

# МЕТОД ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

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

В работе предложен метод комитетного подхода к прогнозирующему управлению энергетической эффективностью промышленных предприятий, позволяющий оптимально организовать управление сложными технологическими объектами по критерию минимума технико-экономических потерь при прогнозирующем управлении. Метод основан на оптимальном построении энергетической характеристики с заданной точностью. Задача оптимального построения прогнозирующей модели решается на основе трех критериев: максимизация взвешенной суммы точек прогноза заданной точности; переход к решению задачи по нормативным методикам при неполном объеме статистических данных на основе минимизации регулирующей функции; минимизация технико-экономических потерь от ошибок прогноза. Предложена программа, предназначенная для поддержки принятия решений по контролю и планированию потребления энергетических ресурсов. Рассматриваемая программа базируется на текущем факторном анализе статистики потребления энергетических ресурсов подразделениями промышленного предприятия и формировании на этой основе оптимального прогнозирующего управления подразделениями. Рассмотрены основные задачи энергетического менеджмента: оперативный контроль и управление; планирование объемов производства; планирование энергосберегающих мероприятий.

*Ключевые слова:* комитетный подход, прогнозирующее управление, энергетический менеджмент.

## **Введение**

В настоящее время повышение эффективности использования энергии является основным направлением хозяйственной политики на промышленных предприятиях РФ. Однако, несмотря на это, системный эффект энергосбережения на многих предприятиях еще не достигнут. Дело в том, что решение данной проблемы не может быть получено на основе выполнения отдельных, не связанных между собой энергосберегающих мероприятий.

Как показывает опыт промышленно развитых стран и крупных металлургических предприятий Российской Федерации, системный эффект в энергосбережении может быть получен лишь на основе введения целостной системы энергетического менеджмента, охватывающей все подразделения предприятия [1–3]. При этом с системной точки зрения решение задач управления производственными процессами должно осуществляться оптимально по критериям технико-экономической и производственной эффективности.

Учитывая сказанное, в данной работе предлагается метод комитетного подхода к прогнозирующему управлению энергетической эффективностью промышленных предприятий, позволяющий оптимально организовать управление сложными технологическими объектами по указанным критериям.

## **1. Общая структура АИС ЭНЭФ**

Структурная схема автоматизированной системы энергетического менеджмента приведена на рис. 1.

На основе данных АСУ «Энергоучет» и технических отчетов, предоставляемых подразделениями, формируется информационная база данных технических отчетов об эффективности использования энергетических ресурсов за отчетный период (сутки, месяц, год). С использованием информации представленных техотчетов осуществляется текущий контроль эффективности использования энергетических ресурсов подразделениями. При этом также используются данные расчетно-нормативной базы. Текущая информация, содержащаяся в техотчетах, подвергается факторному анализу, при этом выявляются факторы, существенно влияющие на эффективность

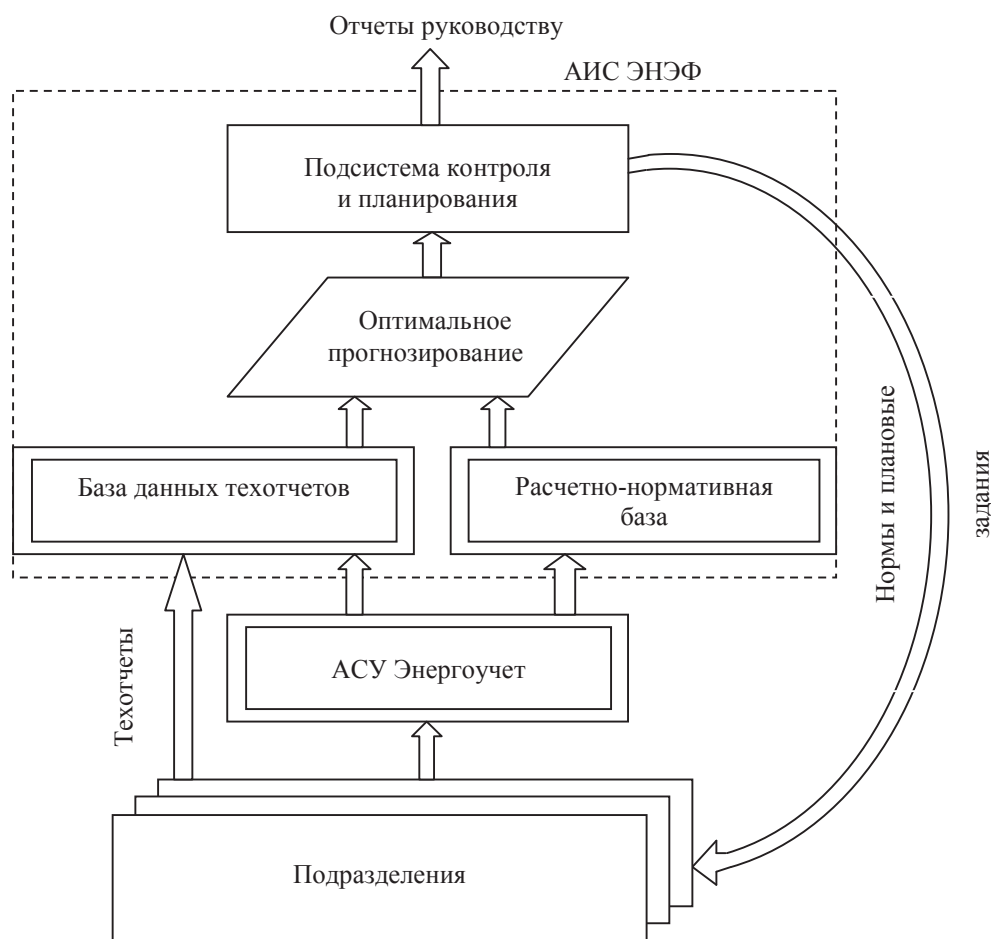


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы энергетического менеджмента предприятия

