,87 56,57 56,48	65,3 65,52 65,59	66,16 65,94 65,87
4	$P_{рк 4}$	66,74 67,0 67,08	67,66 67,4 67,32	62,86 63,07 63,13	63,64 63,43 63,37	56,92 57,24 57,34	58,08 57,76 57,66	66,43 66,67 66,75	67,37 67,13 67,05
5	$P_{рег. ст}$	64,94 65,09 65,13	65,46 65,31 65,27	61,02 61,16 61,215	61,58 61,44 61,38	54,57 54,91 55,01	55,79 55,45 55,35	65,11 65,24 65,29	65,63 65,50 65,45
6	$P_{перед ст. кл}$	0	0	126,16 126,47 126,57	127,34 127,03 126,93	128,62 129,22 129,4	130,78 130,18 130,0	128,9 129,0 129,04	129,3 129,2 129,16
7	$P_{за ст.кл}$	Нет измер.	Нет измер.	126,16 126,47 125,57	127,34 127,03 126,93	128,62 129,22 129,4	130,78 130,18 130,0	128,9 129,0 129,04	129,3 129,2 129,16

Доверительные интервалы  $[M_1 \div M_2]$  определены для математического ожидания измеренных параметров в выборке при трех уровнях вероятности  $t_\beta$  соответственно размещению в табл. 6 ( $t_\beta = 0,95; 0,7; 0,5$ ) по формулам:  $\varepsilon_\beta = t_\beta \cdot \sigma_x$ ;  $M = m_x \pm \varepsilon_\beta^m$ ;  $m_x$  – математическое ожидание;  $P = \text{кгс/см}^2$ .

Таблица 7

**Экспресс-испытания т.у. Т-100-130 ТМЗ ст. № 7 НГЭЦ-4.**  
**Оценка взаимной корреляционной функции параметров системы парораспределения (до ремонта)**

№ п/п	$N_{\text{эл}}, \text{МВт}$ $R_{xy}, \text{кгс/см}^2$	79,728	75,096	64,5	55,84
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	$P_{\text{за ст. кл}} <> P_{\text{рк 1}}$	–	–	–	–
2	$P_{\text{за ст. кл}} <> P_{\text{рк 2}}$	– 0,54	– 0,30	– 0,68	– 0,76
3	$P_{\text{за ст. кл}} <> P_{\text{рк 3}}$	0,24	– 1,0	– 0,98	– 0,32
4	$P_{\text{за ст. кл}} <> P_{\text{рк 4}}$	– 0,35	– 0,49	– 0,59	– 0,44
5	$P_{\text{р. ст}} <> P_{\text{рк 1}}$	–	–	–	–
6	$P_{\text{р. ст}} <> P_{\text{рк 2}}$	0,68	0,63	0,69	0,47
7	$P_{\text{р. ст}} <> P_{\text{рк 3}}$	0,15	0,87	0,99	0,37
8	$P_{\text{р. ст}} <> P_{\text{рк 4}}$	0,48	0,77	0,62	– 0,48
9	$P_{\text{рк 1}} <> P_{\text{рк 2}}$	–	–	–	–
10	$P_{\text{рк 1}} <> P_{\text{рк 3}}$	–	–	–	–
11	$P_{\text{рк 1}} <> P_{\text{рк 4}}$	–	–	–	–
12	$P_{\text{рк 2}} <> P_{\text{рк 3}}$	0,58	0,25	0,77	– 0,22
13	$P_{\text{рк 2}} <> P_{\text{рк 4}}$	0,97	0,86	0,90	– 0,064
14	$P_{\text{рк 3}} <> P_{\text{рк 4}}$	0,40	0,43	0,70	0,10

Взаимная корреляционная функция измеренных параметров определена только после сопоставления средних значений во временном масштабе:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left[ \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 - N(\bar{x})^2 \right) \left( \sum_{i=1}^N y_i^2 - N(\bar{y})^2 \right) \right]^{1/2}},$$

здесь  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – средние значения измеренных параметров,  $P = \text{кгс/см}^2$ .

