

ДИАГНОСТИКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ АСУТП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Сабанин В.Р.¹ Смирнов Н.И.¹, кандидаты техн. наук, Репин А.И.¹, инж.,
Аракелян Э.К.¹, доктор техн. наук, Макаров О.Н.², Андреев С.Н.², инженеры
Московский энергетический институт¹, ОАО МОСЭНЕРГО ТЭЦ-27²

Важнейшей задачей АСУТП энергетических производств в условиях рыночной экономики является получение достоверной информации для расчета ТЭП. В связи с этим, необходимым условием становится качественное измерение технологических параметров и своевременное диагностирование отказов измерительных каналов. В статье предлагается метод диагностирования частичных отказов информационно-измерительных каналов АСУТП с использованием современных технологий искусственного интеллекта. В качестве одного из подходов предлагается использовать алгоритм коррекции результатов измерений, основанный на информационной избыточности технологического процесса. Для проведения диагностических процедур исследуется возможность применения нейросетевых технологий, эволюционных алгоритмов оптимизации и элементов нечеткой логики.

Одним из приемов оценки состояния и диагностирования отказов информационных каналов являются расчеты на основе балансовых соотношений технологического процесса. Исходной информацией для балансовых соотношений являются значения технологических параметров, измеренные средствами информационной подсистемы АСУТП и поступающие в вычислительные комплексы по многим десяткам и сотням информационно-измерительных каналов (ИИК). С увеличением их числа растет вероятность поступления в систему недостоверной информации, приводящей к ошибкам вычисления ТЭП. Поэтому контроль достоверности информации является одной из важнейших функциональных задач информационной подсистемы.

Общеизвестными причинами появления недостоверной исходной информации являются отказы ИИК, которые принято делить на полные и частичные (метрологические) [1]. Полный отказ наступает при выходе из строя измерительного преобразователя или повреждении линии связи с вычислительным комплексом. При частичном отказе технические средства сохраняют работоспособность, однако погрешность измерения соответствующего параметра становится выше допустимого значения. Обнаружение полных отказов является более простой задачей, чем выявление частичных отказов. Обычно для этих целей используются пороговые алгоритмы диагностики, в качестве которых выступают алгоритмы допускового контроля параметров и алгоритмы допускового контроля скорости их изменения. Алгоритмы контроля достоверности исходной информации, с помощью которых выявляются частичные отказы, как правило, основаны на использовании информационной избыточности [1,2]. Информационная избыточность обусловлена тем, что информация о действительном значении некоторого технологического параметра содержится не только в результате измерения этого параметра, но и в измеренных значениях других параметров, связанных с ним уравнениями материальных и тепловых балансов.

В статье предлагается метод диагностирования частичных отказов информационно-измерительных каналов АСУТП с применением алгоритма оперативной коррекции результатов измерений. Методика диагностики представлена как задача нечеткой классификации, для решения которой используются искусственные нейросети (ИНС), обученные с помощью эволюционных алгоритмов оптимизации.

Реализация предлагаемого метода предусматривает процедуру настройки алгоритма диагностирования. Целью настройки является выделение значимых технологических

параметров в балансовых расчетах ТЭП, выбор диапазонов вариаций параметров, структуры ИНС и её обучение для решения задачи нечеткой классификации.

Ниже приводится краткое описание процесса выделения значимых технологических параметров, выбора структуры и обучения ИНС, а также некоторые результаты работы алгоритма диагностирования частичных отказов основных информационных каналов АСУТП котла №1 ТЭЦ-27 ОАО МОСЭНЕРГО.

Алгоритм коррекции измеряемых параметров с использованием балансовых соотношений

Алгоритм коррекции измеряемых параметров предназначен для вычисления корректирующих поправок к результатам измерения технологических параметров. Поправки корректируют результаты измерений таким образом, чтобы комплексное их использование в расчетах ТЭП обеспечивало выполнение всех балансовых соотношений технологического процесса.

Система обеспечивающих информационную избыточность балансовых соотношений для исследуемого технологического процесса может быть записана в виде:

$$F_j(X) = F_j(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0; \quad j \in \overline{1, m}; \quad i \in \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ - вектор размерности n оценок истинных значений технологических параметров; m – число уравнений балансов.

На практике балансы, как правило, не сходятся. Убедительным подтверждением присутствия ошибок измерения являются нарушения балансовых соотношений при подстановке в них усредненных на достаточно длительном интервале времени результатов измерения при условии отсутствия технологических отказов. Появившиеся небалансы ΔF_j могут быть устранены целевым сдвигом значений измеряемых величин внутри диапазонов их неопределенности, обусловленных погрешностью измерения.