энергопотребления. Выявленные факторы и зависимости используются для оптимального построения текущих энергетических характеристик потребителей энергоресурсов с учетом производственных и технико-экономических показателей [4]. На основе полученных характеристик производится корректировка расчетно-нормативной базы энергопотребления. С использованием скорректированной расчетно-нормативной базы на последующий период подразделениям рассчитываются нормы и плановые задания по энергопотреблению. На всех этапах контроля и формирования плановых заданий осуществляется энергетическая экспертиза, целью которой является определение «узких» мест потребления энергетических ресурсов и выявление резервов снижения объемов потребления энергии. Для развязки указанных «узких» мест эксперты определяют требуемые корректирующие мероприятия с использованием результатов факторного анализа. Проведение предписанных мероприятий служит целям сокращения энергетических затрат подразделениями.

## 2. Метод комитетного подхода к оптимальному прогнозированию энергопотребления

Рассматриваемая АИС ЭНЭФ базируется на текущем факторном анализе статистики потребления энергетических ресурсов подразделениями промышленного предприятия и формировании на этой основе оптимального прогнозирующего управления подразделениями.

Энергетическая эффективность технологического оборудования в рассматриваемой задаче определяется на основе энергетических характеристик. В аналитическом виде аналитические характеристики будем представлять в виде совокупности базовой зависимости и режимных поправок:

$$W_{ЭР} = f(P_{пр}, Q_{пр}, \dots) + \sum_i c_i \Delta x_i. \quad (1)$$

Здесь базовая зависимость  $f(P_{пр}, Q_{пр}, \dots)$  отражает затраты энергетических ресурсов, зависящие непосредственно от выпуска продукции. Поправки  $\{c_i \Delta x_i\}$  отражают отклонение значений режимных параметров  $\Delta x_i$  от базовых значений на объем потребления ресурсов.

Зависимости вида (1) могут быть построены с использованием известных методов на основе обработки статистической информации результатов режимных испытаний и данных эксплуатации. В данной работе предлагается новый метод комитетного подхода, основанный на оптимальном построении энергетической характеристики (1) с заданной точностью по критерию минимума технико-экономических потерь при прогнозирующем управлении.

Рассмотрим методику построения оптимальной модели прогнозирования потребления ресурсов. Факторную зависимость энергопотребления будем представлять в обобщенном виде:

$$y = f[\mathbf{a}](\mathbf{x}), \quad (2)$$

где  $y$  – объем потребления энергоресурса,  $\mathbf{x}$  – вектор технологических факторов,  $\mathbf{a}$  – вектор структурных параметров прогнозирующей модели.

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

$$e_k = y_k - f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_k), \quad k \in I_H, \quad (3)$$

где  $k$  – индекс статистического наблюдения, принимающий значение из индексного множества  $I_H$ ,  $e_k$  – ошибка прогнозирования для  $k$ -го статистического наблюдения,  $y_k$  – фактическое значение объема потребляемых ресурсов для  $k$ -го статистического наблюдения,  $f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_k)$  – прогнозное значение объема потребляемых ресурсов для  $k$ -го статистического наблюдения.

Вводится ограничение по величине ошибки прогнозирования:

$$|e_k| \leq e_{\text{доп}}, \quad k \in I_H, \quad (4)$$

где  $e_{\text{доп}}$  – допустимая величина ошибки прогнозирования.

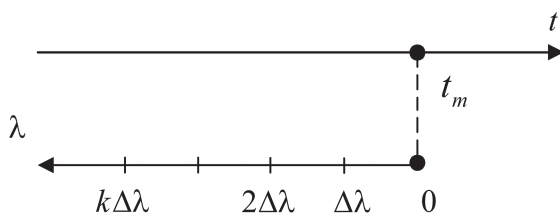


Рис. 2. Схема отсчета

Индексацию статистики будем осуществлять по обратному времени отсчета  $\lambda$ , который ведется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

Здесь  $\lambda$  – обратный отсчет времени,  $k$  – индекс статистического наблюдения,  $t$  – прямой отсчет времени,  $t_m$  – текущий момент времени, начало обратного отсчета.

Будем полагать, что в обратном отсчете времени происходит старение данных. Коэффициент старения данных для  $k$ -го статистического наблюдения будем определять по экспоненциально убывающей зависимости:

$$\alpha_k = e^{-\frac{k\Delta\lambda}{\tau_c}}, \quad (5)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент старения данных,  $\tau_c$  – постоянная времени старения данных.

Ставится задача – определить прогнозирующую модель (2) на основе оптимального выбора вектора структурных параметров  $\mathbf{a}$  по критерию максимума взвешенного числа выполненных неравенств (4):

$$\max_{\{\mathbf{a}\}} \sum_k \alpha_k \mu_k, \quad (6)$$

где  $\mu_k$  – характеристическая функция  $k$ -го неравенства,

$$\mu_k = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-е неравенство выполняется,} \\ 0, & \text{если } k\text{-е неравенство не выполняется.} \end{cases}$$

Решение данной задачи приведено в работах [5–7].

