

УДК 620.9:339.13

Е.Ю. Косенко, А.Я. Номерчук

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Энергосистема – сложная многоуровневая структура. Товаром в ней является электроэнергия гарантированного качества, количество которой определяется запросами потребителей и возможностями энергосистемы. Прохождение электроэнергии по всей производственной цепочке энергосистемы требует достоверного, точного и оперативного учета [1].

С коммерческой точки зрения такой учет необходим для выявления произведенной, переданной, распределенной и потребленной электроэнергии, с тем чтобы получить за нее соответствующую плату.

Системный аспект учета состоит в его незаменимости для планирования, прогнозирования и оценки эффективности работы структур энергосистемы.

С позиций производства современный учет служит для выявления, анализа и снижения производственных потерь. Нужен он и для регулирования режимов работы энергосистемы, и для выявления безучетного потребления энергии.

В целом же современный энергоучет необходим для повышения эффективности работы энергосистем, снижения их издержек и себестоимости электроэнергии, повышения их конкурентоспособности в условиях монополизации рынка энергии.

Промышленность Российской Федерации, несмотря на спад производства за последние годы, остается основным потребителем энергоресурсов. Доля промышленного потребления электроэнергии в отдельных регионах достигает 60 - 65%. С распадом плановой экономики закончилась эпоха практически неограниченных и дешевых энергоресурсов, когда их доля в себестоимости продукции составляла всего лишь несколько процентов.

На сегодняшний день из-за многократного удорожания энергоресурсов их доля в себестоимости продукции для многих промышленных предприятий резко возросла и составляет 20 - 30%, а для наиболее энергоемких производств достигает 40 и более процентов.

Реформа электроэнергетики формирует оптовые и розничные рынки электроэнергии, и крупные потребители получают формальное право выхода на оптовый рынок, где цена на электроэнергию складывается рыночным способом и может быть существенно ниже розничной цены [2].

Мелкие потребители не могут выйти на оптовый рынок в силу законодательного ограничения минимальной мощности, с которой этот выход возможен. Однако и для крупных потребителей возникает масса технических, юридических, экономических проблем, одна из которых – повышение точности прогноза электропотребления, на основе которого формируется заявка. Необходим месячный прогноз с разбивкой по суткам и часам.

Эта задача не может быть решена качественно без применения математических методов прогнозирования.

Сформулируем общие принципы решения проблемы прогнозирования параметров электропотребления.

Прогнозирование параметров электропотребления необходимо при принятии решений в управлении предприятием и способствует:

1. Уменьшению рисков. Поскольку прогнозирование никогда не сможет

полностью уничтожить риск при принятии решений, то необходимо явно определять требуемую точность прогноза.

2. Изучение функций энергетического менеджмента на предприятии и технологии производства должно помочь ответить на вопросы о том, какие параметры электропотребления прогнозировать и какие влияющие факторы учитывать.
3. При определении того, что нужно прогнозировать (выбор параметров электропотребления, которые будут анализироваться и предсказываться), очень важен требуемый уровень детализации. На используемый уровень детализации влияет доступность и точность данных.
4. Определение периода прогнозирования, горизонта прогнозирования и интервала прогнозирования.

Период прогнозирования является основной единицей времени, на которую делается прогноз.

Горизонт прогнозирования – это число периодов в будущем, которые покрывает прогноз.

Под *интервалом прогнозирования* понимается частота, с которой делается новый прогноз. Часто интервал прогнозирования совпадает с периодом прогнозирования, то есть прогноз пересматривается каждый период, используя требование за последний период и другую текущую информацию.

В зависимости от используемых интервалов прогнозирования, в электроэнергетике используется следующая классификация прогнозов[2]:

– перспективный прогноз – пять лет и более (для целей стратегического развития промышленного региона);

– долгосрочный годовой прогноз – от одного года до пяти лет (для целей стратегического развития самого предприятия и районных электрических сетей);

– долгосрочный текущий прогноз – от одного до нескольких месяцев в пределах одного года (для заключения договора с энергоснабжающей организацией в части юридически-правовых и технико-экономических аспектов и для планирования затрат на обеспечение электроснабжения внутривозовских потребителей);

– краткосрочный прогноз – от одних до нескольких суток в пределах одного месяца (для осуществления планово-производственной деятельности, технологического и энергетического менеджмента предприятия);

– оперативный прогноз – от нескольких минут до нескольких часов в пределах одних суток (для диспетчерского управления режимами электропотребления предприятия).

5. Необходимо определение требуемой формы прогноза – проводится оценка ожидаемого значения переменной или доверительного интервала, на котором сохраняется доверительная вероятность содержания будущих значений переменной.

Под прогнозной оценкой энергопотребления предприятия будем понимать такие значения энергопотребления, как затрат на производство изделия, при которых один из основных показателей на предприятии, себестоимость единицы продукции, является минимальным. Оценку будем производить на основе статистической информации о значениях энергозатрат на выпуск изделия за прошлые отчетные периоды и полученной при этих затратах себестоимости единицы продукции. Входными параметрами модели являются производственные затраты на

производство изделия, а выходным параметром – энергопотребление предприятия.

