

*В.Д. Трифонов, Д.В. Трифонов, кандидаты техн. наук  
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

## **ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА**

Существующие способы экономии электроэнергии на угольных шахтах не в полной мере учитывают технологию угледобычи, связаны с увеличением капитальных вложений, не снижают срок окупаемости и, что особенно важно, не используют новые направления повышения энергоэффективности, например энергетический аудит, которому в последние годы уделяется большое внимание как в Украине, так и за рубежом.

К основным задачам энергетического аудита можно отнести: установление информативных признаков, характеризующих эффективность работы угольных шахт и выявление предпосылок наличия статистических связей между ними; изучение взаимосвязей между объектами и оценка степени их сходства; классификация угольных предприятий на базе современных математических методов; установление однородности однотипных угольных шахт по электропотреблению; построение многофакторных моделей эффективности использования электроэнергии; определение комплексного показателя эффективности электропотребления шахтных производственных систем; построение аналитической модели и прогнозирование комплексного показателя энергоэффективности.

Решение указанных задач находится в прямой зависимости от полноты получаемой и обрабатываемой информации о состоянии энергоемких технологических процессов и агрегатов исследуемого объекта. В то же время наличие большого количества исходных данных, содержащих информацию как о других элементах описания объектов, так и об их совокупности в целом, увеличивает объем задачи, затрудняет ее решение и требует применения статистических методов, например при классификации (распознавании образов) угольных предприятий [1].

В статистических исследованиях группирование первичных информативных данных – основной способ установления правил отнесения объекта к одной или нескольким группам (категориям, классам) на основании измерения некоторого числа его характеристик (признаков) и построения описания классов. При этом не всегда удается однозначно установить степень принадлежности объекта управления к вполне определенному классу. Однако применение теории распознавания образов значительно облегчает проведение классификации угольных шахт, сущность которой заключается в следующем [2,3].

Для некоторой совокупности исследуемых объектов  $\Omega = \{\omega\}$ , каждый из которых задан значениями своих признаков, можно записать:

$$\begin{aligned}
 \omega_1 &\rightarrow \bar{X}_1 = \{X_1^1, X_1^2, \dots, X_1^n\} \\
 \omega_2 &\rightarrow \bar{X}_2 = \{X_2^1, X_2^2, \dots, X_2^n\}, \\
 \omega_z &\rightarrow \bar{X}_z = \{X_z^1, X_z^2, \dots, X_z^n\}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Необходимо подразделить объекты на типовые и однородные в некотором смысле группы (классы) – кластеры (таксоны, образы). Здесь нет обучающей выборки, т.е. неизвестно, какие объекты из множества  $\Omega = \{\omega\}$  к каким группам относятся, однако что надлежит подразумевать под понятием “типичные” и “однородные” объекты, каковы закономерности структуры объектов в группах, должно быть задано. В частности, в основу типологической классификации положены технологические факторы, с помощью которых устанавливается однородность типовых групп угольных шахт по электропотреблению.

При этом должны выдерживаться два определяющих положения: в один класс объединяются объекты, сходные между собой в некотором смысле; степень схождения между собой у объектов, принадлежащих к одному классу, должна быть больше, чем у объектов, относящихся к разным классам. Кроме того, следует учесть, что каждый из информативных факторов характеризуется еще несколькими показателями различного характера. Это приводит к тому, что экспертные типологические группы одних и тех же предприятий могут оказаться различными. В частности, различие естественных природных условий приводит к тому, что один и тот же расход электроэнергии не соответствует количеству добытого полезного ископаемого. Для угольных шахт влияние, например, горно-геологического фактора настолько велико, что необходимо считаться не только с региональными особенностями (ОАО “Укрзападуголь”, “Павлоградуголь”, “Донецкуголь” и др.), но и с различием внутри одного и того же бассейна [4]. В результате такой классификации, отражающей технологию, режимы работы основных энергоемких агрегатов и объемы электропотребления, должны быть созданы типовые, достаточно компактные и однородные группы угольных шахт.

В целом задача классификации состоит в установлении правил отнесения объекта управления к одному из классов на основе анализа факторов, влияющих на эффективность электропотребления и построение описания классов. В дальнейшем под классом объекта управления будем понимать некоторое подмножество угольных шахт, выделенное при помощи решающего правила. При этом число классов неизвестно и определяется с помощью методов автоматической классификации. Собственно формализация задачи классификации угольных шахт основывается на объективно существующей общности шахт одного и того же класса, часто определяемое понятием “сходство”. Наиболее употребительной мерой схождения является евклидово расстояние [5].