Особенность решения данной задачи состоит в том, что в общем случае она имеет противоречивую постановку и не все неравенства будут выполнены в результате решения. Невыполнение

неравенства свидетельствует о том, что данная статистическая точка является выпадающей в рамках решаемой задачи и не описывается зависимостью (3). Это может быть в двух случаях: статистическая точка является нерегулярной и представляет собой ошибку статистики, либо зависимость (2) неточно описывает реальную характеристику технологического объекта и требует ее модификации. В данной работе предлагается использовать комитетный подход на основе гибких адаптивных решений.

Комитетный подход состоит в следующем. Противоречивая система неравенств характеризуется множеством максимально-совместных подсистем, которые определяют соответствующее множество соответствующих частичных решений:

$$\{\mathbf{a}_\sigma : \beta_\sigma; \sigma \in \Sigma_{\text{com}}\}, \beta_\sigma = \sum_{k \in I_\sigma} \alpha_k \quad (7)$$

где  $\mathbf{a}_\sigma$  – частичное решение,  $\beta_\sigma$  – вес частичного решения,  $\Sigma_{\text{com}}$  – множество значений индекса максимально совместных подсистем неравенств (4),  $I_\sigma$  – множество значений индекса неравенств, входящих в максимально совместную подсистему с индексом  $\sigma$ .

Прогнозное значение потребления ресурса на основе комитетного подхода вычисляется по формуле:

$$y^* = \sum_{\sigma \in \Sigma_{\text{com}}} \beta_\sigma f[\mathbf{a}_\sigma](\mathbf{x}), \quad (8)$$

где  $y^*$  – прогнозное значение потребления ресурса.

Наличие максимально совместных подсистем свидетельствует о наличии скрытых факторов, существенно влияющих на энергопотребление технологического объекта. Данный вопрос требует дополнительного исследования на основе энергетических обследований.

Для исследования характера выпадающих статистических точек требуется проведение энергетического обследования технологического объекта. Энергетическое обследование технологического объекта является дорогостоящим мероприятием. Естественным критерием снижения стоимости энергетических обследований является уменьшение их числа. Эта задача эквивалентна задаче максимизации критерия (6), которая интерпретируется как нахождение максимально совместных подсистем регулярных статистических точек.

В общем случае объема статистических данных эксплуатации технологических объектов может оказаться недостаточно для корректного построения эмпирической модели прогнозирования. Для регуляризации постановки задачи при недостаточном объеме статистических данных будем использовать нормативную модель расчета потребления ресурсов. Указанная модель строится на основе нормативных методик расчета потребления ресурсов технологическими процессами, нормативных энергетических характеристик процессов, карт рабочих режимов и т. п.

В качестве критерия регуляризации постановки задачи будем использовать сумму квадратов отклонения фактического значения объема потребляемых ресурсов от нормативного значения:

$$R = \sum_k |y_k - \varphi_H(\mathbf{x})|^2, \quad (9)$$

где  $R$  – критерий регуляризации,  $\varphi_H(\mathbf{x})$  – нормативная энергетическая характеристика технологического объекта.

Задача определения структурных параметров  $\mathbf{a}$  прогнозирующей модели с учетом критерия регуляризации (9) сводится к задаче минимизации функции:

$$\min_{\{\mathbf{a}\}} E^2 = \sum_k |y_k - \varphi_H(\mathbf{x})|^2, \quad (10)$$

Прогнозирующая модель используется для прогноза потребления энергетических ресурсов в расчетный период, исходя из производственного задания для технологических объектов. Данный прогноз используется для контроля потребления ресурсов, а также для заявок на покупку ресурсов. В любом случае ошибка прогноза влечет за собой технико-экономические потери, которые необходимо минимизировать.

На рис. 3 представлен график штрафа, налагаемого в зависимости от цены ошибки прогнозирования потребления ресурса [8].

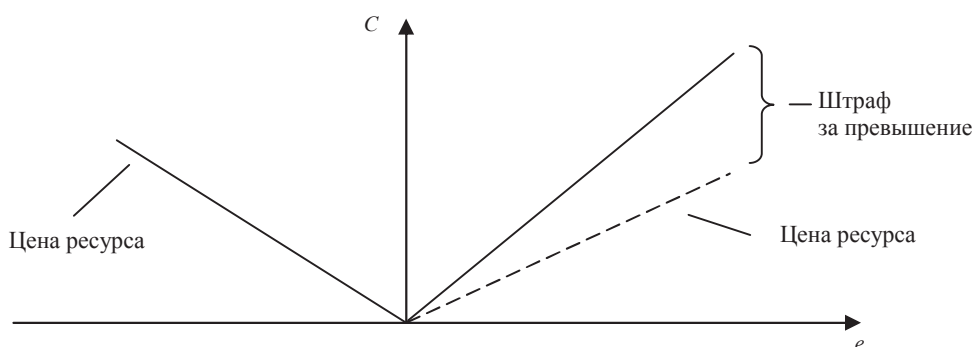


Рис. 3. Цена ошибки

Штраф может быть определен, например, на основе следующих соображений. Если модель прогнозирования дает большую положительную ошибку, то прогноз на основе такой модели дает заниженную оценку. В этом случае заявка предприятия на лимитируемый ресурс будет занижена, и предприятию для выполнения производственного плана необходимо будет просить сверхлимитную поставку ресурса по повышенной цене. Если же прогноз завышен, то поставка ресурса будет избыточной, за что предприятию, естественно, тоже придется платить.