Таблица 8

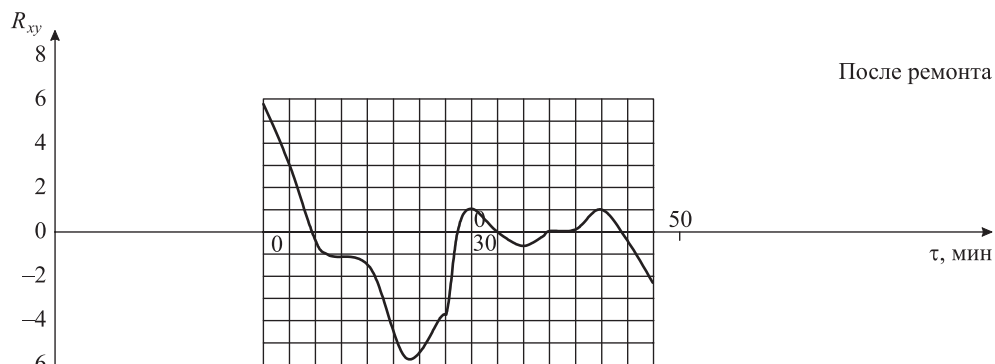
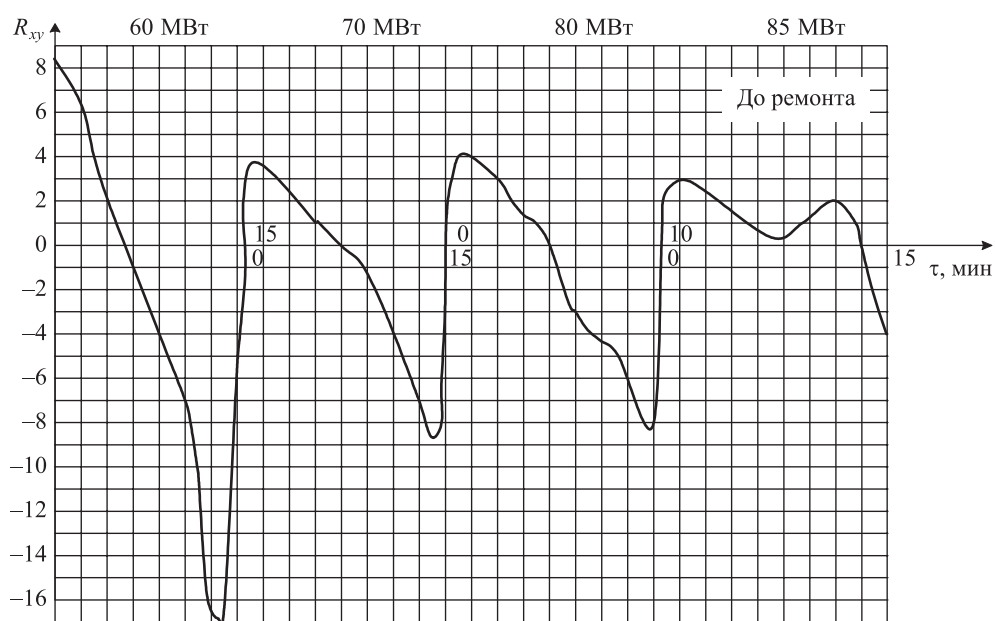
**Экспресс-испытания т.у. Т-100-130 ТМЗ ст. № 7 НГЭЦ-4.**  
**Оценка взаимной корреляционной функции параметров системы парораспределения (после ремонта)**

№ п/п	$N_{\text{эл}}, \text{МВт}$ $R_{xy}, \text{кгс/см}^2$	82,447	77,353	69,88	78,467
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
1	2	3	4	5	6
1	$P_{\text{за ст. кл}} <> P_{\text{рк 1}}$	–	0,06	0,78	– 0,02
2	$P_{\text{за ст. кл}} <> P_{\text{рк 2}}$	–	0,33	0,58	0,125
3	$P_{\text{за ст. кл}} <> P_{\text{рк 3}}$	–	0,72	0,63	– 0,37



