

**В.В. Овсяников**

*(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальний горний университет")*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

В статье предложен метод диагностики и управления показателями качества топлива в виде смеси угля и газа (или топочного мазута) на тепловых электростанциях. Результаты исследований можно использовать для автоматизации процесса оптимизации качества смеси этих топлив методом математического линейного программирования.

### **Введение и постановка задачи**

В настоящее время актуальность использования угля, газа и жидких нефтепродуктов на тепловых электростанциях (ТЭС) не снижается, несмотря на наличие альтернативных источников энергии. ТЭС продолжают расходовать более половины всего добытого угля. Актуальность оперативного и оптимального управления качеством топлива заключается в том, что каждый процент экономии топлива на ТЭС позволяет сэкономить сотни миллионов гривен в год. Ученые Ляпунов А.М., Моисеев Н.Н., Нейман Л.Р., Харвей А.Ф., Совлуков А.С. и другие на протяжении последнего столетия внесли значительный вклад в развитие методов оптимизации управления и разработку методов СВЧ-диагностики качества угля, газа и нефтепродуктов. В известных работах, например [1–4], уделяется большое внимание методам диагностики и управления показателями качества различных веществ, в частности, угля, жидких нефтепродуктов и газа путем измерения комплексной диэлектрической проницаемости (ДП), коэффициента отражения и поглощения электромагнитных волн, коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН). На основе этих методов разработаны, например, влаго- и золомеры углей в Российской Федерации институтом обогащения твердых горючих полезных ископаемых, а также фирмой «Коилскэн» (Австрия), фирмой «Бертольд» (Германия), европейской фирмой «АВВ», и т. д. Эти методы могут применяться при экспресс-контроле веществ одновременно с традиционными физико-химическими методами, дополняя или, при необходимости, заменяя их. Тем не менее, на сегодняшний день задача создания эффективной автоматизированной технологии управления качеством топлива на ТЭС не решена и ее актуальность растет.

Как известно, на ТЭС используется уголь с относительно низкой калорийностью с удельной тепловой сгорания (УТС) порядка 4700–5400 Ккал/кг. Для активизации процесса горения угля, то есть, для «подсветки» в топку ТЭС, как правило, дополнительно к углю подается незначительное количество топочного мазута или газа с калорийностью, значительно превышающей УТС угля (порядка 8000–9000 Ккал/кг). Кроме того, с целью экономного расходования угля на ТЭС используется смесь из двух и более углей различного сортамента с разной УТС. В связи с этим возникают две взаимосвязанные задачи.

Первая задача – обеспечение оперативной оптимизации качества смеси и передача этой информации в автоматизированную систему управления качеством топлива (СУКТ). В свою очередь, УКТ подает управляющие сигналы на исполнительные механизмы, которые и обеспечивают качество смеси. Допустим, что смесь топлив состоит минимум из трех компонентов: уголь низшего сорта, уголь высшего сорта и газ (или топочный мазут), или из 4-х компонентов: уголь низшего сорта, уголь среднего сорта, уголь высшего сорта и газ или топочный мазут. Тогда задачу оптимизации предлагается решать с учетом минимизации затрат на приобретение всех составляющих топлива и с учетом минимизации УТС смеси, необходимой для создания в топке ТЭС заданной температуры. (Затраты на подачу воздуха в топку ТЭС для обеспечения оптимального процесса горения топлива можно учитывать в общих затратах ТЭС).

Вторая задача – это диагностика и контроль параметров качества топлива, а именно значений УТС, влажности и тому подобное, для каждой составляющей топлива и для смеси этих топлив с помощью системы диагностики качества топлива (СДКТ) и передача информации в (СУКТ).

### **Управление процессом создания смеси топлив на ТЭС**

Эту задачу предлагается решать методами прикладной математики. Для оптимизации смеси, сжигаемой в топке ТЭС целесообразно построить математическую модель и применить, например, метод математического программирования. Термин «математическое программирование» предложил Роберт Дорфман в 1950 г. Это понятие включает такие разновидности, как линейное программирование, целочисленное программирование, выпуклое программирование, нелинейное программирование и программирование при наличии неопределенности. Важными разновидностями прикладной математики являются методы линейного и нелинейного программирования. В связи с тем, что такие исследуемые парамет-

ры, как стоимость топлива и его УТС с одной стороны и масса компонентов топлива и его смеси с другой, находятся между собой приблизительно в линейной зависимости. Для оптимизации смеси топлив целесообразно использовать метод линейного математического программирования. Термин «линейное программирование» возник в результате неточного перевода английского «linear programming» [5]. Одним из значений слова «programming» является составление планов, планирование. Следовательно, верным переводом этого термина было бы не «линейное программирование», а «линейное планирование», «планирование на основе линейных соотношений», что более точно отражает смысл задачи оптимизации смеси нескольких сортов угля, газа или мазута.