Суммарный штраф за неточный прогноз:

$$C = \sum_k c_P \cdot |e_k^-| + \sum_k c_{\text{Ш}} \cdot |e_k^+| \quad (11)$$

где  $c_P, c_{\text{Ш}}$  – стоимость ресурсов и штрафа соответственно,  $e_k^-, e_k^+$  – отрицательные и положительные значения ошибки.

В итоге задача оптимального построения прогнозирующей модели решается на основе трех критериев:

- 1) максимизация взвешенной суммы точек прогноза заданной точности (6);
- 2) переход к решению задачи по нормативным методикам при неполном объеме статистических данных на основе минимизации регуляризующей функции (8);
- 3) минимизация технико-экономических потерь от ошибок прогноза (11).

Решение данной задачи сводится к решению многоэкстремальной задачи математического программирования с недифференцируемыми критериями. Методика решения подобных задач изложена в работе [9]. При этом в качестве решающей используется квадратичная штрафная функция вида:

$$S = 0,5 \cdot \sum_k s_P^2 \alpha_k \cdot |e_k^-|^2 + 0,5 \cdot \sum_k s_{\text{Ш}}^2 \alpha_k \cdot |e_k^+|^2 + \gamma_R \sum_k |y_k - \varphi_{\text{Н}}(\mathbf{x})|^2, \quad (12)$$

где  $\gamma_R$  – коэффициент регуляризации, параметры  $s_P, s_{\text{Ш}}$  подбираются исходя из минимума технико-экономического критерия.

Алгоритм решения поставленной задачи приведен в работе [10].

### 3. Функциональные возможности АИС ЭНЭФ

АИС-ЭНЭФ обеспечивает выполнение следующих функций [11]:

- прогнозирование потребления энергетических ресурсов при заданных плановых значениях выпуска продукции и установленных значениях базовых технологических факторов;
- определение текущих показателей энергоёмкости подразделений;
- определение величин перерасхода потребления энергии и причин, их обуславливающих;
- оценка резервов снижения потребления электроэнергии.

В программе представлены следующие опции:

- анализ потребления энергетических ресурсов;
- ведение информационной базы отчетов и их просмотр;

– информация по энергоэффективным мероприятиям, предписанным для снижения энергоемкости производства по отдельным подразделениям.

Просмотр отчета

При нажатии на кнопку «Просмотр отчета» появляется таблица (рис. 4), содержащая в себе следующие столбцы:

- год;
- цех – название цеха;
- объем производства (плановый и фактический);
- расход топлива:
  - план – плановый расход топлива, рассчитываемый на основе факторного анализа по плановому объему производства и заданных значениях базовых технологических факторов;
  - план/факт – плановый расход топлива, рассчитываемый на основе факторного анализа по фактическому объему производства;
  - факт – фактическое потребление топлива соответствующим цехом;
- удельный расход топлива (плановый и фактический);
- перерасход топлива;
- удельный перерасход топлива, %.

Год	Цех	Объем произ-водства план	Объем произ-водства факт	Расход эл. энергии план.	Расход эл. энергии факт.	Удельный расход план	Удельный расход факт	Перерасход электроэнергии	Уд. перерасход, %
2007	ПОП		10382745,0		522737400,0		5083,539		
	ДЦ	9519900,0	9520386,0	79899616,0	78658499,0	838,3	836,715	-155231,267	-0,002
	ИФП		638274,0		117436219,0		14009,288		
	КП		132897950,0		1550080762,0		1169,375		
	КЦ		860028,0		35202228,0		4030,149		
	КУС		5354100,0	24182389,6	282569167,0		5277,822		
	ПВС		808652720,0		111932514,0		13,825		
	ТЭЦ	2515080100,0	2515081000,0	206602540,1	290321755,0	11,4	11,543	3719112,342	0,013
	ЦЭС		153489,0	33862874,5	34701450,0		22688,428		
	Цех г.п.		5453816,0		436020425,0		7994,777		
	Цех х.п.		2299813,0		197100414,0		8571,025		
	Цех х.п.		361298,0		34400655,0		9521,408		
	ЦЭС		1741494110,0	12700798,0	164818749,0		9,470		
	ЭСЦ		3184425,0		1001507471,0		31460,182		

Рис. 4. Просмотр отчетов

Расчет величины потребления топливных газов (или электроэнергии) осуществляется отдельно по каждому цеху на основе многофакторного регрессионного анализа (рис. 5).

Факторный анализ  
Ломенный цех (ЛП)

Расчет на основе регрессионного метода:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n$$

Факторная модель

Вид потребляемого ресурса: Потребление топлива

Потребление топлива:

Фактор	Наименование	Коэффициент	Значение фактора
Фактор 0	а0	-55250	1
Фактор 1	производство чугуна, т	0,5306	
Фактор 2	качество кокса М25, %	4571	
Фактор 3	сера в коксе, %	91810	
Фактор 4	летучие, %	6766	

Сохранить изменения

Рис. 5. Факторный анализ

В верхней части окна расположен выпадающий список с названием цеха, для которого необходимо осуществить расчет. Ниже расположен еще один выпадающий список, в котором выбирается вид потребляемого ресурса. Это дает возможность на основе многофакторного регрессионного анализа рассчитать не только потребление топлива в целом, но и отдельных его составляющих, таких как природный, доменный, коксовый газ. Далее располагается таблица, в которой выводится список факторов для конкретного цеха и конкретного потребляемого ресурса, значение коэффициентов регрессии и значения факторов. При этом значения факторов могут быть отредактированы. Для этого необходимо из главного меню выбрать команду «Режим→Редактирование». Кроме того, в окне присутствует кнопка «Факторная модель», при нажатии которой появляется окно, представленное на рис. 6.