Окончание табл. 8

1	2	3	4	5	6
4	$P_{\text{за ст. кл}} \ll P_{\text{рк 4}}$	-	0,66	0,67	-0,43
5	$P_{\text{р. ст}} \ll P_{\text{рк 1}}$	-0,17	0,16	-0,43	0,38
6	$P_{\text{р. ст}} \ll P_{\text{рк 2}}$	-	0,53	0,21	0,05
7	$P_{\text{р. ст}} \ll P_{\text{рк 3}}$	0,42	0,67	0,43	0,42
8	$P_{\text{р. ст}} \ll P_{\text{рк 4}}$	-0,43	0,78	0,03	0,06
9	$P_{\text{рк 1}} \ll P_{\text{рк 2}}$	-	0,61	0,63	-0,23
10	$P_{\text{рк 1}} \ll P_{\text{рк 3}}$	0,61	0,98	0,39	0,63
11	$P_{\text{рк 1}} \ll P_{\text{рк 4}}$	0,32	0,25	0,46	0,36
12	$P_{\text{рк 2}} \ll P_{\text{рк 3}}$	-	0,17	0,87	-0,26
13	$P_{\text{рк 2}} \ll P_{\text{рк 4}}$	-	0,36	0,48	-0,13
14	$P_{\text{рк 3}} \ll P_{\text{рк 4}}$	0	0,93	0,72	0,82



Давление пара за регулирующим клапаном 2

Рис. 4. Correlogramma параметров состояния системы парораспределения т.у. Т-100-130 ТМЗ ст. № 7 НТЭС-4. Давление пара за регулирующими клапанами

