

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПО СТОИМОСТНОМУ КРИТЕРИЮ

*Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, А.А. Захарова*

## EFFECTIVE PREDICTION OF ENERGY RESOURCES CONSUMPTION BY COST CRITERION

*L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova, A.A. Zakharova*

Предложен метод оптимального прогнозирования потребления энергетических ресурсов технологическими процессами по критерию минимума цены ошибки прогноза. Рассматривается регуляризация некорректно поставленных задач прогноза на основе использования нормативных характеристик процессов.

*Ключевые слова:* энергетические ресурсы, прогнозирование, факторный анализ, оптимизация.

The method of effective prediction of energy resources consumption by technological processes by the criterion of minimizing cost of prediction error is proposed. The regularization of ill-formulated prediction problems on the basis of process standard characteristics is considered.

*Keywords:* energy resources, prediction, factor analysis, cost optimization.

### Введение

Прогнозирование потребления энергетических ресурсов является актуальной задачей энергетического менеджмента промышленных предприятий [1–6]. На основе прогноза потребления энергетических ресурсов осуществляется планирование потребления и формирование заявок на объемы поставок энергетических ресурсов. Ошибки прогнозирования, с одной стороны, приводят к необходимости дополнительной закупки ресурсов по повышенным ценам, с другой стороны – неполное использование заявленных ресурсов приводит также к экономическим потерям предприятия.

Существующие методы прогнозирования [7, 8] основываются на минимизации ошибки прогнозирования в натуральных величинах. Однако данная задача имеет технико-экономический характер. При этом цена ошибки прогнозирования зависит от знака ошибки. Поэтому целесообразно решать

задачу прогнозирования исходя из минимума цены ошибки прогнозирования. Кроме того, задача прогнозирования решается с использованием данных эксплуатации, которые могут не содержать достаточное количество информации для решения задачи прогнозирования. В этом случае необходимо осуществлять регуляризацию постановки задачи прогнозирования.

В данной работе предлагается метод, свободный от указанных выше недостатков.

### Построение оптимальной модели прогнозирования

Прогнозная модель строится в предположении, что функция потребления энергетических ресурсов имеет линейный характер, а именно:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i x_i, \quad (1)$$

---

**Казаринов Лев Сергеевич** – д-р. техн. наук, профессор, декан приборостроительного факультета, Южно-Уральский государственный университет; kazarinov@ait.susu.ac.ru

**Барбасова Татьяна Александровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет; tatyana\_barbasova@mail.ru

**Захарова Александра Александровна** – аспирант кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет; al\_ekca@mail.ru

---

**Kazarinov Lev Sergeevich** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Dean of Computer Technologies, Control and Radio Electronics Faculty of South Ural State University; kazarinov@ait.susu.ac.ru

**Barbasova Tatiana Alexandrovna** – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Automation and Control Department of South Ural State University; tatyana\_barbasova@mail.ru

**Zakharova Alexandra Alexandrovna** – Post-Graduate Student of Automation and Control Department of South Ural State University; al\_ekca@mail.ru

где  $y$  – объем потребления энергетических ресурсов;  $x_i$  – технологические факторы;  $a_i$  – структурные параметры.

Будем предполагать, что  $x_1$  является ведущим показателем, характеризующим объем производимой продукции,  $x_i$  – уточняющие технологические факторы.

Ошибка прогноза для  $k$ -го наблюдения определяется как разность между фактическим значением объема потребляемых энергетических ресурсов и прогнозным значением для данного наблюдения:

$$e_k = y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{j,k}, \quad (2)$$

где  $y_k$  – фактическое значение объема потребляемых энергетических ресурсов для  $k$ -го статистического наблюдения;  $\sum_{j=0}^n a_j x_{j,k}$  – прогнозное значение объема потребляемых энергетических ресурсов для  $k$ -го статистического наблюдения.

Суммарный штраф за неточный прогноз:

$$C = \sum_k c_p |e_k^-| + \sum_k c_{III} |e_k^+|, \quad (3)$$

где  $c_p, c_{III}$  – стоимость ресурсов и штрафа соответственно;  $e_k^-, e_k^+$  – отрицательные и положительные значения ошибки.