Задачу линейного программирования сформулируем так, что нужно минимизировать функцию:

$$y = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (1)$$

при наличии ограничений

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i - b_j \geq 0, \quad j=1, \dots, m, \quad x \geq 0, \quad i=1, \dots, n, \quad (2)$$

где  $a, b, c$  – константы, а  $x$  – искомая переменная.

Для решения задачи (1) и (2) существуют различные методы [5]. Один из них – матричный с использованием модифицированного симплексного метода. Согласно матричному методу  $\bar{x}$  и  $\bar{c}$  являются вектор-столбцами с размерностью  $n \times 1$  в  $E^n$  (то есть в  $n$ -мерном евклидовом пространстве переменных),  $a$  – матрица констант размерностью  $n \times m$  и  $\bar{b}$  – вектор-столбец размерностью  $m \times 1$ :

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix}, \quad \bar{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}, \quad \bar{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Тогда в матричном виде уравнения (1) и (2) запишутся так:

$$\text{минимизировать} \quad y \equiv f(x) = \bar{c}^T \bar{x} \quad (4)$$

$$\text{при ограничениях} \quad a^T \bar{x} \geq \bar{b}, \quad \bar{x} \geq \bar{b}, \quad (5)$$

$$\bar{x} \geq 0, \quad (6)$$

где верхний индекс  $T$  обозначает транспонирование. Вектор  $\bar{x}$ , который удовлетворяет соотношения (4), (5) и (6) представляет собой искомое решение задачи.

Конкретизируем метод линейного программирования для оптимизации состава смеси топлива для топки ТЭС. При этом используем математическую модель линейной оптимизации в виде соотношений (1), (2), (3), (4), (5), и (6). Тогда целевая линейная функция, которая должна быть минимизирована, имеет следующий вид:

$$f(x) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n = (c, x), \quad (7)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – искомые переменные оптимизации;  $c_1, c_2, \dots, c_n$  – некоторые константы.

При создании математической модели процесса оптимизации состава смеси, предположим, что искомые переменные  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – удельные массы компонентов смеси топлив, а константы  $c_1, c_2, \dots, c_n$  – удельные калорийности или удельная теплота сгорания каждой компоненты смеси. Целесообразно также в качестве констант  $c_1, c_2, \dots, c_n$  одновременно использовать стоимость каждого компонента смеси. То-

гда целевую функцию (1), (4) необходимо минимизировать (а не максимизировать) и в результате расчетов мы можем получать оптимальные значения массы каждого компонента смеси при минимальной удельной калорийности или УТС смеси и минимальной ее стоимости для обеспечения в топке ТЭС необходимого температурного режима.

Для этого случая запишем уравнение целевой функции (7) отдельно для оптимизации удельной массы каждого из компонентов смеси с учетом минимизации удельной калорийности (или УТС) смеси (8), а также для оптимизации удельной массы каждого компонента смеси с учетом их стоимости (9):

$$f(x^K) = c_1^K x_1^K + c_2^K x_2^K + \dots + c_n^K x_n^K = (c, x), \quad (8)$$

где  $x_1^K, x_2^K, \dots, x_n^K$  – искомые массы компонентов смеси топлива при оптимизации с учетом калорийности каждой составляющей смеси;  $c_1^K, c_2^K, \dots, c_n^K$  – калорийности или УТС каждого компонента смеси;  $n$  – количество компонентов топлива, которые составляют смесь.

$$f(x^e) = c_1^e x_1^e + c_2^e x_2^e + \dots + c_n^e x_n^e = (c, x), \quad (9)$$

где  $x_1^e, x_2^e, \dots, x_n^e$  – искомые массы компонентов смеси топлива при оптимизации, с учетом стоимости каждой составляющей смеси;  $c_1^e, c_2^e, \dots, c_n^e$  – стоимость каждого компонента смеси.

Функции (8) и (9) неограничены, потому искать их минимум или максимум необходимо с учетом некоторых ограничений (2), (5) и (6).

Изложенный метод линейного программирования можно взять за основу автоматизированной оптимизации количества каждой составляющей смеси, и определения минимальной стоимости и минимальных значений УТС смеси для различных заданных вариантов стоимости, значений УТС компонентов и условиях ограничений в любой момент времени.