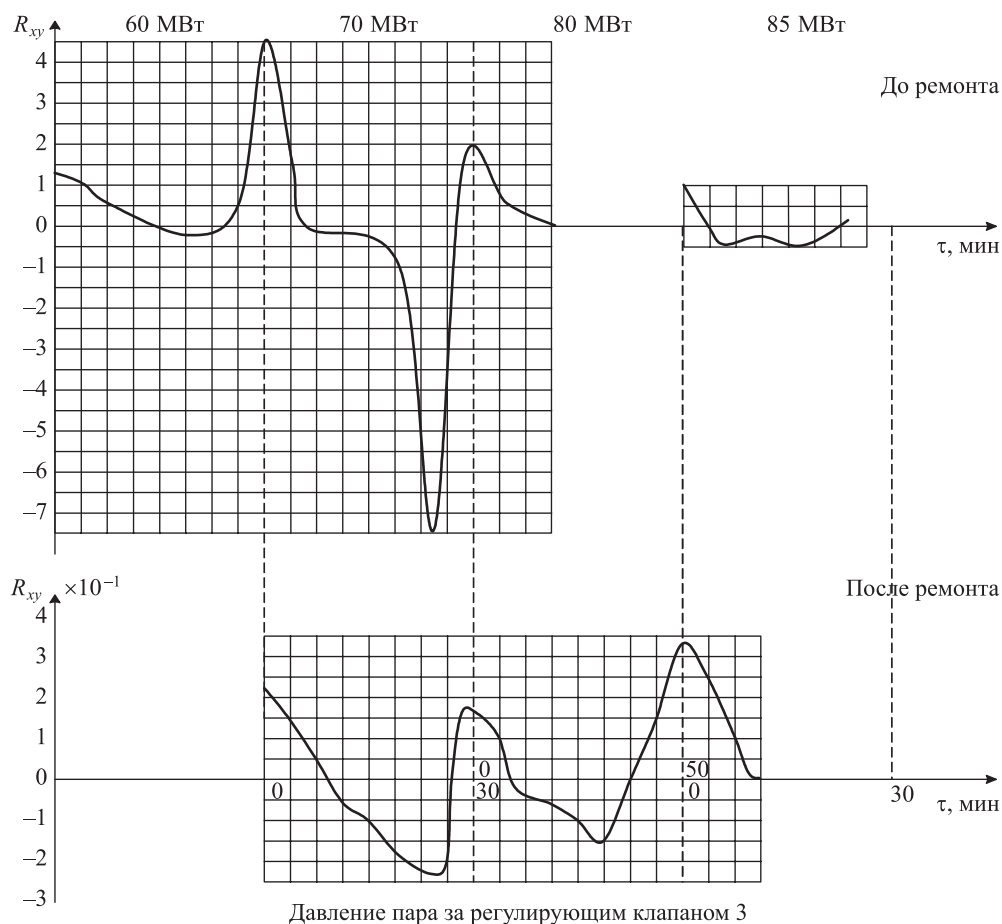


Рис. 5. Коррелогограмма параметров состояния системы парораспределения т.у. Т-100-130 ТМЗ ст. № 7 НТЭЦ-4. Давление пара за регулируемыми клапанами

### Заключение по результатам измерения и обработки параметров.

1. Комплексный анализ оценки погрешностей измерений с использованием существующих штатных каналов измерения показывает, что эта главная задача и определяет эффективность схемы диагностического контроля.

2. Результаты проведенных экспериментов подтверждают, что с переходом на АСУ ТП необходимо вводить информационную модель схемы измерения объекта, что обеспечит его достаточную наблюдаемость для последующей идентификации.

3. В результате это должно обеспечить эффективность диагностики объекта (его экономичность, надежность, безопасность) при условии оптимальных затрат на средства измерения и контроля (структуры измерительных каналов в составе АСУ ТП).

4. Использование нечеткой информации в анализе работы объекта требует другого подхода к организации расчета погрешностей измерений, т.е. не отдельным каналом, а как процессорным измерительным средством, в котором измерительная процедура выполняется в аналоговом и цифровом виде. Для этого требуется разработка матричных методов оценки погрешности, чем автор планирует заниматься в последующем.

5. Матричные методы расчета погрешностей более эффективны, потому что структура преобразования сигналов в процессорных измерительных средствах ориентирована на векторную обработку, а это позволит перейти в дальнейшем на параллельную обработку информации.

6. Применяемые сегодня в энергетике методики выполнения измерений не обеспечивают требуемых значений погрешностей измерений по группе А. Необходимым для этого является утверждение понятия «процессорное измерительное средство в составе АСУ ТП».

7. За рубежом и в России в последние годы получили развитие измерительные каналы в составе Адаптивных систем на базе БИС – сигнальных микропроцессоров, использующие цифровые методы алгоритмических измерений.

### Литература

1. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
2. Блишун А.Ф. Формирование отношения предпочтения по расплывчатым описаниям // Известия АН СССР. Техническая кибернетика, 1981. № 2. С. 204–210.
3. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. М.: ГИ ФМЛ, 1960. 392 с.
4. Бройль де Л. Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. М.: Мир, 1986. 344 с.
5. Веников В.А., Оруджев Ф.Д. Размытое подобие нечетко заданных процессов в электрических системах // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1983. № 2. С. 26–32.
6. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем принятия решений // Математика сегодня: Сб. статей. М.: Знание, 1974. С. 5–49.
7. Заде Л.А. Тени нечетких множеств // Проблемы передачи информации. Т. 2. 1966. Вып. 1. С. 37–44.
8. Крохин Г.Д. Проблема получения достоверной информации при диагностике функционального состояния энергоустановок // Труды Второй Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-94. В 7-ми т. Новосибирск: НГТУ, 1994. Т. 1. С. 207–213.
9. Крохин Г.Д. Математические модели идентификации технического состояния турбоустановок на основе нечеткой информации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск: СЭИ СО РАН, 2008. 48 с.
10. Крохин Г.Д., Мухин В.С., Судник Ю.А. Интеллектуальные технологии в теплоэнергетике. М.: ООО «УМЦ «Триада», 2010. 170 с.
11. Левиатов А.Ю. Принятие решений об оценке качества сложных объектов при нечетких основаниях // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1980. № 1. С. 190–195.
12. Мазур М. Качественная теория информации. М.: Мир, 1974. 240 с.
13. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. М.: Наука, 1979. 415 с.
14. Орир Дж. Физика. В 2-х т. М.: Мир, 1981. Т. 2. С. 589. Приложение А.
15. Оруджев Ф.Д. Экспертные оценки и теория нечетких множеств в исследовании электрических систем // Электричество. 1983. № 4. С. 4–11.
16. Перегудов Ф.Н., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. М.: Высш. шк., 1989. 367 с.
17. Попырин Л.С., Каплун С.М. Проблема информации при технико-экономических исследованиях тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 1971. № 6. С. 55–58.