Одной из основных задач научно-исследовательского характера является задача оптимизации вектора выходных параметров $Y = (y_1, \dots, y_k)$, некоторого объекта, на вход которого подается вектор входных воздействий $X = (x_1, \dots, x_k)$.

Математической моделью объекта является система уравнений:

$$Y_i = f_i(x_1, \dots, x_k), i = 1, 2, \dots; \quad (1)$$

Одним из подходов к исследованию математической модели прогнозной оценки энергопотребления является математический аппарат теории планирования эксперимента.

Теория планирования эксперимента (ПЭ) охватывает практически все встречающиеся на практике варианты исследования объектов [4]. Задачу прогнозной оценки энергопотребления предприятия следует относить к адаптивному планированию.

Тогда и выходные переменные x_i называют факторами, а функции $f_i(x_1, \dots, x_k)$ – функциями отклика. Факторы должны быть непосредственными воздействиями на объект. В нашем случае под факторами будем понимать производственные затраты на производство продукции, сгруппированные по целевым статьям, а самим объектом исследования является энергопотребление предприятия.

Модель процесса электропотребления может быть представлена в виде [3]:

$$Y_i^t = T_i^t + S_i^t + A_i^t + SL_i^t, \quad (2)$$

где Y_i^t – суммарное электропотребление (мощность) в момент времени t ;

T_i^t – составляющая систематического изменения (тренд);

S_i^t – периодическая составляющая (сезонность);

A_i^t – авторегрессия разностей;

SL_i^t – случайная составляющая.

Для оперативного управления нагрузки предприятия с ежесуточным пересчетом параметров модели достаточно учитывать две последние составляющие, т.е. модель авторегрессии и случайную составляющую.

Суммарное электропотребление $X = W_{\Sigma}$ предприятия за период интегрирования Δt представляет собой переменную состояния, величина которой пропорциональна потребляемой мощности и в часы ПИК энергосистемы ограничена заявленным максимумом мощности.

В качестве управляющих воздействий используются потребители-регуляторы, электропотребления которых $X = W_{PR}$ позволяет регулировать величину Y в пределах заявленного максимума.

Интервал интегрирования Δt – время, за которое энергонадзором контролируется суммарное электропотребление предприятия, равно 30 минутам.

Для упрощения модели, допустим, что процессы электропотребления Y^t и X^t стационарны. Это позволяет получить уравнение с независимыми от времени коэффициентами:

$$Y_l = A_0 X_{l-1} + A_1 X_{l-2} + \dots + A_N X_{l-N-1} + B_0 Y_{l-1} + B_1 Y_{l-2} + \dots + B_N Y_{l-N-1}. \quad (3)$$

Уравнение (3) есть общий вид разностного уравнения $(N + 1)$ -го порядка с $(N + 1)$ выборками предыдущих данных. С практической точки зрения, выполнив сбор данных электропотреблений Y и X через равные интервалы времени Δt , подставляют их в соответствующее уравнение и получают выражение модельного значения Y как функции неизвестных коэффициентов:

$$Y_l = f(A_0, A_1, \dots, A_N; B_0, B_1, \dots, B_N). \quad (4)$$

Для вычисления искоемых коэффициентов воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК) и запишем функционал, подлежащий минимизации.

$$F = \sum_{l=1}^M (Y_l - \tilde{Y}_l)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где M – число значений вычисляемой переменной состояния;

Y_l – замеренная величина переменной состояния в l -м измерении;

\tilde{Y}_l – модельное значение переменной состояния в том же l -м варианте.

Подстановкой в (5) вместо \tilde{Y}_l правой части уравнения (3) получим минимизируемый функционал в виде

$$F = \sum_{l=1}^M \left[Y_l - (A_0 X_{l-1} + A_1 X_{l-2} + \dots + A_N X_{l-N-1} + B_0 Y_{l-1} + B_1 Y_{l-2} + \dots + B_N Y_{l-N-1}) \right]^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

Минимум функционала (6) будет иметь место при равенстве нулю частных производной :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dF}{dA_0} = \frac{dF}{dA_1} = \dots = \frac{dF}{dA_N} = 0 \\ \frac{dF}{dB_0} = \frac{dF}{dB_1} = \dots = \frac{dF}{dB_N} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Система (7) содержит $(2N + 2)$ линейных уравнения, ее решение дает значения искоемых коэффициентов $A_0, A_1, \dots, A_N, B_0, B_1, \dots, B_N$.

Вычисленные таким образом коэффициенты уравнения (3), позволяют получить уравнение с независимыми от времени коэффициентами описывающие модель процесса электропотребления.

Полученное выражение (3) может быть использовано для поиска оптимальных значений составляющих уравнение параметров, что является одной из важ-

ных задач, решаемых при управлении производством или технологическими процессами.

Объектом анализа выступает заданный критерий эффективности исследуемой системы (минимизация энергопотребления), рассматриваемый как функция от существенных параметров системы (непосредственные источники и потребители электроэнергии) и внешней среды (потери, природные катаклизмы и т.д.). Изучение процесса функционирования объекта позволяет выявить факторы, оказывающие существенное влияние на функцию, описывающую технологический процесс.