Уравнения системы балансовых соотношений (1) выполняются только при подстановке в них оценок истинных значений технологических параметров:

$$x_i = x_i^{izm} + \Delta x_i, \quad (2)$$

где: x_i^{izm} - значение i -го параметра, полученные по результатам измерений и обработки в соответствующих процедурах усреднения и интегрирования при подготовке информации для расчета балансов; Δx_i - вычисленное по алгоритму коррекции поправка к i – му параметру, обеспечивающая вместе с другими скорректированными параметрами сходимость всех уравнений системы (1).

Значения Δx_i , способные скорректировать уравнения балансов, могут быть найдены из решения задачи оптимального распределения величин корректирующих поправок при ограничениях на балансовые соотношения (1) в соответствии с критерием

$$\sum_{i=1}^n p_i \cdot \left(\frac{\Delta x_i}{x_i^{max}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где x_i^{max} - верхний предел диапазона измерения, p_i - весовые коэффициенты, n - число искомых поправок Δx_i .

Более подробно алгоритм коррекции результатов измерений технологических параметров изложен в работе [2].

Предлагаемый алгоритм осуществляет циклическую коррекцию результатов измерения технологических параметров, используемых в расчете ТЭП. В качестве иллюстрации работы алгоритма обрабатывались значения измеренных параметров котла №1 ТЭЦ-27 ОАО

МОСЭНЕРГО. Параметры записывались в массив с периодичностью 15 мин в течение месяца. В качестве источника информационной избыточности приняты уравнения материального и теплового балансов котла:

$$G_{нв} - G_{пр} - D_{не} = \Delta G, \quad (4)$$

$$100 - q_1 - q_2 - q_3 - q_5 = \Delta q,$$

где $G_{нв}, G_{пр}, D_{не}, q_1, q_2, q_3, q_5, \Delta q$ - соответственно, расходы питательной воды, продувки, перегретого пара, т/ч; доля тепла, полезно используемого в котле, теряемого с уходящими газами, от химического недожога и в окружающую среду, %; ΔG - материальный небаланс, т/ч; Δq - тепловой небаланс, %. Составляющие уравнений (4) рассчитываются по выражениям, приведенным в [3]. Расходы газа, питательной воды и пара рассчитываются с учетом поправок на удельные объемы, зависящие от соответствующих температур и давлений. Аппроксимирующие полиномы для объемов и энтальпий взяты из [4].

На рис. 1,а показана реализация изменения расхода природного газа F_2 , подаваемого на котел за рассмотренный промежуток времени. Соответствующие реализации для небаланса по теплу ΔF_m и материального небаланса ΔF_M котла представлены на рис. 1,б и 1,в. Для каждой точки реализации, обработанной алгоритмом коррекции, получены значения корректирующих поправок Δx_i . На рис. 1,г показана реализация корректирующих поправок на расход газа ΔF_2 .

