

УДК 621.311

Н. В. Токчакова, Д. Р. Мороз, А. С. Фиков**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Предложена структурная схема управления энергетической эффективностью промышленных потребителей, основным этапом в которой является оценка ее текущего состояния. Предложен универсальный алгоритм построения расчетно-статистических моделей режимов электропотребления, позволяющий получать модели требуемого качества и адекватности.

Введение

Высокая энергоемкость национального валового продукта Республики Беларусь в условиях дефицита топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) при непрерывном росте мировых цен на них ставит перед республикой задачу повышения эффективности использования энергетических ресурсов во всех отраслях народного хозяйства. В настоящий момент данная задача решается за счет стимулирования всех субъектов народного хозяйства к энергосбережению со стороны государства, что отражено [1]. Такое стимулирование проявляется в ежегодном установлении для каждого субъекта хозяйствования квартальных норм расхода энергоресурсов на выпуск продукции и целевого показателя по энергосбережению. Поскольку превышение установленных норм расхода энергетических ресурсов на выпуск продукции приводит к штрафным санкциям, то все потребители ТЭР заинтересованы в поиске энергосберегающих мероприятий. Кроме того, все промышленные потребители (ПП) с объемом потребления ТЭР свыше 1,5 тыс. т у. т. обязаны проходить энергетический аудит, основной целью которого являются оценка текущего состояния энергетической эффективности (ЭЭФ) и разработка плана внедрения энергосберегающих мероприятий на предстоящую пятилетку. Таким образом, управление ЭЭФ ПП приобретает актуальность и особую значимость как в общегосударственном масштабе, так и для ка-

ждого ПП в рамках действующего законодательства.

Постановка задачи

Управление ЭЭФ, как и любое другое управление, включает в себя три основных этапа: первый – оценка текущего состояния ЭЭФ; второй – принятие решения о методе воздействия на ЭЭФ; третий – непосредственное воздействие на ЭЭФ (внедрение энергосберегающего мероприятия). На рис. 1 представлена структурная схема управления ЭЭФ ПП. Из рисунка видно, что управление ЭЭФ имеет циклический характер, а приостановка цикла производится в случае внедрения в производство всех научно-технических достижений, позволяющих снизить энергоемкость продукции. Непрерывное развитие научно-технического прогресса обеспечивает постоянное наличие путей повышения ЭЭФ.

Очевидно, что основным этапом управления ЭЭФ является оценка ее текущего состояния, поскольку от этого зависят все управленческие решения. Поэтому вопросу оценки текущего состояния ЭЭФ уделяется большое внимание. В соответствии с [1] основным показателем текущего состояния ЭЭФ на предприятии является достигнутая величина абсолютного или удельного расхода ТЭР на производство продукции любого назначения.