18. Рупаков Г.В., Рыбачков С.В. Оценка эксплуатационного состояния турбинных установок по результатам упрощенных испытаний // Электрические станции, 1986. № 5. С. 51–53.
19. Стратонович Р.Л., Гришанин Б.А. Ценность информации при невозможности прямого наблюдения оцениваемой величины // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1966. № 3. С. 3–15.
20. Урсул А.Д. Противоречивый характер познания природы информации. Проблема информации в современной науке. Философские очерки. М.: Наука, 1975. С. 10–93.
21. Фактор неопределенности при принятии оптимальных решений в больших системах энергетики / Труды симпозиума АН СССР, СО РАН, СЭИ. В 3-х т. Т. 2. Ч. 1. Вып. 1. Учет неопределенности исходной информации / под ред. Л.С. Беляева. Иркутск: СЭИ, 1974. 162 с.
22. Харкевич А.А. Очерки общей теории связи // Избр. труды. В 3-х т. Т. 3. Теория информации. Опознание образов. М.: Наука, 1973. С. 1–103.
23. Хартли Р. Передача информации // Теория информации и ее приложения. М.: Физматгиздат, 1959. С. 5–35.
24. Шеннон К. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963. С. 243–332.
25. Эжелъ П.Я., Попов В.А. Учет фактора неопределенности в задачах моделирования и оптимизации электрических сетей // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 2. С. 50–58.
26. Эшби У. Росс. Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1959. 432 с.

### Bibliography

1. Aliev R.A., Cerkovnyj A.Je., Mamedova G.A. Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoj ishodnoj informacii. M.: Jenergoatomizdat, 1991. 240 p.
2. Blishun A.F. Formirovanie otnoshenija predpochtenija po rasplyvchatym opisaniyam // Izvestija AN SSSR. Tehnicheskaja kibernetika, 1981. № 2. P. 204–210.
3. Brilljujen L. Nauka i teorija informacii. M.: GI FML, 1960. 392 p.
4. Brojl' de L. Sootnoshenija neopredelennostej Gejzenberga i verojatnostnaja interpretacija volnovoju mehaniki. M.: Mir, 1986. 344 p.
5. Venikov V.A., Orudzhev F.D. Razmytloe podobie nechetko zadannyh processov v jelektricheskikh sistemah // Izvestija AN SSSR. Jenergetika i transport. 1983. № 2. P. 26–32.
6. Zade L.A. Osnovy novogo podhoda k analizu slozhnyh sistem prinjatija reshenij // Matematika segodnja: Sb. statej. M.: Znanie, 1974. P. 5–49.
7. Zade L.A. Teni nechetkih mnozhestv // Problemy peredachi informacii. T. 2. 1966. Vyp. 1. P. 37–44.
8. Krohin G.D. Problema poluchenija dostovernoj informacii pri diagnostike funkcional'nogo sostojanija jenergoustanovok // Trudy Vtoroj Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Aktual'nye problemy jelektronnoho priborostroenija» APJeP-94. V 7-mi t. Novosibirsk: NGTU, 1994. T. 1. P. 207–213.
9. Krohin G.D. Matematicheskie modeli identifikacii tehničeskogo sostojanija turbo-ustanovok na osnove nechetkoj informacii: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. Irkutsk: SJeI SO RAN, 2008. 48 p.
10. Krohin G.D., Muhin V.S., Sudnik Ju.A. Intellektual'nye tehnologii v teplojenergetike. M.: ООО «UMC «Triada», 2010. 170 p.
11. Leviatov A.Ju. Prinjatje reshenij ob ocenke kachestva slozhnyh ob#ektov pri nechetkih osnovanijah // Izvestija AN SSSR. Tehnicheskaja kibernetika. 1980. № 1. P. 190–195.
12. Mazur M. Kachestvennaja teorija informacii. M.: Mir, 1974. 240 p.
13. Melent'ev L.A. Sistemnye issledovanija v jenergetike. Jelementy teorii, napravlenija razvitija. M.: Nauka, 1979. 415 p.