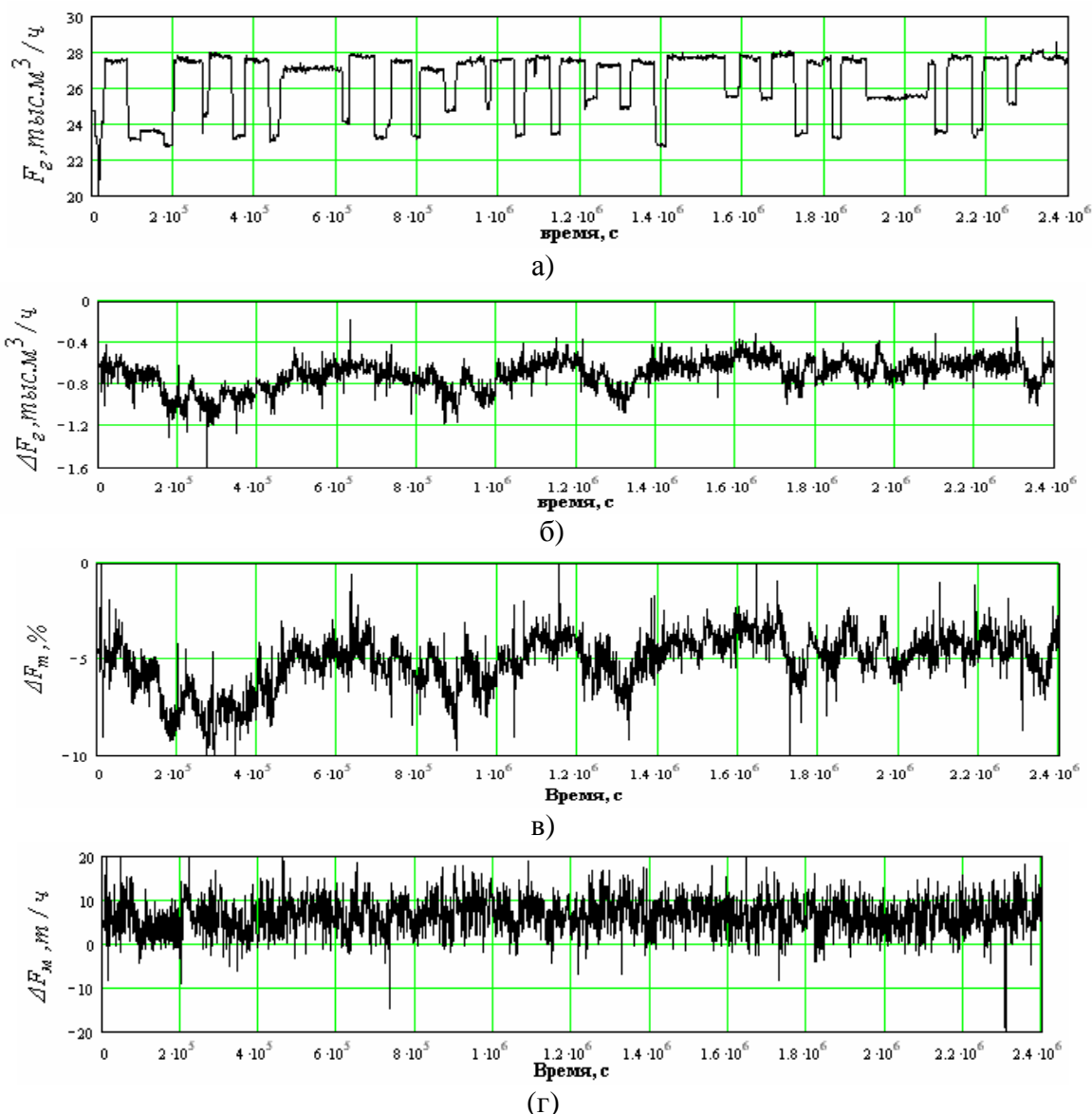


Рис.1. Реализации, иллюстрирующие работу алгоритма коррекции результатов измерения технологических параметров

Из рис. 1,б видно, что реализация значений корректирующих поправок расхода газа практически не зависит от изменения нагрузки котла и содержит систематическую и случайную составляющие. То же самое можно сказать и о реализациях корректирующих поправок остальных диагностируемых параметров.

По результатам работы алгоритма можно сформировать многомерное факторное пространство, осями которого являются значения корректирующих поправок Δx_i ($i \in \overline{1, n}$) и значения небалансов ΔF_j ($j \in \overline{1, m}$). Каждая точка в факторном пространстве представляется вектором $E = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n, \Delta F_1, \dots, \Delta F_m)$. По результатам множественной обработки данных, полученных за определенный промежуток времени, образуется "облако" точек $E_k = (\Delta x_{1,k}, \dots, \Delta x_{l,k}, \Delta F_{1,k}, \dots, \Delta F_{m,k})$ ($k \in \overline{0, K}$, K - число измерений за заданный промежуток времени). На рис.2 показаны проекции многомерного "облака" на плоскости с координатами $\Delta F_2 - \Delta F_m$ и $\Delta F_2 - \Delta F_m$, соответствующие реализациям, представленных на рис.1.