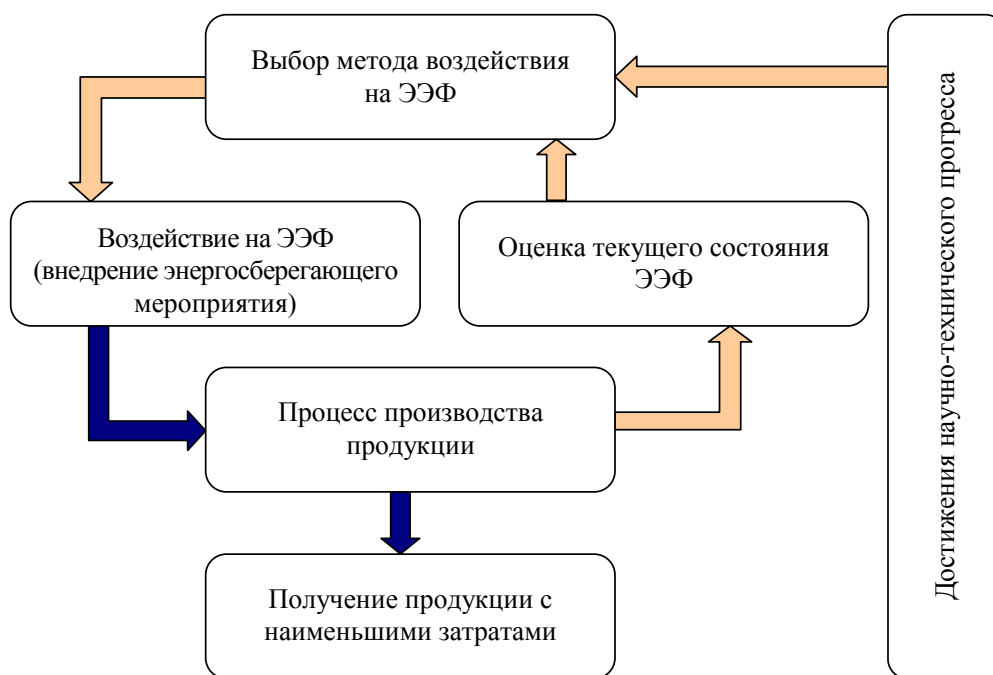


Рис. 1. Структурная схема управления ЭЭФ ПП: – информационные потоки; – физическая взаимосвязь

Проведенные исследования для Гомельской области [2] выявили, что в подавляющем количестве случаев (92 %) расчет удельных расходов ТЭР на производство продукции и, как следствие, разработка норм расхода ТЭР производится расчетно-аналитическим методом.

Расчетно-аналитический метод предусматривает определение удельного расхода электрической энергии (ЭЭ) расчетным путем по статьям расхода на основе электрических балансов. Удельный расход ЭЭ, определенный расчетно-аналитическим методом для существующих условий работы, будет представлять собой лишь единичное (среднее) значение удельного расхода ЭЭ из множества возможных. В ходе расчетов учитываются реальные условия производства с учетом фактического состояния оборудования и режима его работы, действительных параметров производственных процессов.

Учет режимов работы каждой единицы технологического оборудования для большинства ПП предполагает большую трудоемкость расчетов и сложность сис-

темы сбора параметров режимов электропотребления. Поэтому для ПП, работающих в условиях изменяющейся производственной программы и имеющих значительный парк технологического оборудования, данный метод определения удельного расхода ЭЭ на производство продукции неприемлем [2].

Поскольку применяемые методы оценки текущего состояния ЭЭФ оказываются весьма трудоемкими и имеют значительную погрешность, то снижается качество управления ЭЭФ. Возникает задача повышения достоверности определения уровня ЭЭФ ПП в современных условиях.

Научная новизна

Режимы работы большинства современных ПП отличаются нестабильностью вследствие зависимости от поставщиков сырья и рынков сбыта продукции. Так, в рамках одного года могут быть периоды с высокой и низкой степенями загрузки производства, кроме того, может изменяться качество исход-

ного сырья и т. д. Все это приводит к появлению большого многообразия режимов потребления ЭЭ, а оценка состояния ЭЭФ по среднему значению приводит к недопустимой ошибке. Для достоверной оценки текущего состояния ЭЭФ необходим учет множества режимов потребления ЭЭ. Такое возможно при оценке текущего состояния ЭЭФ на основе расчетно-статистических моделей режимов потребления ЭЭ [3].

На уровень электропотребления ПП оказывает влияние большое количество факторов (объем производства продукции, климатические условия, качество исходного сырья и конечной продукции и др.). В [3] предлагаются мультипликативные модели режимов электропотребления, где в качестве воздействующих факторов рассмотрены объем выпускаемой продукции и общий расход ЭЭ. В качестве отклика рассмотрен удельный расход ЭЭ. Поскольку общий расход ЭЭ и объем выпускаемой продукции линейно взаимосвязаны, то авторами предложена мультипликативная модель. Однако применение такой модели для оценки ЭЭФ затруднено из-за громоздкости решения и сложности интерпретации результатов моделирования. Кроме этого, рассмотренная модель не позволяет выявлять степень влияния факто-

ров на режим электропотребления.

Режим потребления ЭЭ ПП формируется под воздействием большого количества факторов, поэтому в качестве модели режимов потребления ЭЭ предлагается регрессионная аддитивная модель электропотребления от воздействующих факторов вида

$$W = \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i + W_{\text{пост}}, \quad (1)$$

где W – электропотребление ПП, кВт·ч; X_i – фактор, влияющий на уровень потребления ЭЭ ПП; n – количество факторов, влияющих на уровень потребления ЭЭ ПП; A_i – степень влияния i -го фактора на уровень потребления ЭЭ ПП; $W_{\text{пост}}$ – постоянная составляющая электропотребления.

В общем виде алгоритм построения модели режимов электропотребления ПП представлен на рис. 2. Как видно из рисунка, первоочередным шагом на пути построения модели режимов электропотребления являются изучение технологического процесса производства продукции и выявление факторов, оказывающих значительное влияние на режим потребления ЭЭ ПП.

