

УДК 621.311

## АДАПТАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ К ЗАДАЧАМ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НЕСТАБИЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Ю. Н. КОЛЕСНИК, К. А. ВЕНЬГИН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

Одним из направлений энергосбережения является контроль энергоэффективности, направленный на решение задач оценки, прогнозирования, планирования и оптимизации режимов энергопотребления [1]. Однако нестабильные условия работы потребителей, связанные с формированием рыночных отношений, приводят к непредсказуемости и неопределенности работы предприятий, являются причиной высокой вариации показателей эффективности их режимов электропотребления. В этих условиях контроль энергоэффективности усложняется, усложняются и решаемые на его основе задачи. Для эффективного решения указанных задач необходимы уточненные математические модели, позволяющие учитывать изменения факторов, влияющих на энергоэффективность, а также специфику формирования режимов электропотребления в различных временных интервалах и степень оперативности контроля энергоэффективности.

В работе предлагается использовать обобщенную модель электропотребления, реализованную с помощью комплексного анализа результатов моделирования различными методами. Создание такой модели в целом позволит определять расчетные параметры электропотребления для решения конкретных задач контроля энергоэффективности с минимальной погрешностью.

Поясним разработку обобщенной модели электропотребления (рис. 1).



Рис. 1. Принцип уточнения моделирования режимов электропотребления

На первом этапе разрабатывается комплекс моделей электропотребления известными методами [1]. При этом основными способами моделирования электропотребления являются аналитический и математико-статистический.

Аналитическая модель предусматривает определение расхода электроэнергии расчетным путем по статьям расхода в производстве или путем аналитического описания закономерности протекания процесса. Для получения такой модели используют сведения об установленных приемниках и генераторах электроэнергии, режимах их работы, а также аналитическое описание физических закономерностей электропотребления. Очевидно, что адекватность аналитической модели тесно связана с достоверностью исходных данных об электроприемниках и зависит от грамотности

аналитического описания физических закономерностей технологических процессов. При этом одним из путей повышения адекватности моделирования является учет изменения объемов выпускаемой продукции, состава и режима работы электроприемников и технологического оборудования, например, как показано в [2].

Статистическая модель представляет собой зависимость расхода электроэнергии  $W$  от воздействующих факторов  $X$ , например, модель множественной регрессии [3]:

$$W = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \dots + \beta_k \cdot x_k, \quad (1)$$

где  $\beta_0, \dots, \beta_k$  – коэффициенты регрессии.

Для разработки статистической модели необходима база данных, содержащая, например,  $N$  ретроспективных суточных значений электропотребления и воздействующих факторов:

$$Y_t = \{W_t; X_t^1, \dots, X_t^k\}, \quad t = [1 \dots N]. \quad (2)$$

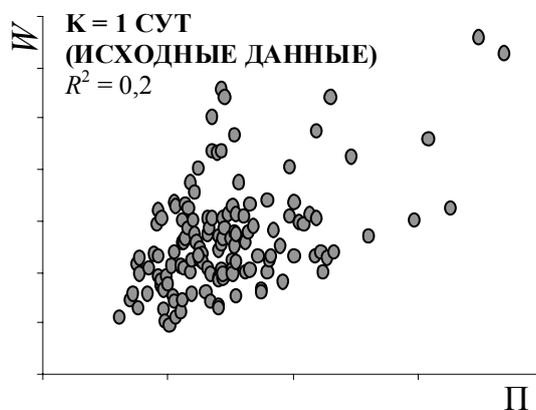
Для повышения адекватности разрабатываемых статистических моделей известно большое количество соответствующих алгоритмов [2]–[7].

Рассмотрим один из эффективных способов повышения адекватности моделирования, основанный на сглаживании исходных временных рядов методом скользящей средней [4]. Сглаженные (усредненные) элементы массивов определяются по выражению [5], [6]:

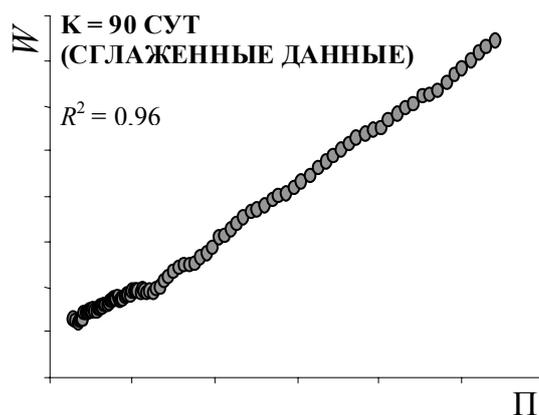
$$Y_{cp.j} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{t=j}^{k+j-1} Y_t, \quad j = [1 \dots (N - k + 1)]. \quad (3)$$

Интервал сглаживания « $k$ » численно равен количеству суток в принятом периоде времени (цикле управления), оставляет 1 – при разработке суточной модели, 30 – при разработке месячной модели, 91 – при разработке квартальной модели электропотребления и т. д.