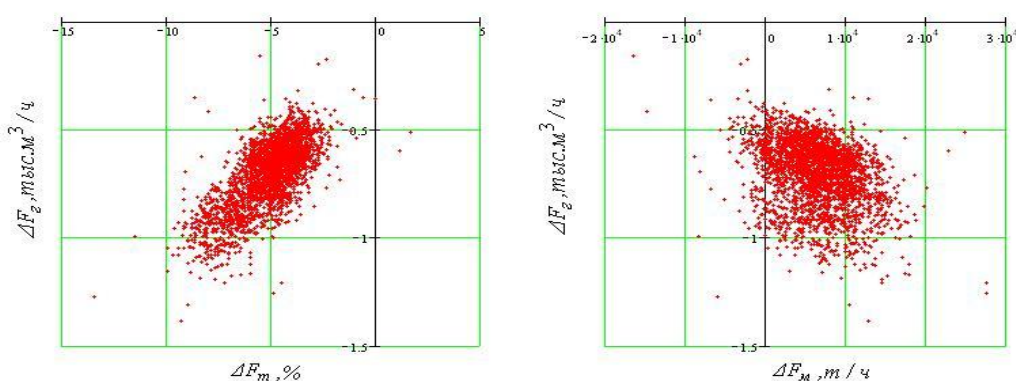


Рис.2. Графическое представление результатов коррекции измерений

Полученные двумерные проекции качественно иллюстрируют характер связей множества значений корректирующих поправок со значениями небалансов.

Как показали исследования, в случае отсутствия частичных отказов средств измерений и при наличии точной балансовой модели производства, ядро "облака" располагается в начале координат. При этом разброс "облака" обусловлен случайной составляющей погрешности измерений. Теоретически в случае отсутствия систематических и случайных погрешностей "облако" трансформируется в точку, расположенную в начале координат.

Из рис. 2 видно, что "облако" смещено относительно начала координат. Причиной такого смещения могут быть как систематические погрешности измерительных каналов, так и неучтенные факторы в модели объекта.

Диагностика частичных отказов ИИК как задача нечеткой классификации

С помощью алгоритма коррекции представляется возможным проводить и более глубокий анализ работы отдельных измерительных каналов. Если провести ряд циклов оценивания результатов измерения, определяя в каждом цикле относительную разность скорректированного и измеренного значений

$$\varepsilon_{x_i} = \frac{x_i^{изм} - x_i}{x_i^{изм}} = \frac{\Delta x_i}{x_i^{изм}}, \quad (5)$$

где x_i - оценка истинного значения измеренного параметра $x_i^{изм}$, то можно более точно говорить о погрешности работы отдельных измерительных каналов. А наличие повторяющегося от цикла к циклу большого значения ε_{x_i} с постоянным знаком может указывать на систематическую составляющую погрешности измерения i -го параметра.

Нарушение условия

$$|\Delta x_i| \leq \Delta x_i^*, \quad (6)$$

является признаком частичного отказа i -го измерительного канала (Δx_i^* - допустимое значение погрешности измерения).

Однако, если вклад измеряемых величин в формирование балансовых соотношений неравнозначен, проводить диагностические процедуры таким образом не корректно. Это объясняется тем, что на оценки истинных значений измеренных величин большое влияние оказывают вариации параметров, имеющих наибольший вес в балансовых соотношениях. Может возникнуть ситуация, когда частичный отказ какого-либо измерительного канала вызовет нарушение условия (6) не только для своего канала, но и для остальных, что приведет к ложным диагностическим выводам. Разрешить создавшуюся ситуацию позволяет подход, основанный на алгоритмах классификации.

Компоненты вектора диагностируемых параметров в простейшем случае можно представить тремя нечеткими термами (рис.3) относительно значений начального сбалансированного режима [5]:

- L (low) – если значение параметра занижается относительно значения в начальном сбалансированном режиме;
- N (normal) – если отклонение параметра не выходит за пределы допустимого диапазона относительно начального сбалансированного режима;
- H (high) – если значение параметра завышается относительно значения в начальном сбалансированном режиме.

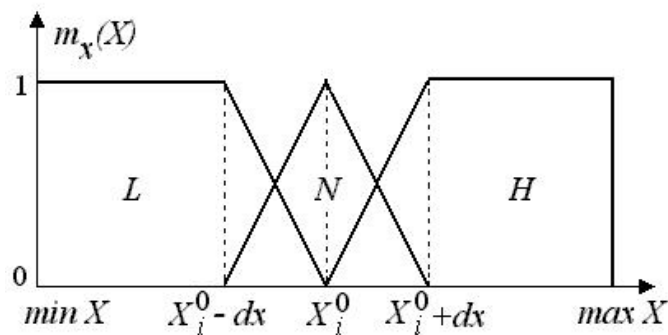


Рис.3. Графическое представление символической нечеткой переменной с треугольной функцией принадлежности

На рис. 4,а показана проекция "облака" на плоскость с координатами $\Delta F_2 - \Delta F_m$, полученная по центрированным данным, принятым для "идеально" работающей информационной системы АСУТП парового котла. На рис. 4,б показаны проекции "облака", соответствующие функциям принадлежности термов L, H и N для символической нечеткой переменной "расход газа", которые образуют множества F_2^N , F_2^L и F_2^H с нечеткими границами.