**Факторный анализ**

Переменные	Среднее	Стандартное отклонение
Чугун, т		
Зола, %	12,54	0,3142
Летучие, %	0,9989	0,2419
Кокс фракции М25, %	83,09	2,214
Влага кокса, %	3,485	0,2037
Сера в коксе, %	0,4619	0,02299
Кокс фракции М40, %	66,25	2,648
Кокс фракции М10, %		
Железо, т		
Топливо, тунт	501200	37140

Тип факторной модели: Потребление топлива

**Матрица парных коэффициентов корреляции энергетических и технологических параметров**

var/var	Чугун, т	Зола, %	Летучие, %	Кокс фракции М25, %	Влага кокса, %	Сера в коксе, %	Кокс фрак
Чугун, т	1						
Зола, %	0,212	1					
Летучие, %	0,652	0,329	1				
Кокс фракции М25, %	-0,239	-0,537	-0,357	1			
Влага кокса, %	0,249	0,387	0,209	-0,474	1		
Сера в коксе, %	0,195	0,081	0,349	0,002	-0,113	1	
Кокс фракции М40, %	-0,492	-0,462	-0,552	0,778	-0,405	-0,001	1
Кокс фракции М10, %	0,088	0,582	0,301	-0,846	0,37	0,084	
Железо, т	0,995	0,234	0,676	-0,244	0,246	0,229	
Топливо, тунт	0,976	0,305	0,713	0,351	0,278	0,274	

Рис. 6. Факторная модель

Окно (рис. 6) предназначено для вывода факторной модели цеха, выбранного в окне «Факторный анализ» (рис. 5). Здесь присутствуют две таблицы. Верхняя таблица предназначена для вывода по каждому фактору для данного цеха значений среднего и стандартного отклонения. Нижняя – для вывода матрицы парных коэффициентов корреляции энергетических и технологических параметров. Также в этом окне имеется выпадающий список «Тип факторной модели», позволяющий просмотреть для данного цеха не только факторную модель потребления топлива в целом, но и факторные модели потребления отдельных составляющих топлива, таких как природный, коксовый и доменный газ.

В отличие от простого коммерческого учета на вводах предприятия предлагаемая система основана на построении энергетических характеристик конкретных цехов и производственных участков. Это позволяет осуществлять точный прогноз потребления энергетических ресурсов, выявлять места возникновения перерасхода ресурсов, выяснять причины возникновения перерасхода энергетических ресурсов, оценивать резервы снижения энергоемкости производства на основе предписываемых энергосберегающих мероприятий.

#### 4. Задачи энергетического менеджмента

На основе построенных моделей прогнозирования потребления энергетических ресурсов можно решать разнообразные задачи энергетического менеджмента производства. К основным задачам энергетического менеджмента относятся:

- оперативный контроль и управление;
- планирование объемов производства;
- планирование энергосберегающих мероприятий.

Оперативный контроль осуществляется на основе сравнения расчетных объемов потребления ресурсов на производственных участках с фактическими. Наиболее простым подходом является допусковый контроль:

$$V_{ij}^{\Phi} \leq V_{ij}^P, \quad i \in I_p, \quad j \in I_{пу}, \quad (13)$$

где  $V_{ij}^{\Phi}$  – фактический объем потребленного  $i$ -го ресурса  $j$ -м производственным участком;  $V_{ij}^P$  – расчетный объем потребления  $i$ -го ресурса по прогнозным моделям  $j$ -го производственного участка;  $I_p$  – индексное множество ресурсов;  $I_{пу}$  – индексное множество производственных участков.

Для оценки локальной эффективности производственного участка вводятся локальные показатели ресурсоемкости:

$$a_{ij} = \frac{V_{ij}^{\Phi}}{P_j}, \quad (14)$$

$V_{ij}$  – объем потребляемого  $i$ -го ресурса  $j$ -м производственным участком;  $P_j$  – объем вырабатываемой основной продукции  $j$ -го производственного участка.

С учетом (14) оперативный контроль локальных производственных участков в соответствии с (13) осуществляется на основе допусков:

$$a_{ij}^{\Phi} \leq a_{ij}^P, \quad i \in I_p, \quad j \in I_{пу}, \quad (15)$$

где

$$a_{ij}^{\Phi} = \frac{V_{ij}^{\Phi}}{P_j^{\Phi}}, \quad (16)$$

$V_{ij}^{\Phi}$ ,  $P_j^{\Phi}$  – фактические объемы потребленного  $i$ -го ресурса и выработанной основной продукции  $j$ -го производственного участка;

$$a_{ij}^P(P_j^{\Phi}, \mathbf{x}_j^{\Phi}) = \frac{V_{ij}^P(P_j^{\Phi}, \mathbf{x}_j^{\Phi})}{P_j^{\Phi}}, \quad (17)$$

$V_{ij}^P(\cdot, \cdot)$  – расчетная формула прогнозирования потребления  $i$ -го ресурса, исходя из фактического значения объема основной продукции  $P_j^{\Phi}$  и фактического значения вектора технологических факторов  $\mathbf{x}_j^{\Phi}$ .

При нарушении допусков (13), (15) в процессе производства необходимо осуществлять мероприятия по оперативному управлению соответствующим производственным участком с целью ликвидации допущенного снижения эффективности производственного участка.

Рассмотрим задачу оперативного планирования объемов производства.