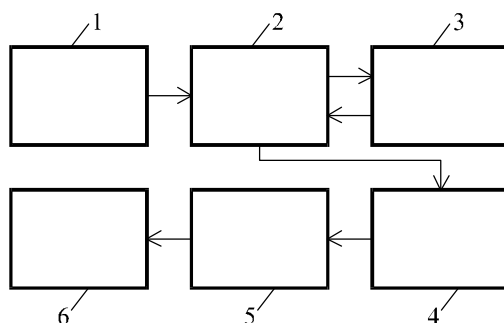
#### **Методы диагностики для автоматизации управления параметрами смеси топлив на ТЭС**

Известны современные методы контроля параметров качества веществ, в том числе углей и жидких нефтепродуктов такие, как электромагнитные, спектроскопические, радиационные, тепловые и т. п. Среди них наиболее перспективными для применения на ТЭС являются электромагнитные (ЭМ) – эффективные и экологически чистые методы. В связи с тем, что угли и жидкие нефтепродукты являются диэлектриками, эти методы основаны на измерении одного из ЭМ параметров. Это может быть комплексная диэлектрическая проницаемость (ДП) или комплексные коэффициенты затухания (отражения) ЭМ волны от исследуемого вещества, либо КСВН в ЭМ микроволновом (СВЧ) диапазоне частот [1]. Этот диапазон занимает частотную полосу от 30 МГц до 300 ГГц, что соответствует метровым, дециметровым, сантиметровым и миллиметровым длинам волн. При этом для диагностики необходимо использовать корреляционную связь между значениями УТС и другими параметрами качества топлив с одной стороны и упомянутыми выше ЭМ характеристиками диэлектриков (углей и жидких нефтепродуктов) с другой стороны.

С учетом обычных метрологических принципов измерений физических величин путем сравнения результатов измерения электрических параметров с заранее известными измеренными эталонными значениями для данного вещества процесс диагностики, идентификация и контроля качества углей и нефтепродуктов предлагается осуществлять в 2 этапа:

– на первом этапе измеряется набор калибровочных (или эталонных) характеристик для различных углей и мазутов на одной или нескольких частотах микроволнового диапазона, то есть создается банк калибровочных данных для широкой разновидности этих веществ, применяемых на данном предприятии. Эти калибровочные характеристики представляют собой таблицу соответствия ЭМ характеристик данных веществ (ДП, затуханий или КСВН), соответствующим параметрам качества: значениям УТС, влажности и т. п. Полученные результаты сохраняются в памяти ЭВМ;

– на втором этапе с учетом этого банка данных путем сравнения калибровочных и измеренных данных для углей и нефтепродуктов проводится диагностика и идентификация ЭМ параметров и параметров качества (значений УТС, влажности и т. п.), применяемых на ТЭС топлив и их смесей. При этом для контроля ДП можно применять измерительную линию (ИЛ) 2 или другой прибор для измерения комплексного значения входного сопротивления в установке, показанной на рис. 1.



**Рис. 1. Структурная схема установки диагностики и управления качеством веществ (СДУК):**  
**1 – генератор сверхвысоких частот; 2 – аналоговая ИЛ; 3 – датчик качества (ДК) с контролируемым**  
**веществом (уголь, мазут); 4 – аналого-цифровой преобразователь;**  
**5 – система диагностики качества топлива (СДКТ); 6 – система управления качеством топлива (СУКТ)**

Метод определения ДП с помощью измерительной линии 2 и датчика качества 3 [6] заключается в использовании взаимосвязи между параметрами ДК с исследуемым веществом, рабочей частотой генератора, КСВН и фазой коэффициента отражения на входе ДК. С помощью ИЛ измеряется комплексный импеданс исследуемого вещества, помещенного в ДК. Затем определяется комплексная ДП и тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ). При этом точность определения ДП зависит от точности измерения КСВН, которая зависит от точности определения максимального и минимального значений в распределении напряжения вдоль ИЛ. Известно [7], что при больших значениях КСВН относительная погрешность определения КСВН и, следовательно, ДП резко возрастает. Снижение точности измерения КСВН недопустимо при точных определениях ДП веществ, которая характеризует их качественные параметры, например, степень чистоты жидких нефтепродуктов, калорийность и влажность углей, и других веществ. Для повышения точности определения ДП предлагается определять высокие значения КСВН путем измерения одного из напряжений  $U_1, U_2 \dots U_i$ , вдоль ИЛ в местах, близких к экстремуму минимального напряжения, так и минимальное значение напряжения  $U_{min}$ , так как максимальные значения выходят за верхний предел шкалы измерительного прибора. В таком случае с учетом [7] предлагается определять КСВН по формуле:

$$КСВН_i = \frac{1}{\sin(kl_i)} \sqrt{\frac{U_i}{U_{min}} - \cos^2(kl_i)}, \quad (10)$$

где:  $U_{min}$  – минимальное значение напряжения в распределении вблизи ее минимума (не выше точки перегиба кривой);  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $kl_i$  – координата местоположения измерительной головки ИЛ, которая соответствует измеренному значению напряжения  $U_i$ ,  $i$  – номер измеряемой точки.