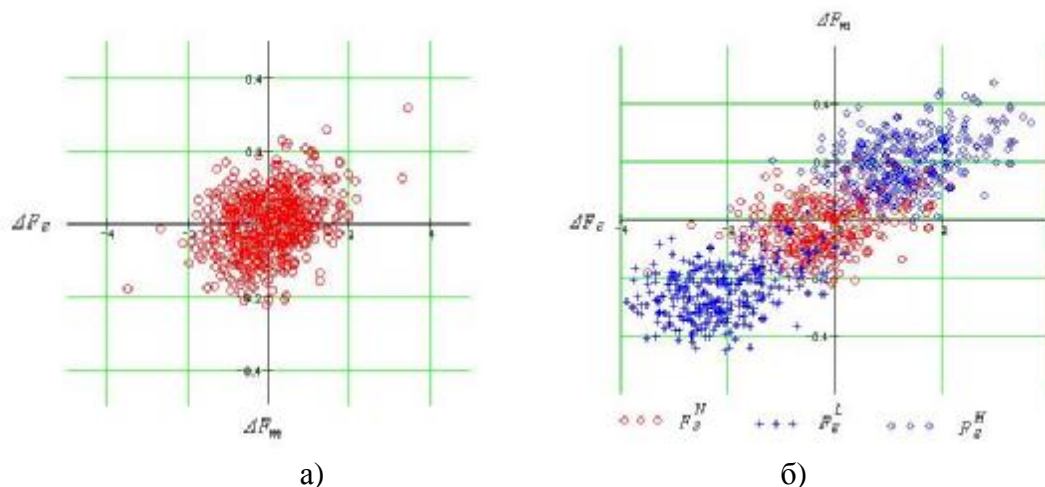


Рис.4. Влияние частичного отказа средств измерений на положение "облака" в факторном пространстве

Таким образом, предлагаемый подход позволяет свести диагностику частичных отказов к задаче нечеткой классификации. Анализируя величины небалансов и значения корректирующих поправок, можно говорить о степени принадлежности вектора измеренных параметров к какому-либо множеству. Структурная схема проведения диагностических процедур представлена на рис.5.



Рис.5. Структурная схема проведения диагностических процедур

Проведенные в работе исследования показали, что на величину корректирующих поправок Δx_i и соответствующее им положение "облака" в факторном пространстве оказывают влияние те параметры, которые имеют наибольший вес в балансовых уравнениях. В связи с этим диагностированию поддаются не все параметры, входящие в используемые расчетные формулы балансовых соотношений. Веса измеряемых параметров в балансовых соотношениях найдены в результате анализа чувствительности уравнений небалансов к вариациям результатов измерений. Величины вариаций, рассчитанные в соответствии с диапазоном измерения и основной допускаемой погрешностью, представлены в табл. 1.

Таблица 1.

| Параметр | Размерность | Верхний предел диапазона измерений | Предел основной допускаемой погрешности, % | Вариация параметра |
|----------|-----------------------|------------------------------------|--|--------------------|
| F_2 | тыс.м ³ /ч | 35 | 3 | ± 1 |
| D_{ne} | т/ч | 400 | 3 | ± 12 |
| G_{nb} | т/ч | 400 | 3 | ± 12 |
| t_{ne} | °C | 600 | 0,6 | ± 3,6 |
| t_{nb} | °C | 300 | 0,6 | ± 1,8 |

| | | | | |
|----------------|-----------------------|------|-----|--------------|
| C_{O_2} | % | 10 | 5 | $\pm 0,5$ |
| P_{ne} | кгс / см ² | 160 | 1 | $\pm 1,6$ |
| G_{np} | т / ч | 10 | 3 | $\pm 0,3$ |
| C_{CO} | % | 0,25 | 5 | $\pm 0,0125$ |
| t_{yx} | ⁰ С | 150 | 0,6 | $\pm 0,9$ |
| $t_{xв}^{кф}$ | ⁰ С | 100 | 0,6 | $\pm 0,6$ |
| $t_{вх}^{РВП}$ | ⁰ С | 100 | 0,6 | $\pm 0,6$ |
| $t_{xв}$ | ⁰ С | 100 | 0,6 | $\pm 0,6$ |
| $P_{бк}$ | кгс / см ² | 200 | 1 | ± 2 |
| $P_{нв}$ | кгс / см ² | 250 | 1 | $\pm 2,5$ |
| $P_{б}$ | кгс / м ² | 800 | 1 | ± 8 |

Наибольшие веса в уравнении материального баланса котла имеют расходы питательной воды $G_{нв}$ и пара $D_{не}$.