В качестве критерия эффективности задачи прогноза будем использовать квадратичный критерий:

$$S = 0,5 \sum_k s_p^2 |e_k^-|^2 + 0,5 \sum_k s_{III}^2 |e_k^+|^2, \quad (4)$$

где  $s_p, s_{III}$  – весовые коэффициенты, например,  $s_p = c_p, s_{III} = c_{III}$ . В общем случае коэффициенты  $s_p, s_{III}$  выбираются из минимума критерия (3) [9].

Для регуляризации постановки задачи будем использовать нормативную модель потребления ресурсов. Указанная модель строится на основе нормативных методик расчета потребления ресурсов технологическими процессами, нормативных энергетических характеристик процессов, карт рабочих режимов и т. п.

Будем различать следующие случаи нормативного расчета потребления ресурса:

а) простой случай:

$$y_H = b_1 x_1, \quad (5)$$

где  $b_1$  – норматив энергоемкости технологического процесса, уточняющие факторы  $b_i = 0$ ;

б) сложный случай, учитывающий уточняющие факторы:

$$y_H = \sum_{i=0}^n b_i x_i, \quad b_i \neq 0. \quad (6)$$

В качестве критерия регуляризации постановки задачи будем использовать сумму квадратов

уклонения структурных параметров прогнозирующей модели от нормативных значений:

$$R = \sum_{i=0}^n (a_i - b_i)^2, \quad (7)$$

где  $R$  – критерий регуляризации.

Задача определения структурных параметров  $a_i$  прогнозирующей модели из условия минимума критерия эффективности прогноза (4) с учетом критерия регуляризации (7) сводится к задаче минимизации функции Лагранжа:

$$S + \lambda R \rightarrow \min_{\{a_i\}}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент регуляризации;

$$S + \lambda R = 0,5 \sum_k s_p^2 |e_k^-|^2 + 0,5 \sum_k s_{III}^2 |e_k^+|^2 + \lambda \sum_{i=0}^n (a_i - b_i)^2, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (S + \lambda R)}{\partial a_i} = & -s_p^2 \sum_k 1(|e_k^-|) \left( y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} - \\ & -s_{III}^2 \sum_k 1(|e_k^+|) \left( y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} - \\ & -2\lambda \sum_{i=0}^n (a_i - b_i) = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $1(|e_u^-|), 1(|e_u^+|)$  – переключательные единичные функции.

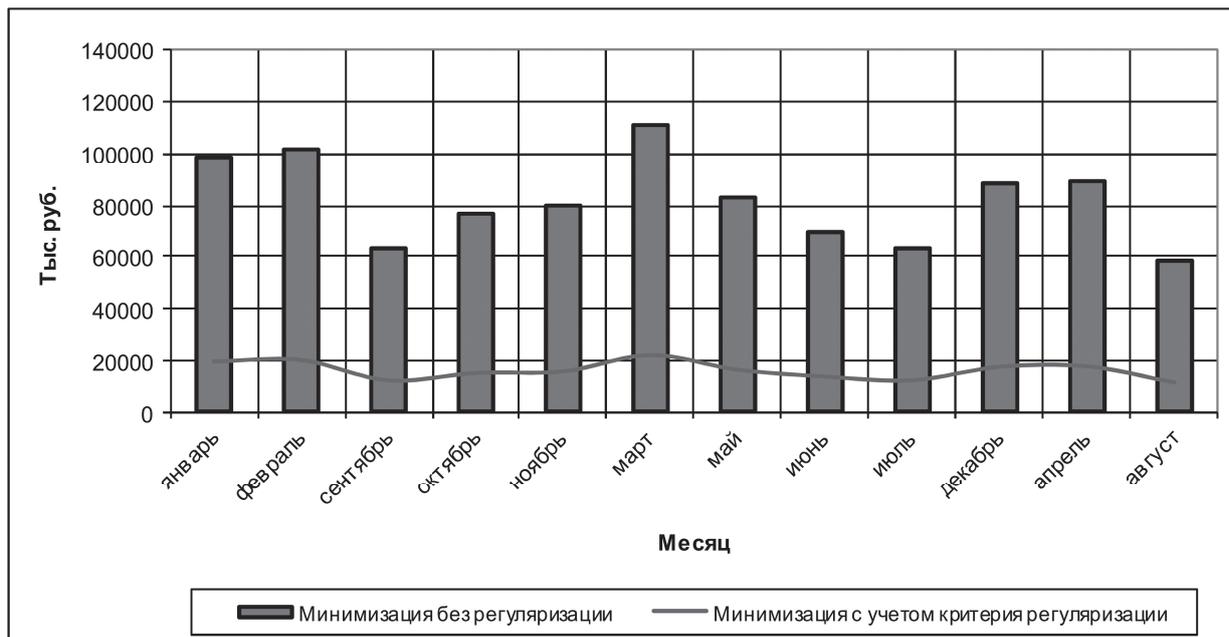
Уравнение (10) является нелинейным и содержит в своем составе переключательные функции. Для решения этого уравнения будем использовать алгоритм типа метода наискорейшего спуска.