Данная задача сводится к решению следующей экстремальной задачи:

$$\begin{aligned} & \max_{\{P_j\}} C, \\ & C = \sum_{j \in J_p} c_j P_j, \\ & \sum_{j=1}^{n_p} a_{ij}^{\Phi} P_j \leq V_{i\tau}, \\ & \sum_{j=1}^{n_p} b_{ij} P_j = 0, \quad i = 0, \dots, n_{пу}. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь  $c_j$  – цена  $j$ -й выходной продукции предприятия;  $J_p$  – индексное множество выходной продукции предприятия;  $C$  – суммарная выручка предприятия от реализации продукции. Ставится задача найти оптимальный план выпуска продукции по критерию максимума суммарной выручки от ее реализации. Данная задача решается при следующих ограничениях. Ограничения по



потреблению ресурсов, определяемые лимитами  $V_{it}$ . Здесь  $a_{ij}^{\bar{6}}$  – базовые значения ресурсоемкости  $j$ -й продукции;  $n_p$  – количество видов продукции, производимой на всех производственных участках. Далее между производственными участками существуют технологические связи, которые определяют поступление одних видов продукции с выходов определенных участков на входы соответствующих участков. Технологические связи определяют дополнительные ограничения решаемой экстремальной задачи. Здесь  $b_{ij}$  – коэффициенты технологических связей между производственными участками;  $n_{пу}$  – число производственных участков.

Особенностью решаемой задачи является то, что в общем случае базовые значения ресурсоемкости  $j$ -й продукции  $a_{ij}^{\bar{6}}$  зависят от объемов выпускаемой  $j$ -й продукции, исходя из соотношений:

$$a_{ij}^{\bar{6}}(P_j, \mathbf{x}_j^{\bar{6}}) = \frac{V_{ij}^p(P_j, \mathbf{x}_j^{\bar{6}})}{P_j}, \quad i \in I_p, \quad j \in I_{пу}. \quad (19)$$

Поэтому задача (18) относится к классу задач нелинейного программирования. Одним из подходов к решению данной задачи является линейаризация соотношений (19) в номинальной точке с последующим решением задачи линейного программирования. Полученное решение используется для уточнения значений коэффициентов (19), и процесс решения итеративно повторяется. Если итеративный процесс решения сходится, то он сходится к оптимальному решению. В результате будет получена оптимальная загрузка производственных участков по критерию максимума суммарной выручки предприятия от реализации продукции.

Дальнейшее улучшение решения задачи (18) можно получить на основе метода ограничений, рассмотренного в [12]. В этом случае в процессе решения снижается лимит потребления ресурсов  $V_{it}$  до того момента, пока постановка задачи не становится противоречивой. Для противоречивой постановки задачи находится критическое ограничение, которое препятствует дальнейшему снижению ресурсоемкости производства. Критическое ограничение подвергается всестороннему обследованию с целью ослабления его влияния на эффективность производства. В результате обследования могут быть сформулированы ресурсосберегающие мероприятия, которые позволят снизить ресурсоемкость производства на критическом участке. При итеративном применении указанного подхода к повышению эффективности производства можно организовать процесс развития производства по направлению последовательного улучшения показателей эффективности.

Следующей задачей энергетического менеджмента является оптимальное формирование плана ресурсосберегающих мероприятий с целью повышения эффективности производства.

На рис. 7 представлена типовая зависимость стоимости ресурсосберегающих мероприятий от их эффективности. Здесь  $a$  – показатель ресурсоемкости производства;  $\pi_i$  – планы  $i$ -х ресурсосберегающих мероприятий;  $c$  – стоимость ресурсосберегающих мероприятий. Характерной особенностью зависимости стоимости ресурсосберегающих мероприятий от их эффективности является то, что при снижении ресурсоемкости производства вследствие выполняемых мероприятий стоимость мероприятий возрастает. Начальной точкой отсчета является значение ресурсоемкости  $a = a_0$ , где  $a_0$  – существующее значение ресурсоемкости производства. Для данной точки, естественно,  $c = 0$ . Далее, существует нижняя потенциально достижимая грань эффективности  $a_{\min}$ , определяемая физическими ограничениями, которая достигается лишь асимптотически при сколь угодно больших значениях стоимости капиталовложений. Реальные планы мероприятий  $\pi_1, \pi_2, \dots$  располагаются между крайними случаями.

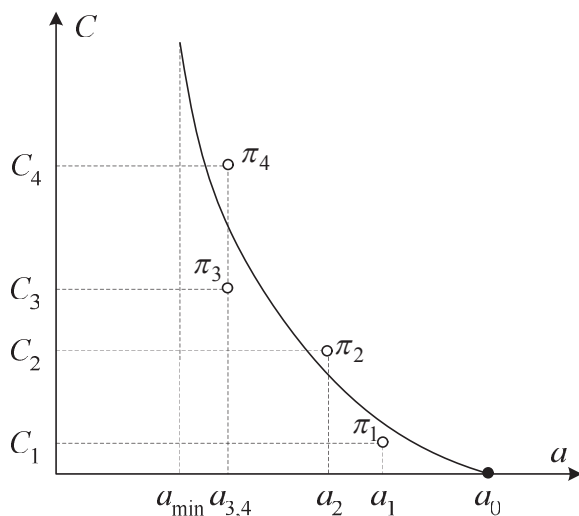


Рис. 7. Типовая зависимость стоимости ресурсосберегающих мероприятий от их эффективности

Характерной особенностью зависимости стоимости ресурсосберегающих мероприятий от их эффективности является то, что при снижении ресурсоемкости производства вследствие выполняемых мероприятий стоимость мероприятий возрастает. Начальной точкой отсчета является значение ресурсоемкости  $a = a_0$ , где  $a_0$  – существующее значение ресурсоемкости производства. Для данной точки, естественно,  $c = 0$ . Далее, существует нижняя потенциально достижимая грань эффективности  $a_{\min}$ , определяемая физическими ограничениями, которая достигается лишь асимптотически при сколь угодно больших значениях стоимости капиталовложений. Реальные планы мероприятий  $\pi_1, \pi_2, \dots$  располагаются между крайними случаями.