Сглаживание исходных данных по выражению (3) значительно повышает аппроксимирующую способность (коэффициент детерминации  $R^2$ ) модели электропотребления, позволяет учесть тенденции режимов электропотребления в различных временных циклах управления (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Зависимости электропотребления  $W$  от производительности  $П$ :  
 а – исходная модель; б – модель, построенная по сглаженным данным

Таким образом, использование алгоритмов повышения адекватности разработанных моделей, позволяет получать уточненные результаты моделирования режимов электропотребления как аналитическим, так и математико-статистическим методом. При этом возникает проблема выбора такой модели, которая обеспечит решение конкретной задачи контроля энергоэффективности при заданных условиях с минимальной погрешностью. Решение этой проблемы предлагается осуществлять путем сравнения известных показателей адекватности математических моделей:

– среднеарифметическая относительная ошибка аппроксимации реальной величины  $y_i$  расчетной  $\hat{y}_i$ :

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100, \% \quad (4)$$

– среднеквадратическая относительная погрешность:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-m-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2} \cdot 100, \% \quad (5)$$

где  $n$ ,  $m$  – соответственно число наблюдений и учитываемых факторов в модели;

– скорректированный (adjusted) коэффициент детерминации:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{(n-1)}{(n-m-1)}; \quad (6)$$

– относительное максимальное отклонение,  $\delta W$ .

Если уравнение регрессии удовлетворяет критерию Фишера, а значение  $\varepsilon < 10\%$ , то модель адекватно описывает исследуемые процессы в рыночных условиях функционирования [7].

Таким образом, выбирается модель с лучшими формальными показателями адекватности, которая используется в дальнейшем для решения широкого круга задач контроля энергоэффективности.

Практическую реализацию описанных подходов покажем на примере ОАО «Мозырсьоль». Предприятие характеризуется безостановочным технологическим циклом

лом, нестабильной программой производства, долей электроэнергетической составляющей себестоимости продукции до 30 % и годовым электропотреблением около 28 млн кВт·ч. На режим потребления электроэнергии данного предприятия наибольшее влияние оказывают объемы производства и состав работающего оборудования (характерные технологии). Первый из них является детерминированным, т. е. в условиях рыночных отношений полностью диктуется ситуацией на рынке сбыта продукции. И в то же время, управляя вторым фактором – составом работающего оборудования, можно воздействовать на эффективность расхода электроэнергии при заданном объеме производства.

При анализе состава оборудования и характерных режимов электропотребления выявлено два основных технологических состояния: технология с одной выпарной системой и технология с двумя выпарными системами. Работа каждой из них характеризуется своей производительностью, энергоэффективностью и величиной потребляемой энергии.

Для данного предприятия был составлен электрический баланс, на основании которого получена аналитическая модель электропотребления. Модель позволяет определять удельное и общее электропотребление в зависимости от производительности и состава электрооборудования (рис. 3).