В этом методе, если зафиксировать значения переключательных функций, уравнение становится линейным вида (11), и его можно решить. В результате будет найден локальный минимум суммарного штрафа (9). Для нахождения глобального минимума используется итерационная процедура. В этой процедуре по результатам локальных решений определяются соответствующие значения переключательных функций, которые используются на дальнейшем шаге решения. Так как функция (9) выпуклая и унимодальная, то процесс сходится к глобальному экстремуму:

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, n. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} g_{ij} = & s_p^2 \sum_k 1(|e_k^-|) x_{ik} x_{jk} + \\ & + s_{III}^2 \sum_k 1(|e_k^+|) x_{ik} x_{jk} + 2\lambda, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} d_i = & s_p^2 \sum_k 1(|e_k^-|) y_k x_{jk} + \\ & + s_{III}^2 \sum_k 1(|e_k^+|) y_k x_{jk} + 2\lambda \sum_{i=0}^n b_i. \end{aligned} \quad (13)$$



Динамика изменения суммарного штрафа во времени с учетом критерия регуляризации и без него

Таким образом, необходимо программно решить систему линейных алгебраических уравнений (11), определяющих минимизацию целевой функции (10) методом наискорейшего спуска, и осуществить пересчет для каждого полученного решения значений переключательных функций.

Оценка точности найденных решений оценивается на основе исходного критерия – суммарного штрафа за неточный прогноз.

**Пример.** Рассмотрим задачу прогнозирования природного газа в кислородно-конвертерном цехе ОАО «ММК».

В результате обработки статистических данных были получены структурные параметры прогнозирующих моделей потребления природного газа для двух случаев: с регуляризацией постановки задачи и без нее. Для оценки эффективности были построены зависимости величины суммарного штрафа от времени для обоих случаев. Полученные зависимости представлены на рисунке.

Таким образом, в результате оптимального решения задачи прогноза, величина суммарного штрафа сократилась с 1 % до 0,2 %.

#### Выводы

1. Оптимальное решение задачи прогноза потребления энергетических ресурсов технологическими процессами по критерию минимума стоимостных потерь от ошибок прогноза позволяет снизить штрафы за недостоверную заявку на поставку энергетических ресурсов.

2. Регуляризация постановки задачи оптимального прогноза позволяет эффективно решать задачу прогноза при неполных исходных данных эксплуатации.

#### Литература

1. Казаринов, Л.С. Упреждающее управление энергетической эффективностью предприятий / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17. – № 35 (294). – С. 85–98.
2. Казаринов, Л.С. Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений по контролю и планированию потребления энергетических ресурсов / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 16. – № 23 (282). – С. 118–122.
3. Казаринов, Л.С. Система управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 16. – № 23 (282). – С. 21–25.
4. Барбасова, Т.А. Пути повышения энергетической эффективности Челябинской области / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Инновационный Вестник Регион. – 2012 – № 2. – С. 69–75.
5. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургическом производстве / Л.С. Казаринов, Л.А. Кошцев, И.А. Япрынцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7 (79). – С. 24–26.
6. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): моногр. /

Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, О.В. Колесникова и др.; под ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ: Изд-во Т. Лурье, 2010. – 228 с.

7. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.

8. Коцев, Л.А. Моделирование потребления топлива в ОАО «ММК» / Л.А. Коцев, И.А. Япрынцева // Промышленная энергетика. – М.: НТФ «Прогресс», 2004. – Вып. 5. – С. 2–6.

9. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление (когнитивный подход): науч.-метод. пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ: Изд-во Т. Лурье, 2011. – 524 с.

*Поступила в редакцию 7 декабря 2012 г.*