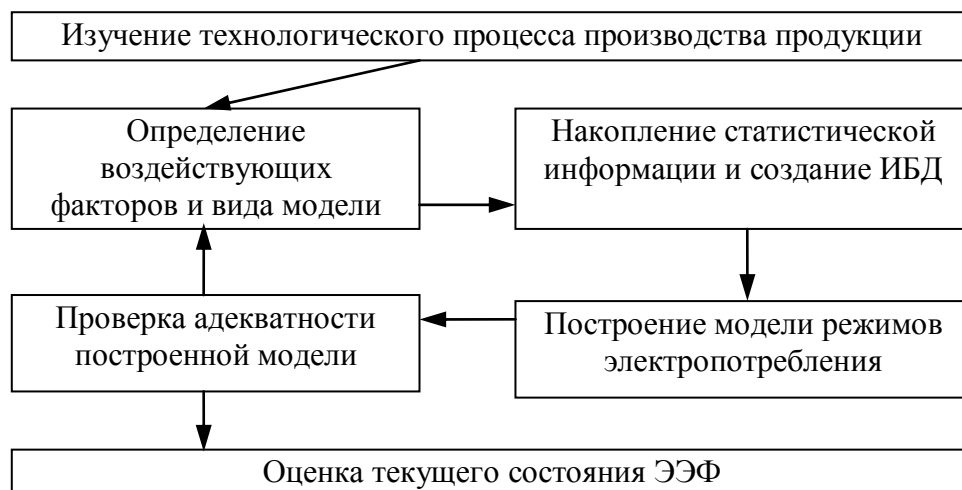


Рис. 2. Логическая схема построения модели режимов электропотребления ПП

В общем случае на режим электропотребления оказывает влияние достаточно большое количество факторов, для выявления наиболее значимых могут быть применены методы факторного анализа. Однако изучение технологического процесса в некоторых случаях позволяет выявить значимые факторы на основе аналитических зависимостей, описывающих взаимосвязь электропотребления и технологических параметров (предприятия транспорта нефти, химической промышленности и др.). Количество факторов, подлежащих включению в модель в качестве воздействующих, должно быть минимальным, а сама модель при этом должна адекватно описывать режим потребления ЭЭ.

Исследования показывают, что для описания режимов электропотребления большинства ПП, выпускающих промышленную продукцию, достаточно учета одного фактора – объемов выпускаемой продукции. Сама модель при этом обладает достаточной степенью адекватности для задач нормирования и прогнозирования электропотребления, а также оценки ЭЭФ.

Для построения модели режимов электропотребления необходима статистическая информация в достаточном объеме. Уровень дискретизации статистики должен соответствовать требованиям, предъявляемым к качеству модели, при этом он должен быть одинаков для всех факторов, входящих в модель. В случаях, когда система учета не позволяет получать статистическую информацию одинаковой дискретизации, ее уровень принимается минимальным. Значения факторов (воздействие которых на электропотребление накапливается во времени, например, объем выпуска продукции), имеющие большую дискретизацию, пересчитываются по выражению

$$X_j = \sum_{i=(j-1)m+1}^{i=j \cdot m+1} x_i, \quad (2)$$

где X – значение фактора при уменьшении дискретизации; x – значение фактора при

накоплении информации; j – номер значения фактора, приведенного к уровню минимальной дискретизации; m – отношение дискретизации фактора x в ИБД к дискретизации фактора X , т. е. количество накопленных значений фактора x за период накопления следующего значения фактора с минимальной дискретизацией.

Значения факторов (воздействие которых на электропотребление усредняется во времени, например, влажность сырья, температура окружающей среды и др.), имеющие большую дискретизацию, пересчитываются по выражению

$$X_j = \frac{1}{m} \sum_{i=(j-1)m+1}^{i=j \cdot m+1} x_i. \quad (3)$$

Опыт построения расчетно-статистических моделей режимов потребления ЭЭ [2, 3] показывает, что в подавляющем большинстве случаев система учета расхода ЭЭ и технологических факторов позволяет накапливать ИБД с уровнем дискретизации в одни сутки.

Необходимый объем статистической информации зависит от количества факторов, включаемых в модель, и целей построения модели [4]. Наиболее полной для задач нормирования, прогнозирования расхода ЭЭ, а также оценки текущего состояния ЭЭФ считается ИБД с глубиной в один год и уровнем дискретизации в одни сутки. После накопления достаточного объема статистической информации методом наименьших квадратов производится построение регрессионной модели режимов электропотребления вида (1).