Все многообразие факторов, формирующих электропотребление исследуемых объектов, можно разделить на ряд характерных групп: горно-геологические, климатические, организационно-экономические, технологические, энергетические, технические [3,6]. Причем одни и те же факторы могут быть внешними и внутренними для конкретного предприятия. Это определяет

ся иерархическим уровнем и технологической спецификой электропотребителей. Структура и взаимосвязь информативных факторов приведены на рис.1. В основу положена схема “Исикава”, используемая для выявления состава факторов на объект анализа и определения значимости этих факторов [7]. Схема представляет собой графическое упорядочение многообразных факторов, влияющих на объект анализа, и в частности, на энергоэффективность. Она дает наглядное представление не только о совокупности различных факторов (характеристик), но и о причинно-следственных связях этих факторов.

При построении такой схемы к центральной горизонтальной стрелке, изображающей объект анализа, присоединяют большие (первичные) векторы, характеризующие главные факторы, влияющие на исследуемый объект. Далее к каждому первичному вектору присоединяют векторы второго порядка, затем к ним векторы третьего порядка и так до тех пор, пока на схему не будут нанесены все факторы, оказывающие заметное влияние на объект анализа в конкретных производственных условиях. При этом не существует определенных правил в последовательности расположения и угла наклона векторов. Главное при построении схемы – обеспечение правильной соподчиненности и взаимозависимости факторов, а также четкость оформления схемы.

Анализ показывает, что при таком большом разнообразии информативных факторов и показателей получить полную классификацию угольных шахт затруднительно. При этом требуется участие специалистов (инженерно-технических работников) различного профиля – энергетиков, технологов, организаторов производства и др.

Однако мнение специалистов о степени влияния различных информативных факторов на эффективность электропотребления любого предприятия едва ли можно считать однозначным, т.е. такая оценка будет носить субъективный характер. Поэтому для успешного определения исходного факторного поля широко применяют метод экспертных оценок, позволяющий придать значительную долю объективности мнениям специалистов – экспертов.

Точность и надежность этого метода (процедуры ранжирования) в значительной степени зависят от количества объектов (факторов). Чем таких факторов меньше, тем выше их “различимость” с точки зрения эксперта, а следовательно, тем более надежно можно установить ранг фактора. Во всяком случае количество исследуемых факторов не должно быть больше 20, а наиболее успешна эта процедура, когда этих факторов меньше 10 [8].

При этом одно из главных условий – подбор соответствующих специалистов, поскольку результативность их опроса будет зависеть от их компетентности. Оценка уровня компетентности того или иного специалиста является довольно сложной задачей и до сих пор не существует объективных способов ее решения. Поэтому для подбора экспертов может быть применен метод само-