14. *Orir Dzh.* Fizika. V 2-h t. M.: Mir, 1981. T. 2. P. 589. Prilozhenie A.
15. *Orudzhev F.D.* Jekspertnye ocenki i teorija nechetkih mnozhestv v issledovanii jelektricheskikh sistem // Jelektrichestvo. 1983. № 4. P. 4–11.
16. *Peregudov F.N., Tarasenko F.P.* Vvedenie v sistemnyj analiz. M.: Vyssh. shk., 1989. 367 p.
17. *Popyrin L.S., Kaplun S.M.* Problema informacii pri tehniko-jekonomicheskikh issledovanijah teplovykh jelektrostantsij // Teplojenergetika. 1971. № 6. P. 55–58.
18. *Rupakov G.V., Rybachkov S.V.* Ocenka jekspluacionnogo sostojanija turbinnyh ustanovok po rezul'tatam uproshhennyh ispytanij // Jelektricheskie stancii. 1986. № 5. P. 51–53.
19. *Stratonovich R.L., Grishanin B.A.* Cennost' informacii pri nevozmozhnosti prjamo nabljudenija ocenivaemoj velichiny // Izvestija AN SSSR. Tehniceskaja kibernetika. 1966. № 3. P. 3–15.
20. *Ursul A.D.* Protivorechivij karakter poznaniya prirody informacii. Problema informacii v sovremennoj nauke. Filosofskie ocherki. M.: Nauka, 1975. P. 10–93.
21. Faktor neopredelennosti pri prinjatii optimal'nyh reshenij v bol'shih sistemah jenergetiki / Trudy simpoziuma AN SSSR, SO RAN, SJeI. V 3-h t. T. 2. Ch. 1. Vyp. 1. Uchet neopredelennosti ishodnoj informacii / pod red. L.S. Beljaeva. Irkutsk: SJeI, 1974. 162 p.
22. *Harkevich A.A.* Ocherki obshhej teorii svjazi // Izbr. trudy. V 3-h t. T. 3. Teorija informacii. Opoznanie obrazov. M.: Nauka, 1973. P. 1–103.
23. *Hartli R.* Peredacha informacii // Teorija informacii i ee prilozhenija. M.: Fizmatizdat, 1959. P. 5–35.
24. *Shannon K.* Matematicheskaja teorija svjazi // Raboty po teorii informacii i kibernetike. M.: IL, 1963. P. 243–332.
25. *Jekel' P.Ja., Popov V.A.* Uchet faktora neopredelennosti v zadachah modelirovanija i optimizacii jelektricheskikh setej // Izvestija AN SSSR. Jenergetika i transport. 1985. № 2. P. 50–58.
26. *Jeshbi U.* Ross. Vvedenie v kibernetiku. M.: IL, 1959. 432 p.