Поиск коэффициентов регрессии удобно вести в матричной форме [5, 6]. Пусть глубина ИБД равна n значений, число факторов, включаемых в модель – k , т. е. имеется n значений независимых переменных f_1, f_2, \dots, f_k и соответствующие им значения зависимой переменной W , тогда уравнение (1) запишется в виде

$$\Theta = B \cdot F + E, \quad (4)$$

где Θ – вектор значений зависимой переменной, $\Theta = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$; B – вектор искомых коэффициентов регрессии, $B = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)^T$; E – вектор случайных отклонений, $E = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)^T$; F – матрица значений независимых переменных размером $n \times (k+1)$:

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1k} & 1 \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2k} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nk} & 1 \end{bmatrix}.$$

Оценка \hat{B} для вектора B ведется так, чтобы разность квадратов между вектором Θ зависимых переменных и вектором оценок $\mathfrak{G} = \mathfrak{F} \cdot F$ была минимальной:

$$\|\Theta - \mathfrak{G}\|^2 = \|\Theta - \mathfrak{F} \cdot F\|^2 \rightarrow \min \text{ по } \mathfrak{F}.$$

Решением является оценка (если ранг матрицы F равен $k+1$):

$$\hat{B} = (F^T \cdot F)^{-1} F^T \cdot \Theta. \quad (5)$$

Одним из показателей адекватности модели служит коэффициент детерминации R^2 , который показывает долю дисперсии, учитываемой данной моделью в общей дисперсии независимой переменной:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\Theta - \mathfrak{G})^2}{\sum (\Theta - \bar{\Theta})^2}. \quad (6)$$

Однако значение R^2 возрастает с ростом числа факторов k и объемом выборки n , что не говорит об улучшении адекватности модели. Поэтому для сравнения моделей вводится скорректированный (*adjusted*) коэффициент детерминации. Его использование более корректно для сравнения регрессий при изменении

числа переменных (регрессоров) и количества их измерений [6]:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R)^2 \frac{n-1}{n-k-1}. \quad (7)$$

При формальной оценке надежности модели различными статистическими критериями «ускользают» те реальные причинно-следственные связи между параметрами, которые определяются особенностью исследуемого процесса. Как правило, в прикладных исследованиях для выявления количественной меры влияния важна оценка именно причинных связей. Анализ структуры связей производится на основе теоретических или профессиональных предположений о наличии и направлении связи. **Таким образом, количество независимых переменных, введенных в модель, может быть обоснованным с использованием аналитических зависимостей и соответствовать цели создания модели** [8].

Качество построенной модели характеризуется как максимальной относительной погрешностью δ^{\max} , так и среднеквадратичным отклонением относительной погрешности σ :

$$\delta^{\max} = \max \left\{ \delta_i = \left| 100 \frac{\varepsilon_i}{W_i} \right| \right\}_{i=1,2,\dots,n}; \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-k-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}. \quad (9)$$

При проведении регрессионного анализа для ограниченной по объему совокупности параметры уравнения регрессии, коэффициенты детерминации могут быть сильно искажены действием случайных факторов. В этих условиях необходима дополнительная проверка модели на адекватность. При этом производится проверка значимости (существенности) каждого коэффициента регрессии. Значимость коэффициен-

тов линейной регрессии определяют с помощью t-критерия Стьюдента [5, 6]:

$$t_{\beta_k} = |\beta_k| \sqrt{(n-2) \frac{\sum (f_i - \bar{f}_i)^2}{\sum (W - W_i)^2}}. \quad (10)$$

Вычисленные по формуле (9) значения сравнивают с критическими t , которые определяют по таблице Стьюдента [5, 6] с учетом принятого уровня надежности $1-\alpha$ и объемом выборки.

Уровень надежности $1-\alpha$ обычно принимают равным 0,95. Параметр признаётся значимым (существенным) при условии, если $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$. В таком случае практически невероятно, что найденное значение коэффициента регрессии β_k обусловлено только случайными совпадениями.