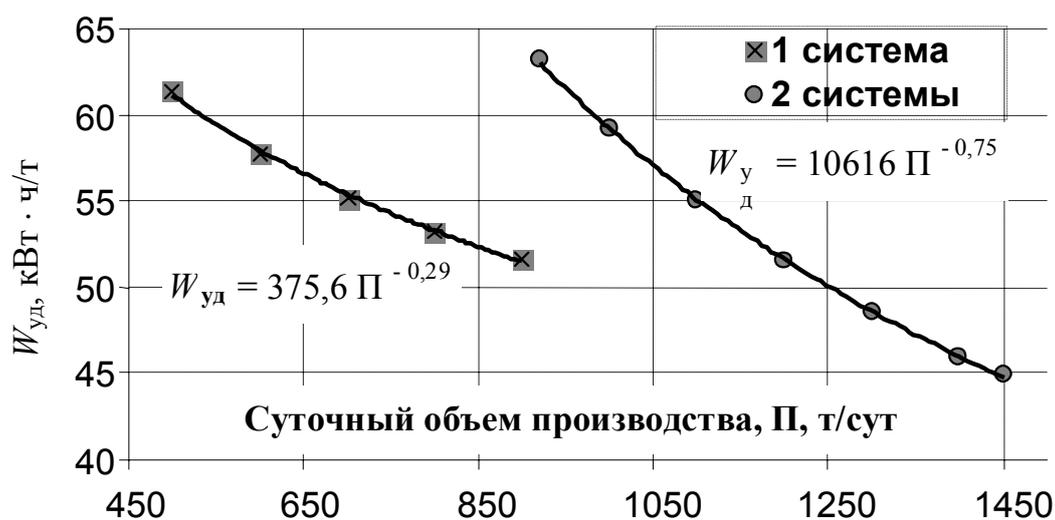


Рис. 3. Аналитическая модель удельного электропотребления ОАО «Мозырьсоль»

Также сформирована информационная база данных по ретроспективным суточным значениям электропотребления, объемов производства и признака технологического состояния. Разработка математико-статистических моделей электропотребления предприятия проведена посредством регрессионного анализа временных рядов. При этом исходные массивы данных ранжировались по возрастанию, после чего сглаживались методом скользящей средней по выражению (3). В результате получены уравнения регрессии для моделирования среднесуточного электропотребления  $W$  на сутки ( $k = 1$ ), месяц ( $k = 30$ ) и квартал ( $k = 90$ ):

$$W = \begin{cases} \begin{cases} 0,04 \cdot \Pi + 10,9, & \text{при } 500 < \Pi < 920 \\ 0,013 \cdot \Pi + 46,9, & \text{при } 920 < \Pi < 1450 \end{cases}, & k = 1; \\ \begin{cases} 0,0438 \cdot \Pi + 8,9, & \text{при } 500 < \Pi < 1450, & k = 30; \\ 0,0437 \cdot \Pi + 9,2, & \text{при } 500 < \Pi < 1450, & k = 90. \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, для рассматриваемого потребителя наиболее выражены два режима: работа одной выпарной системы при суточных объемах производства  $\Pi = [500 \dots 920]$  т; работа двумя выпарными системами при объемах производства  $\Pi = [920 \dots 1450]$  т продукции.

Результаты вычисления показателей адекватности полученных аналитических и статистических моделей представлены в таблице.

#### Критерии адекватности разработанных моделей электропотребления

Методы моделирования электропотребления		Показатели адекватности моделей			
		$\varepsilon, \%$	$\delta, \%$	$\delta W, \%$	$R^2_{adj}$
Математико-статистический при $k$ , равном	1	8,2	10,2	13,2	0,2
	30	3,6	4,3	7,7	0,95
	90	2,6	3,2	3,8	0,96
Аналитический		7,8	9,6	12,7	–

С целью повышения точности моделирования электропотребления при решении задач контроля, на основе анализа полученных показателей адекватности, можно сделать следующие выводы:

Для оценки эффективности электропотребления целесообразно использовать аналитическую модель;

Прогнозирование в условиях неопределенности режимов работы необходимо выполнять: для суточных периодов – по аналитической модели; для месячных и квартальных периодов – с помощью статистической модели;

Задачи планирования, как задачи оптимизации режимов, эффективней решать по аналитической модели электропотребления.

Структура алгоритма оптимального выбора модели для решения задач контроля энергоэффективности ОАО «Мозырьсоль» представлена на рис. 4.