Результат анализа чувствительности теплового баланса котла к вариациям измеряемых параметров, представлен на рис.б.

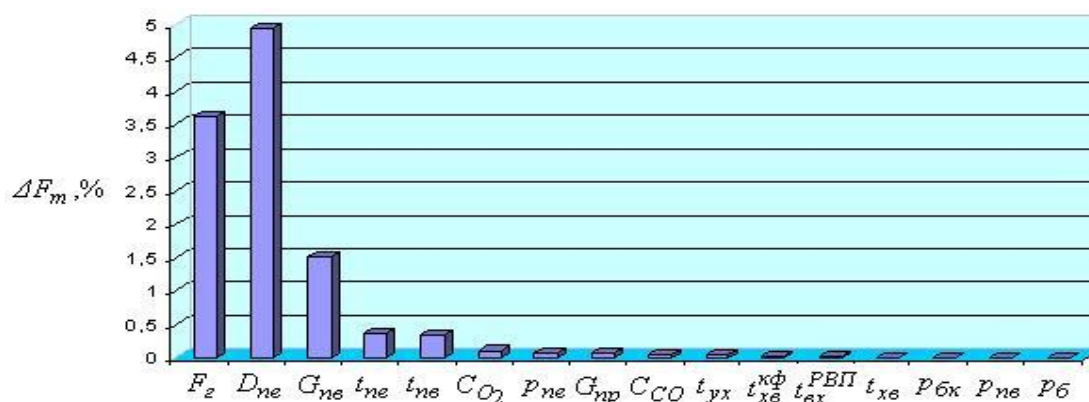


Рис.б. Чувствительность теплового небаланса котла к вариациям измеряемых параметров

Наибольшее влияние на тепловой небаланс оказывают расходы газа, воды и пара. Остальные параметры практически не оказывают влияния на величину теплового небаланса и их вариации не приводят к сдвигу "облака".

Таким образом, в соответствии с используемыми выражениями расчета балансовых соотношений, диагностируемыми параметрами принимаются расходы пара, питательной воды и топлива, что реально отображает сущность технологического процесса парообразования в котле. При необходимости диагностики параметров, имеющих малые веса, необходимо вводить дополнительные соотношения, в которые эти параметры входят с достаточным весом.

Для формирования обучающей выборки определялись диапазоны вариаций параметров, соответствующие термам L , N и H . В основу выбора положен экспертный подход, исходя из опыта эксплуатации ИИК. В качестве примера были выбраны диапазоны, приведенные в табл. 2.

Таблица 2.

| Параметр | Размерность | Диапазоны вариаций параметров | | |
|--------------|------------------------|-------------------------------|-------------|-----------|
| | | <i>L</i> | <i>N</i> | <i>H</i> |
| F_2 | тыс. м ³ /ч | -0.3...-1 | -0.3...+0.3 | +0.3...+1 |
| D_{ne} | т/ч | -3...-10 | -3...+3 | +3...+10 |
| G_{nv} | т/ч | -3...-10 | -3...+3 | +3...+10 |
| ΔF_m | % | -1...-5 | -1...+1 | +1...+5 |
| ΔF_M | т/ч | -3...-10 | -3...+3 | +3...+10 |

Решение задачи классификации с использованием искусственных нейросетей

В настоящее время, благодаря совершенствованию вычислительной техники, для решения задач классификации начинают широко применяться технологии нейросетевого моделирования [6], имеющие следующие достоинства:

- высокую эффективность работы с большими объемами данных;
- способность воспроизводить сложные нелинейные соотношения;
- отсутствие ограничений на функцию распределения данных;
- возможность обработки разнотипных экспериментальных данных;
- сохранение работоспособности при наличии пропусков в таблице обучающей выборки.