Для проверки значимости уравнения регрессии вычисляется статистический критерий Фишера (*F-критерий*) [5, 6]:

$$F = \frac{\sum (W_i - \bar{W})^2}{\sum (W - W_i)^2} \frac{n-k}{k-1}. \quad (11)$$

Рассчитанное значение *F*-критерия сравнивается с табличным [5, 6] при $(k-1)$, $(n-k)$ степенями свободы и заданном уровне надежности $1-\alpha$. И при превышении рассчитанного значения над табличным практически невероятно, что все найденные значения коэффициентов регрессии B обусловлены только случайными совпадениями:

$$F > F_{1-\alpha}(k-1, n-k). \quad (12)$$

В случаях, когда построенная модель не удовлетворяет требуемому качеству, процесс построения возвращается на этап определения вида модели и факторов, в нее включаемых. На этом этапе вводятся корректировки с учетом полученных ранее результатов и процесс построения модели повторяется до тех пор, пока качество не удовлетворит требованиям.

Далее производится оценка текущего состояния ЭЭФ ПП. Наиболее распространенным показателем ЭЭФ является УРЭ, поэтому для оценки текущего состояния ЭЭФ предпочтительным является переход от модели режимов электропотребления к модели УРЭ от воздействующих факторов. Кроме того, определив с помощью модели влияние каждого из факторов на УРЭ [4], а также возможность контролируемого воздействия на сами факторы, возможно прогнозирование изменения ЭЭФ в результате внедрения энергосберегающих мероприятий.

Рассмотрим процесс построения модели режимов потребления ЭЭ на примере предприятий трубопроводного транспорта нефти:

1) изучение технологического процесса транспортировки нефти [9] по трубопроводам позволило выделить в качестве факторов, воздействующих на режимы потребления ЭЭ предприятия, следующие: P – грузооборот нефти, тыс. т·км/сут; d_3 – эквивалентный диаметр нефтепровода, мм; ν – вязкость перекачиваемой нефти, м²/с;

2) на годовом интервале производилось формирование суточных временных рядов расхода ЭЭ и воздействующих факторов:

$$\left\{ W_t \right\}_{t=1,2,\dots,n''}, \quad \left\{ P_t \right\}_{t=1,2,\dots,n''}, \\ \left\{ \nu_t \right\}_{t=1,2,\dots,n''}, \quad \left\{ d_{3t} \right\}_{t=1,2,\dots,n''}.$$

Накопленная статистическая информация вследствие несовершенства системы учета технологических параметров содержит выбросы. Для построения модели необходима очистка временных рядов от выбросов и календарных эффектов:

$$\left\{ W_t \right\}_{t=1,2,\dots,n'}, \quad \left\{ P_t \right\}_{t=1,2,\dots,n'}, \\ \left\{ \nu_t \right\}_{t=1,2,\dots,n'}, \quad \left\{ d_{3t} \right\}_{t=1,2,\dots,n'}, \\ n' = n'' - NK,$$

где NK – количество суток, исключенных из временных рядов.

Для уменьшения влияния стохастической составляющей производится сглаживание временных рядов методом скользящего среднего с периодом усреднения τ :

$$\bar{W}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} W_i, \quad \bar{P}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} P_i,$$

$$\bar{v}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} v_i, \quad \bar{d}_{\tau t} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} d_{\tau i};$$

3) методом наименьших квадратов производится построение модели режимов электропотребления от воздействующих факторов. Результат построения модели представлен на рис. 3;

4) производится оценка качества построенной модели по выражениям (8) и (9), а проверка значимости коэффициентов регрессии с использованием F -критерия и t -критерия при уровне надежности $\alpha = 0,95$. Результаты проверки модели приведены в табл. 1.