Время измерения и обработки результатов для одной пробы, помещаемой в датчик качества 3, вместе с подготовительными операциями не превышает 20–30 мин. Для сравнения отметим, что при определении калорийности, зольности и влажности известными традиционными физико-химическими методами в специальных лабораториях при ТЭС и других предприятиях требуется намного больше времени (3–4 часа). Поэтому контроль параметров качества ЭМ методом и обработка их в специализированной СДКТ 5 и передача управляющего сигнала в СУКТ предприятия 6 производится намного быстрее, чем традиционными методами. Однако обеспечить управление технологическим процессом при контроле качества данным ЭМ методом в режиме реального времени не всегда представляется возможным.

После определения параметров качества компонентов смеси в СДКТ вступает в действие алгоритм метода линейного программирования в СУКТ для оптимизации их количества. При использовании равенства формулы (10) относительная погрешность определения КСВН и ДП снижается до значений 2–3% и менее, что было проверено методом направленных ответвителей. Для определения неизвестного значения УТС, влажности и т.п., которая соответствует измеренной заранее паре критериев  $\epsilon'$  – действительной части диэлектрической проницаемости вещества и  $tg\delta$ , для того же вещества, решается задача оптимизации параметров путем определения минимумов каждой из двух целевых функций:

$$X_{\epsilon'}(Q_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \left[ \epsilon'_{j,k} - \epsilon'(Q) \right] / \epsilon'(Q) \right\}^2, \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, K, \quad (11)$$

$$X_{tg\delta}(Q_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{ [tg\delta_{j,k} - tg\delta(Q)] / tg\delta(Q) \}^2 \quad \text{при } k = 1, 2, \dots, K, \quad (12)$$

где  $Q_k$  – дискретные значения калорийности угля (мазута);  $N$  – общее количество пар дискретных значений  $\epsilon'$  и  $tg\delta$  (параметры оптимизации);  $K$  – общее количество дискретных значений  $Q_k$ ;  $\epsilon'(Q)$ , и  $tg\delta(Q)$  – измеренные пары значений (критерии оптимизации), соответствующие конкретным значениям калорийности (зольности, влажности) угля или мазута данной марки;  $\epsilon'_{j,k}$ ,  $tg\delta_{j,k}$  – набор эталонных значений  $\epsilon'$  и  $tg\delta$ .

После определения минимумов целевых функций (11) и (12), программа ЭВМ обеспечивает определение пар значений качества  $Q_{tg\delta_1}, Q_{tg\delta_2}, \dots, Q_{tg\delta_K}$ , и  $Q_{\epsilon'_1}, Q_{\epsilon'_2}, \dots, Q_{\epsilon'_K}$ , соответствующих этим минимумам. Далее производится сравнение значений калорийностей, найденных по формулам (11) и (12), определяется пара значений калорийностей, ближайших между собой, что и будет решением задачи  $Q_i^*$ .

### Выводы и рекомендации

Отмечено, что на традиционные физико-химические методы диагностики углей и нефтепродуктов в лабораториях ТЭС и на других предприятий расходуется значительное время (3–4 часа). Предложено наряду с этими методами использовать микроволновый ускоренный экспресс-контроль топлив и оперативную передачу информации в аппаратуру математического программирования смеси топлива, которая работает в соответствии с предложенным алгоритмом.

### Список литературы

1. Викторов, В.А. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов [Текст] / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 208 с.
2. Венцель, Е.С. Исследование операций: задачи принципы, методология [Текст] / Е.С. Венцель. 2-е изд., стер. М.: Наука, 1988, 208 с.
3. Егоров, А.П. Автоматизированная система управления механическими свойствами термоупрочненного проката [Текст] / А.П. Егоров, В.С. Ткачев, Н.А. Богданов, Т.Л. Лебедева // Применение вычислительной техники в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1989. – С.77–79.
4. Куваев, В.Н. Особенности построения программного обеспечения многозадачных систем управления критичных к режиму реального времени [Текст] / В.Н. Куваев, И.В. Политов // Радіоелектроніка Інформатика Управління. – 1999. – № 1. – С. 71–74.
5. Моисеев, Н.Н. Методы оптимизации [Текст] / Н.Н. Моисеев., Ю.П. Иванюков, Е.М. Столярова – М.: Наука, 1978. – 352 с.
6. Овсяников Вол. В. Экспрес-контроль якості вугілля радіометричним методом [Текст] // Вісник національного ТУУ «КП», серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. – Вип. 43. – С. 24–31.
7. Фрадин, А.З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств [Текст] / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков. – М.: Связь, 1972. 420 с.

*Рекомендовано до друку проф. Куваевим В.Н.*