Зависимость на рис. 7 в общем случае имеет дискретный характер. Однако при решении задач планирования ее можно аппроксимировать непрерывной кривой, например, зависимостью

$$c = s \left( \frac{1}{(\delta a)^v} - 1 \right), \quad \delta a = \frac{a - a_{\min}}{a_0 - a_{\min}}, \quad (20)$$

где  $s, v$  – коэффициенты, определяемые на основе статистики.

Задачу оптимального выбора локальных мероприятий по повышению эффективности производства, состоящего из  $i$ -х производственных участков, можно сформулировать, например, следующим образом:

$$\begin{aligned} \min_{\{a_{ij}\}} C &= \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_{ny}} c_{ij}, \\ \sum_{j=1}^{n_{ny}} a_{ij} P_j^\delta &\leq V_{it}, \\ c_{ij} &= s_{ij} \left( \frac{1}{(\delta a_{ij})^{v_{ij}}} - 1 \right), \quad \delta a_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{ij, \min}}{a_{ij,0} - a_{ij, \min}}, \\ a_{ij, \min} &< a_{ij} \leq a_{ij,0}, \quad i = 1, 2, \dots, n_p, \quad j = 1, 2, \dots, n_{ny}. \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь  $P_j^\delta$  – базовый объем производства на  $j$ -м участке;  $V_{it}$  – лимит потребления  $i$ -го ресурса.

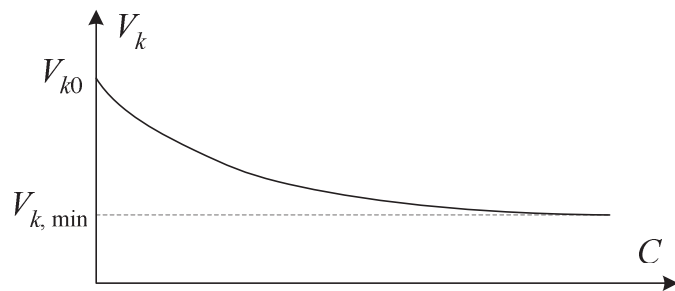
Задача, обратная задаче (21), может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned} \min_{\{a_{ij}\}} V_k, \\ \sum_{i=1}^{n_p} \sum_{j=1}^{n_{ny}} c_{ij} &\leq C_T, \\ V_k &= \sum_{j=1}^{n_{ny}} a_{kj} P_j^\delta, \\ \sum_{j=1}^{n_{ny}} a_{ij} P_j^\delta &\leq V_{it}, \\ c_{ij} &= s_{ij} \left( \frac{1}{(\delta a_{ij})^{v_{ij}}} - 1 \right), \quad \delta a_{ij} = \frac{a_{ij} - a_{ij, \min}}{a_{ij,0} - a_{ij, \min}}, \\ a_{ij, \min} &< a_{ij} \leq a_{ij,0}, \quad i = 1, 2, \dots, n_p, \quad j = 1, 2, \dots, n_{ny}. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь  $V_k$  – выделенный ресурс, максимальное снижение которого является целью решаемой экстремальной задачи;  $C_T$  – ограничение на объем располагаемых стоимостных ресурсов.

Задачи (21), (22) являются задачами нелинейного программирования. Поэтому их решение необходимо проводить соответствующими методами нелинейного программирования.

Решения задач (21), (22) при различных значениях ограничений  $V_{it}$  и  $C_T$  позволяют построить область Парето неулучшаемых решений, общий вид которой приведен на рис. 8. Из рассмотрения области Парето можно выбрать компромиссное решение, приемлемое как с точки зрения ресурсосберегающего эффекта, так и стоимости.



**Рис. 8. Зависимость величины снижения объема потребляемого ресурса от стоимости ресурсосберегающих мероприятий**

Полученное решение является приближенным, так как зависимость стоимости ресурсосберегающих мероприятий от их эффективности в общем случае является дискретной. Для получения более точного решения необходимо использовать методы дискретного программирования, например, методы сокращенного перебора вариантов округления полученного непрерывного решения.

Далее, полученное решение является оптимальным лишь при заданном распределении объемов выпуска продукции  $P_j^o$ . Изменение показателей ресурсоемкости  $a_{ij}$  в результате решения задач (21), (22) приведет к тому, что принятое распределение объемов  $P_j^o$  станет неоптимальным. В этом случае требуется повторное решение задачи (18) и нахождение нового базового распределения объемов выпуска продукции. Процесс решения итеративно повторяется. Если итеративный процесс решения задач (18), (21), (22) сходится, то он сходится к оптимальному решению, общему для указанных частных задач.

В заключение необходимо отметить, что решение задач (21), (22) осуществляется на множестве локальных мероприятий, которые окупаются в рамках заданного срока. В случае рассмотрения масштабных мероприятий, влекущих за собой системные изменения характеристик производства, решение необходимо основывать на детальном технико-экономическом анализе вариантов.