Для решения задачи классификации предлагается использовать прямонаправленные нейросети, выполненные в виде трехслойных перцептронов. В качестве активационной функции нейронов выходного слоя сети выбрана сигмоидальная функция вида:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}. \quad (7)$$

Выходное значение нейрона с активационной функцией (7) лежит в диапазоне [0,1] и показывает степень принадлежности входного вектора $E_k = (\Delta x_{1,k}, \dots, \Delta x_{l,k}, \Delta F_{1,k}, \dots, \Delta F_{m,k})$ какому-либо нечеткому множеству A_n . Так, значение активационной функции $\mu_{A_n}(E_k) = 1$ означает, что вектор E_k определенно принадлежит нечеткому множеству A_n , а значение $\mu_{A_n}(E_k) = 0$, что вектор E_k определенно не принадлежит нечеткому множеству A_n .

Для распознавания каждого класса используется индивидуальный трехслойный перцептрон, для обучения которого формируется индивидуальная обучающая выборка. Число нейронов промежуточного слоя принято равным полусумме числа входных и выходных нейронов сети.

Для диагностирования информационно-измерительного канала расхода газа была построена ИНС вида, представленного на рис. 7.

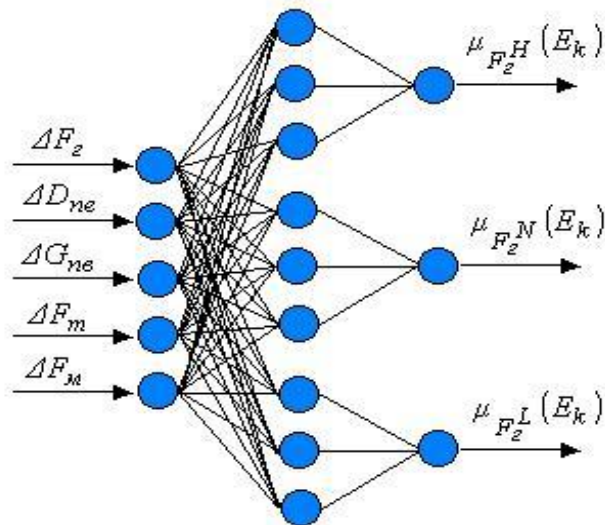


Рис.7. Топология нейросети для диагностики частичных отказов информационного канала измерения расхода газа

Входами нейросети являются величины корректирующих поправок расходов и значения небалансов, а выходами значения функций принадлежности.

В ходе обучения ИНС изменяются значения синаптических коэффициентов для каждого нейрона с целью минимизации среднеквадратичной ошибки сети между выходным и эталонными векторами. Обучение диагностической нейросети проводилось с использованием авторской версии модифицированного генетического алгоритма (МГА) [7,8].

Анализ результатов оценивания показал, что на величины корректирующих поправок измеряемых параметров их вариации оказывают взаимное влияние. Поэтому число тренировочных шаблонов определялось как полный перебор всех сочетаний переменных. В случае диагностики канала измерения расхода газа производился полный перебор сочетаний (H, N, L) трех переменных $(F_2, D_{ne}$ и $G_{ne})$. Тренировочные шаблоны для обучения нейросети формировались путем целенаправленной последовательной вариации параметров в соответствии с выбранными диапазонами (табл.2). Виды полученных тренировочных шаблонов в проекции на оси факторного пространства показаны на рис. 8.

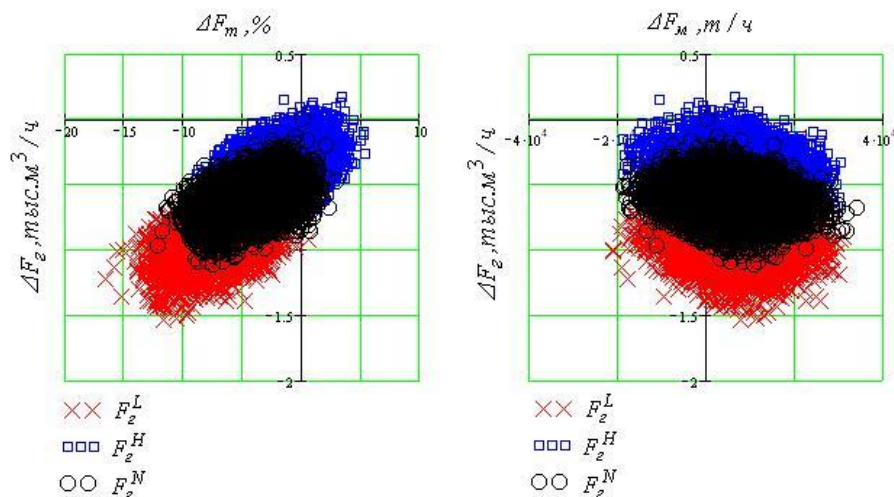


Рис.8. Тренировочные шаблоны для диагностирования расхода газа

Значения выходов обученной нейросети при вариациях расхода газа относительно сбалансированного режима показаны на рис. 9. Исходя из вида полученных функций принадлежности, порог принятия (минимальное значение выхода сети, при котором наблюдение будет считаться принадлежащим классу H или L) можно считать равным 0.5. В

связи с этим значение функций принадлежности $\mu_{F_2^H}(E_k) > 0.5$ или $\mu_{F_2^L}(E_k) > 0.5$ будет говорить о частичном отказе канала измерения расхода газа.