Основная цель оптимизации энергопотребления предприятия – определение экстремального значения энергопотребления (минимально/максимально возможного значения) для анализа интервала варьирования. Поддержание значений параметров, входящих в целевую функцию в заданных интервалах позволит обеспечить экстремальное значение целевой функции – энергопотребления предприятия.

При решении подобных задач широко использованы методы градиентной оптимизации [4].

Градиент $\nabla f(Y)$ указывает направление наибольшего возрастания функции. Противоположное направление $-\nabla f(Y)$ называется антиградиентом, оно показывает направление наискорейшего убывания функции. В точке экстремума Y^* градиент равен нулю $\nabla f(Y^*) = 0$. Если аналитически производные определить невозможно, их вычисляют приближенно:

$$\partial f(Y) / \partial y_i = \Delta f(Y) / \Delta y_i, \quad (8)$$

где $\Delta f(Y)$ – приращение функции $f(Y)$ при изменении аргумента на величину Δy_i . Двигаясь по градиенту (антиградиенту) можно достичь максимума (минимума) функции. В этом и состоит сущность градиентного метода оптимизации.

Следует отметить, что основой прогноза электропотребления промышленного предприятия являются статистические данные об электропотреблении за предшествующий период и различные методы прогноза. Поэтому в задачах экспериментального исследования функция $f(Y)$ обычно изначально неизвестна, ее вид выбирается относительно произвольно, а параметры устанавливаются по результатам исследований и вычислений. Таким образом, вместо самого градиента применяется его оценка.

Существует несколько модификаций метода градиентной оптимизации применительно к дискретным вычислениям [5].

Если подъем происходит поочередно по каждой отдельной координате y_1, y_2, \dots, y_k , то такой метод называют *покоординатным подъемом* или *методом Гаусса – Зейделя*. Движение осуществляется из некоторой точки по координате y_1 до тех пор, пока не станет равной нулю соответствующая производная $\partial f(Y) / \partial y_i = 0$. Все остальные координаты (аргументы функции) сохраняют постоянное значение. После этого подъем начинается по другой координате. Порядок перебора координат не играет принципиальной роли, а влияет только на скорость поиска, поэтому обычно начинают с y_1 , затем с y_2 и т.д. После того,

как будет произведен подъем по всем координатам, начинают повторно с Y_1 . Процесс заканчивается, когда все частные производные будут равны нулю (будут меньше порога чувствительности).

Метод наискорейшего подъема предполагает определение градиента в исходной точке, далее подъем в этом направлении осуществляется до тех пор, пока производная $\partial f(Y)/\partial u_i$ в этом направлении не обратится в нуль. После этого снова определяют градиент и осуществляют по нему подъем до нулевого значения производной и т.д. Модификация этого метода предусматривает вычисление градиента в каждой новой точке траектории перемещения.

Однако применение метода крутого восхождения в его классическом виде предполагает вычисление градиента на каждом этапе. А это означает необходимость проведения достаточно большого количества опытов. В целях уменьшения количества опытов целесообразно использовать *модифицированный метод крутого восхождения Бокса и Уилсона* [6]. Он рекомендует на начальном этапе поиска применять линейные полиномы для описания функции. Значение градиента оценивается в начальной точке, после чего пошаговое движение по градиенту продолжается до попадания в частный оптимум. В точке частного оптимума снова определяется градиент. И пошаговое движение начинается по новому направлению. Так продолжается до попадания в область глобального экстремума. Эта область не может быть адекватно описана линейным уравнением. Поэтому переходят к более точному описанию поверхности на основе полиномов второго порядка и уточнению положения точки глобального оптимума. В целом метод Бокса – Уилсона во многих случаях требует меньшего количества опытов возможно при несколько большем числе шагов.

Однако градиентный метод не всегда эффективен. Например, если поверхность функции имеет овражный характер, то движение будет происходить с одного склона на другой с медленным продвижением к точке минимума. В этих случаях целесообразно использовать эвристические методы.

Предложенные модели и методики могут быть легко алгоритмизированы и положены в основу математического обеспечения системы прогнозной оценки энергопотребления промышленного предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Косенко Е.Ю., Князев А.А. Общие принципы автоматизации энергопотребления предприятия. – Сборник материалов докладов 6-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь XXI века будущее российской науки». – Ростов-на-Дону, 2008.
2. Жичкин С.В. Краткосрочное прогнозирование суточного электропотребления Нижнетагильского металлургического комбината / С.В. Жичкин, А.В. Мозгалин // Электрификация металлургических предприятий Сибири. Вып.12 – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – С. 222 – 228.
3. Клестов В.И. Прогнозирование электропотребления цехов промышленного предприятия. – Киров.: Изд-во Вят ГУ, 2005.
4. Ходасевич Г.Б. Планирование эксперимента – СПб.: СПбГУТ, www.opds.sut.ru.
5. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. Т. 1. Математические основы кибернетики. – М.: Энергия, 1973.
6. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. – М.: Радио и связь, 1983.