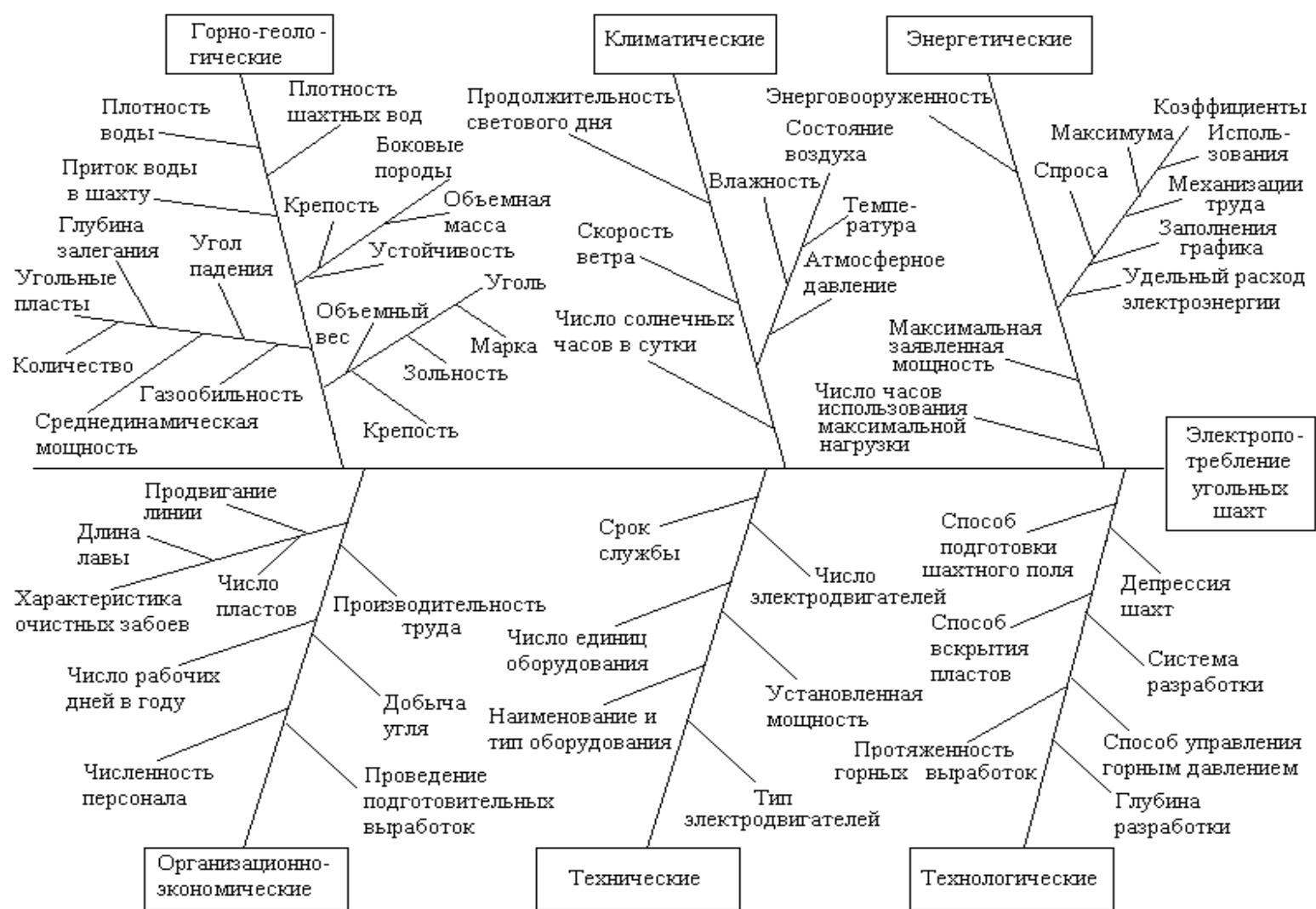


Рис.1 Влияние факторов на электропотребление угольных шахт.

оценки специалистами уровня своей компетентности и компетентности своих коллег. Кроме того, зачастую оценку уровня значимости компетентности экспертов осуществляют с помощью статистических критериев, например,  $F$ -критерия Фишера. Полученное в результате обработки мнений специалистов-экспертов факторное поле может быть положено в основу формирования математической модели.

В задачу классификации входит установление степени принадлежности исследуемых объектов к тому или иному классу, т.е. необходимо идентифицировать объекты управления с полученными классами.

Пусть исследуемая совокупность состоит из  $S$  классов, полученных в результате классификации. Тогда каждому объекту  $Z \in U$  необходимо поставить в соответствие  $S$  действительных неотрицательных чисел  $\mu(S_{e/z})$  ( $e = 1, 2, \dots, n$ ), означающих вероятность того, что объект  $Z$  относится к  $k$ -му классу. Очевидно,

что  $\sum_{i=1}^n \mu(S_{e/z}) = 1$ . Для каждого класса можно рассчитать оценку вероятности того, что объект, обладающий  $e$ -й градацией признака  $x_r$  из описания класса, принадлежит данному классу:

$$P_k(x_r^e) = \frac{n_k(x_r^e) + 1}{n_k(x_r) + e(x_r)}. \quad (2)$$

Здесь  $n_k(x_r^e)$  – число объектов, обладающих  $e$ -ой градацией  $x_r$  в  $k$ -м классе;  $e(x_r)$  – число градаций признака  $x_r$ ;  $n_k(x_r)$  – число объектов в  $k$ -м классе, имеющих любое из значений  $x_r$ .

Соответственно вероятность принадлежности объекта к  $k$ -му классу с учетом всей совокупности признаков из описания будет равна произведению вероятностей  $P_k(x_r^e)$  с числом сомножителей, равным числу признаков описания.