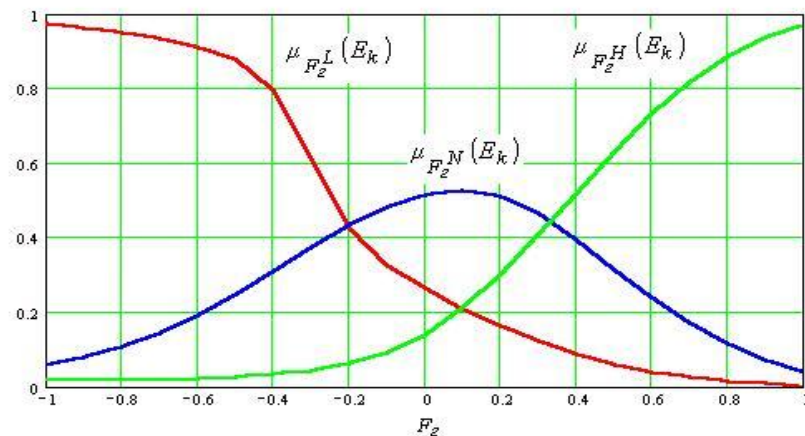


Рис. 9. Результат обучения нейросети

Подобным образом были построены нейросети и сформированы тренировочные шаблоны для диагностирования расходов питательной воды G_{nv} и пара D_{ne} .

Обработка выборки измеренных параметров с помощью предложенного метода показала, что диагностируемые информационные каналы в течение рассматриваемого промежутка времени работали в пределах основной допускаемой погрешности. Полученный результат позволяет сделать вывод об отсутствии частичных отказов ИИК.

Заключение

Предлагаемая методика диагностики частичных отказов измерительных каналов была опробована на одном из паровых котлов ТЭЦ-27. В качестве источника информационной избыточности использовались уравнения материального и теплового балансов. Полученная информация позволила диагностировать частичные отказы каналов измерения расходов газа, пара и питательной воды. Распространение методики на полную тепловую схему станции, включающую паровые и водогрейные котлы, а также оборудование турбинного цеха, значительно расширит перечень диагностируемых параметров в информационной структуре АСУТП ТЭЦ.

Предлагаемый подход с использованием технологий искусственного интеллекта дает возможность достаточно быстро и в реальном масштабе времени проводить перенастройку диагностической системы и адаптироваться к изменениям технологической ситуации.

Внедрение разработанной методики повысит достоверность получаемой информации, и тем самым, улучшит качество управления.

Список литературы

1. Ицкович Э.Л. Контроль производства с помощью вычислительных машин. М., "Энергия", 1975.
2. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И., Аракелян Э.К., Макаров О.Н., Андреев С.Н. Математическое и программное обеспечение алгоритма коррекции измеряемых параметров для расчета технико-экономических показателей на ТЭЦ.//Вестник МЭИ. 2003. №1.С.21-27.
3. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. РД 34.08.552-95. М.: СПО ОРГРЭС, 1995.

4. Алгоритм расчета ТЭП ТЭЦ-27 ОАО "Мосэнерго" для автоматизированного рабочего места производственно-технического отдела (АРМ ПТО)/Отчет по НИР в 3-х томах. Арх. № 14777, индекс ОТ и Т-2318.М.: ОАО ВТИ, 1999.
5. Агамалов О.Н. Оценка технического состояния электрооборудования в реальном масштабе времени методом нейро-нечеткой идентификации. Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. №2. С.36-44.
6. В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг, Т.Д. Зинченко. Количественная Гидроэкология: Методы Системной Идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. – 463 с.
7. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Параметрическая оптимизация и диагностика с использованием генетических алгоритмов// Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. №12. С. 27-32.
8. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ г. Москва, 8 апреля 2004 г.

¹111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, МЭИ.

²Московская обл., Мытищинский р-н, пос. Челобитьево, ТЭЦ-27 ОАО МОСЭНЕРГО