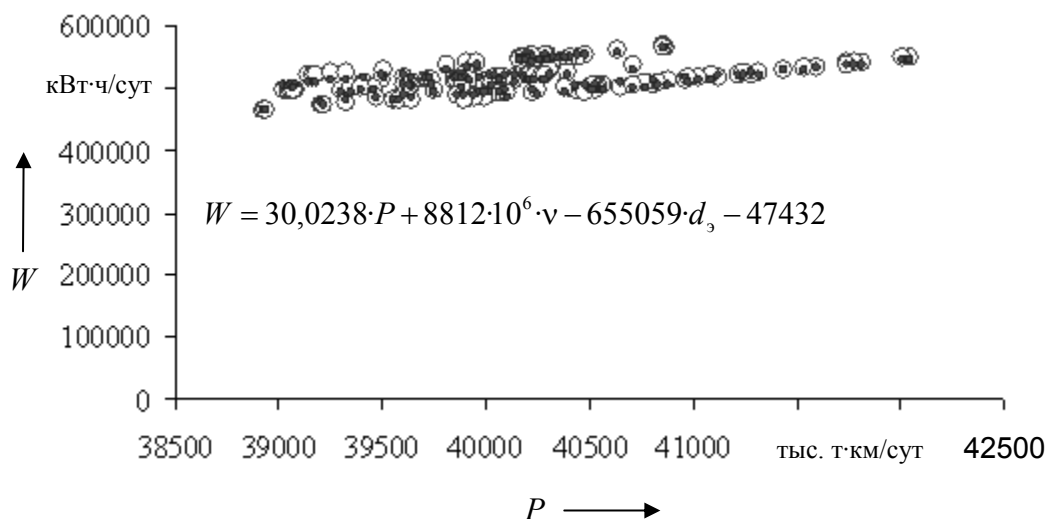


Рис 3. Результат построения модели режимов электропотребления для предприятий транспорта нефти

Табл. 1. Результаты проверки качества модели режимов потребления ЭЭ и значимости коэффициентов регрессии

Наименование критерия	Условие удовлетворения	Значение критерия
Максимальная относительная погрешность δ^{\max}	Для задач нормирования и прогнозирования показателей ЭЭФ менее 10 %	$\delta^{\max} = 2,50 \%$
Среднеквадратическое отклонение относительной погрешности σ	Для задач нормирования и прогнозирования показателей ЭЭФ менее 5 %	$\sigma = 1,03 \%$
F -критерий	Для 230 наблюдений при уровне значимости 0,95 более 3,04	$F = 1434$
t -критерий	Для 230 наблюдений при уровне значимости 0,975 более 1,96	$t_p = 58,6; t_v = 51,1;$ $t_d = 6,4$

Как видно из табл. 1, построенная модель режимов электропотребления для предприятия транспорта нефти полностью удовлетворяет предъявляемым

требованиям. Что свидетельствует о возможности ее использования для задач оценки текущего состояния ЭЭФ.

Выводы

1. Рассмотрена актуальность проблем повышения ЭЭФ ПП в Республике Беларусь. Предложена структурная схема управления ЭЭФ ПП, основным этапом в которой является оценка текущего состояния ЭЭФ.

2. Рассмотрены существующие методы оценки ЭЭФ ПП. Показано преимущество оценки ЭЭФ на основе расчетно-статистических моделей режимов электропотребления.

3. Предложен универсальный алгоритм построения расчетно-статистических моделей режимов электропотребления, позволяющий получать модели требуемого качества и адекватности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об энергосбережении : Закон Респ. Беларусь от 15 июля 1998 г. № 190-3. – Минск : Комитет «Белэнергосбережение», 1998. – 15 с.

2. **Токочакова, Н. В.** Анализ показателей энергетической эффективности промышленных потребителей / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 66–76.

3. Оперативное прогнозирование режимов электропотребления / Р. С. Саитбаталова [и др.] // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 27–29.

4. **Токочакова, Н. В.** Математическое обеспечение задач энергетического обследования технологического процесса транспортировки нефти / Н. В. Токочакова, А. С. Фиков // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 2. – С. 169–177.

5. **Ван дер Варден, Б. Л.** Математическая статистика / Б. Л. Ван дер Варден. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1960. – 434 с.

6. **Козлов, М. В.** Введение в математическую статистику / М. В. Козлов, А. В. Прохоров. – М. : МГУ, 1987. – 264 с.

7. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж. Ким [и др.] ; под ред. И. С. Енюкова. – М. : Финансы и статистика, 1989.

8. **Перегулов, Ф. И.** Введение в системный анализ : учеб. пособие для вузов / Ф. И. Перегулов, Ф. П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.

9. **Анищенко, В. А.** Способ построения модели режимов электропотребления участка нефтепровода / В. А. Анищенко, Н. В. Токочакова, А. С. Фиков // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. – Энергетика. – 2006. – № 6. – С. 44–48.

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого
Материал поступил 07.02.2007

N. V. Tokochakova, D. R. Moroz, A. S. Fikov
The modeling of consumption regimes
of electrical energy for the task of control
industrial user's energy effectiveness

Gomel State Polytechnic University named after P. O. Sykhai

The structural diagram of control of industrial user's energy effectiveness has been offered, and the estimation of its current state is the main stage. Universal algorithm of the construction calculational-statistical models of the regimes of the electric requirements, it allows to receive required quality and adequacy models.