Оценка априорных вероятностей каждого класса записывается как

$$p(S_k) = n_k / n.$$

Используя формулу Байеса, получим выражение для оценки  $\mu(S_k/z_i)$  – степени принадлежности объекта  $z_i$  с измерениями  $\{x_n^i\}$  к  $k$ -му классу:

$$\mu(S_k/z_i) = \frac{p(S_k)P_k(z_i)}{\sum_{k=1}^n p(S_k)P_k(z_i)}.$$

Здесь  $P_k(z_i) = \prod_{(r)} P_k(x_r^i)$ , а  $P_k(x_r^i)$  вычисляется по формуле (2) с учетом категории, к которой относится объект  $z_i$  по признаку  $x_r$ .

Задача классификации угольных предприятий состоит не только в получении отдельных однотипных групп шахт. Чаще всего на стадии проектирования требуется отнести ту или иную единицу угольной шахты к одному из имеющихся классов (групп), т.е. решить задачу диагностики. При этом представляет интерес оценка различимости выделенных классов, называемая иногда оценкой ошибки диагностирования. Если предположить, что признаки-компоненты описания классов независимы, то эту оценку можно получить как отношение функций принадлежности (2):

$$\gamma_{k,k+1} = \frac{\mu(S_k / z)}{\mu(S_{k+1} / z)} \approx \frac{p(S_k)P_k(z)}{p(S_{k+1})P(z)},$$

где  $P_k(z) = \prod_{(j)} P_k[r_j(k)]$ .

По аналогии с теорией проверки статистических гипотез [9,10] рассмотрим критерий согласия  $\chi^2$ , где через  $\alpha$  обозначим вероятность ошибки, заключающейся в принятии класса (группы)  $S_k$  за  $S_{k+1}$  при идентификации объекта, а через  $\beta$  – ошибку признания  $S_{k+1}$  за  $S_k$ .

Если

$$\frac{\alpha}{1-\beta} < \gamma_{k,k+1} < \frac{1-\alpha}{\beta}, \quad (3)$$

то классы не различимы по последовательности информативных признаков  $x_1, \dots, x_j \dots, x_q$  с заданной степенью надежности. Выражение (3) может служить дополнительным критерием оценки при построении иерархической типологической классификации, а последовательность значимых признаков, удовлетворяющая (3), оказывается достаточной в смысле информативности и является дискриминирующей по отношению к  $k$ -му классу [11,12].

Приведенный теоретико-информационный подход может применяться для решения задач энергетического аудита, и в частности, построения типологической классификации действующих угольных шахт с учетом состава природных, технологических, энергетических и других информативных факторов.

#### Список литературы

1. Боннер Р.Е. Некоторые методы классификации. В сб.: Автоматический анализ сложных изображений. – М.: Мир, 1969. – с.32-36.
2. Елисеева И.И., Рукавишников В.О. Группировка, корреляция, распознавание образов (Статистические методы классификации и измерения связи). – М. : Статистика, 1977. – 144 с.
3. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. Современное состояние проблемы распознавания образов. – М. : Радио и связь, 1985. – 166 с.
4. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. – М. : Недра, 1985. – 232 с.
5. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. – М. : Советское радио, 1972. – 208 с.

6. Пивняк Г.Г., Слесарев В.В. Эффективный подход к экономии электроэнергии на шахтах Западного Донбасса // Уголь Украины. – 1995. – №6. – с. 26–29.
7. Методы обеспечения качества продукции в Японии. – М. : Изд-во стандартов, 1970. – 58 с.
8. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
9. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М. : Физматгиз, 1961. – 364 с.
10. Плескунин В.И., Воронина Е.Д. Теоретические основы организации и анализа выборочных в эксперименте / Под ред. А.В. Башарина. – Л. : ЛГУ, 1979. - 320 с.
11. Дж. Ту, Р. Гонсалес. Принципы распознавания образов. (Пер. с англ.). – М. : Мир, – 1978. – 411 с.
12. Лбов Г.С., Котюков В.И., Манохин А.Н. Об одном алгоритме распознавания в пространстве разнотипных признаков. Сб. трудов ИМ СО АН СССР. – “Вычислительные системы”. Вып. 55, 1973. – с. 108 – 110.