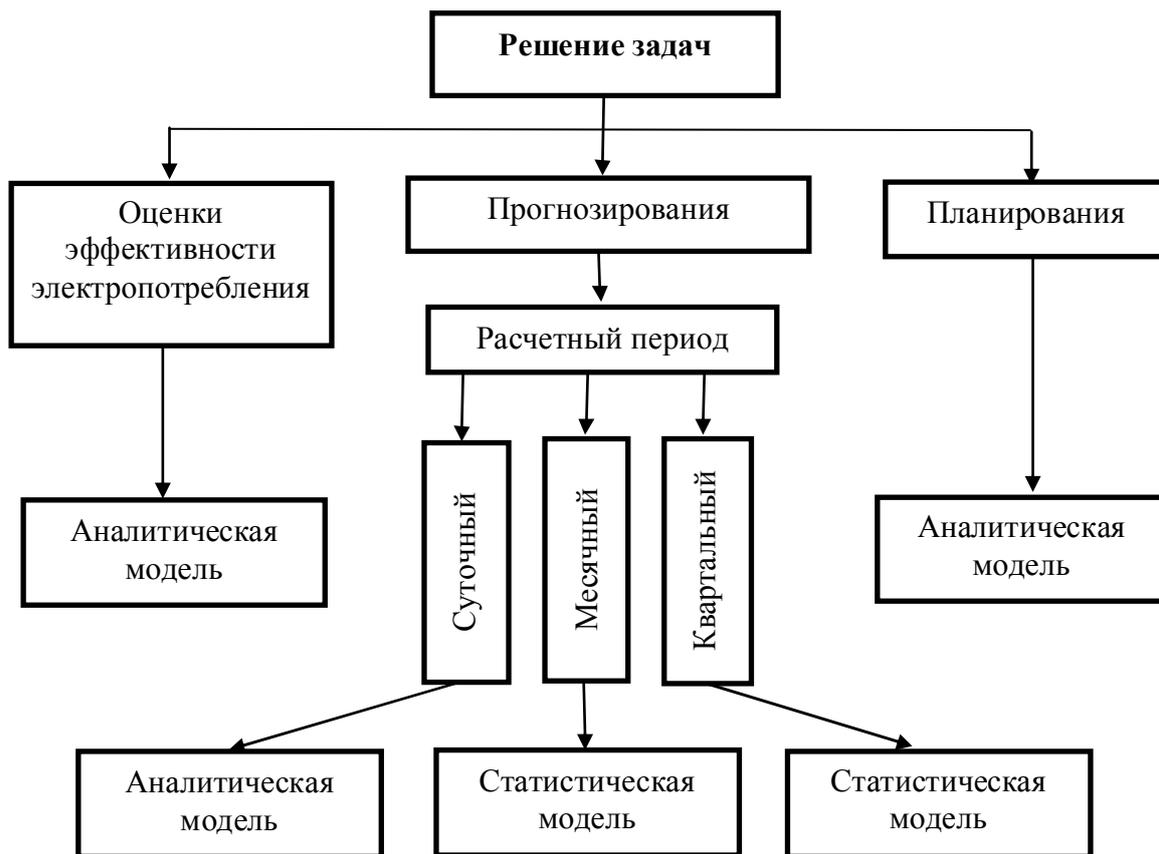


Рис. 4. Адаптация моделей электропотребления к задачам контроля энергоэффективности

Представленный подход позволит адаптировать модели электропотребления к широкому кругу задач контроля энергоэффективности, что будет способствовать повышению точности и эффективности их решения.

### Вывод

Минимизация погрешности моделирования режимов электропотребления при решении задач контроля энергоэффективности может быть достигнута путем сравнительного анализа показателей адекватности комплекса уточненных математических моделей в рамках определенного временного цикла управления.

### Литература

1. Поспелова, Т. Г. Основы энергосбережения / Т. Г. Поспелова. – Минск : Техно-принт, 2000. – 356 с.
2. Токочакова, Н. В. Методика нормирования электропотребления для многоменклатурного производства в условиях развития рыночных отношений / Н. В. Токочакова, Ю. Н. Колесник, А. Н. Зуев : материалы МНТК вузов приграничных регионов славянских государств. – Брянск, 2002. – С. 37–40.
3. Гурский, С. К. Адаптивное прогнозирование временных рядов в электроэнергетике / С. К. Гурский. – Минск : Наука и техника, 1983. – 271 с.
4. Бэнн, Д. В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: / Д. В. Бэнн, Е. Д. Фармер ; пер. с англ. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

5. Колесник, Ю. Н. Моделирование, анализ и управление электропотреблением нестабильно работающих участков нефтепровода : дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.02. / Ю. Н. Колесник. – БНТУ. – Минск, 2003.– 144 с.
6. Анищенко, В. А. Способ построения модели режимов электропотребления участка нефтепровода / В. А. Анищенко, Н. В. Токочакова, А. С. Фиков // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний. СНГ). – 2005. – № 6. – С. 44–47.
7. Головкин, Б. Н. Прогноз электропотребления промышленного предприятия в условиях нестабильной экономики / Б. Н. Головкин, В. Н. Пирогов, А. П. Старцев // Промышленная энергетика. – 1996. – № 2. – С. 8–12.

*Получено 01.02.2006 г.*