### Выводы

1. Предложен метод комитетного подхода к прогнозирующему управлению энергетической эффективностью промышленных предприятий, позволяющий оптимально организовать управление сложными технологическими объектами по критерию минимума технико-экономических потерь при прогнозирующем управлении, основанный на оптимальном построении энергетической характеристики с заданной точностью. Задача оптимального построения прогнозирующей модели решается на основе трех критериев: максимизации взвешенной суммы точек прогноза заданной точности; перехода к решению задачи по нормативным методикам при неполном объеме статистических данных на основе минимизации регуляризирующей функции; минимизации технико-экономических потерь от ошибок прогноза.

2. Разработана программа для ЭВМ АИС ЭНЭФ, предназначенная для поддержки принятия решений по контролю и планированию потребления энергетических ресурсов – электроэнергии, природного газа.

3. Рассмотрены основные задачи энергетического менеджмента: оперативный контроль и управление; планирование объемов производства; планирование энергосберегающих мероприятий.

### Литература

1. 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: Издательский центр ЮУрГУ: издатель Т. Лурье, 2010. – 228 с.

2. Барбасова, Т.А. Внедрение системы энергетического менеджмента на металлургических предприятиях Челябинской области в целях повышения энергетической эффективности региона / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Экономика промышленности. – 2012. – № 3. – С. 42–46.

3. Барбасова, Т.А. Пути повышения энергетической эффективности Челябинской области / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Инновационный Вестник Регион. – 2012. – № 2. – С. 69–75.

4. Копцев, Л.А. Моделирование потребления топлива в ОАО «ММК» / Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Промышленная энергетика. – М.: НТФ «Прогресс». – 2004. – Вып. № 5. – С. 2–6.

5. Казаринов, Л.С. Алгоритм оптимизации для задач проектирования при противоречивом техническом задании / Л.С. Казаринов, А.Б. Бордецкий // Информационные и управляющие элементы и системы: сб. науч. тр. № 231. – Челябинск: ЧПИ, 1979.

6. Казаринов, Л.С. Об определении комитета системы взвешенных неравенств / Л.С. Казаринов, А.Б. Бордецкий // Кибернетика. – № 5. – 1981.

7. Казаринов, Л.С. Координация решений в многоуровневых системах проектирования. Вопросы кибернетики. Методы и модели оценки эффективности развивающихся систем / Л.С. Казаринов, Н.В. Омельченко. – М.: Наука, 1982.

8. Япрынцева, И.А. Подготовка к управлению потреблением топлива в ОАО «ММК» на основе математических статистических зависимостей / И.А. Япрынцева // Известия Челябинского научного центра. – [http://www/sci.urfu.ac.ru/news/2004\\_4\(26\)/](http://www/sci.urfu.ac.ru/news/2004_4(26)/). – С. 96–100.

9. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление /когнитивный подход/: научно-методическое пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ: Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.

10. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления энергетических ресурсов по стоимостному критерию / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 90–94.

11. 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. – № 23. – С. 118–122.

12. Казаринов, Л.С. Введение в методологию системных исследований и управления: моногр. // Л.С. Казаринов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 344 с.

Казаринов Лев Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, декан приборостроительного факультета, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), [kazarinov@ait.susu.ac.ru](mailto:kazarinov@ait.susu.ac.ru)

Барбасова Татьяна Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), [tatyana\\_barbasova@mail.ru](mailto:tatyana_barbasova@mail.ru)

Захарова Александра Александровна, аспирант кафедры автоматики и управления, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), [al\\_ekca@mail.ru](mailto:al_ekca@mail.ru)

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”**  
**2013, vol. 13, no. 2, pp. 12–24**

---

## **METHOD OF PREDICTIVE CONTROL OF INDUSTRIAL FACILITIES ENERGY EFFICIENCY**

**L.S. Kazarinov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
[kazarinov@ait.susu.ac.ru](mailto:kazarinov@ait.susu.ac.ru)

**T.A. Barbasova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
[tatyana\\_barbasova@mail.ru](mailto:tatyana_barbasova@mail.ru)

**A.A. Zakharova**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
[al\\_ekca@mail.ru](mailto:al_ekca@mail.ru)

A method of the committee approach to the prognostic control of energy efficiency of industrial plants is considered. The method is based on optimal prognostic model for energy consumption of technological objects and production departments. The model-building is based on three criteria: (1) the maximum of the weighted sum of the forecasting points with required accuracy; (2) regularization of the problem statement in case of incomplete data; (3) minimization of economic losses arising from forecast errors. A special program for energy efficiency decision-making support is offered. The program is based on factorial analysis of the current energy consumption of the controlled units and energy consumption goals setting. The main objectives of energy management: operational management and control, planning of production, planning of energy saving measures are considered.

*Keywords: the committee approach, prognostic control, energy management.*

## References

1. Kazarinov L.S. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya v energosberezhenii (opyt razrabotki): monografiya* [Automated Control Systems in Energy Saving (Development Experience)] / L.S. Kazarinov, D.A. Shnayder, T.A. Barbasova and others. Chelyabinsk: Publisher SUSU, 2010. 228 p.
2. Barbasova T.A., Zakharova A.A. The Introduction of an Energy Management System at the Metallurgical Enterprises of the Chelyabinsk Region in Order to Increase Energy Efficiency in the Region [Vnedreniye sistemy energeticheskogo menedzhmenta na metallurgicheskikh predpriyatiyakh Chelyabinskoy oblasti v tselyakh povysheniya energeticheskoy effektivnosti regiona]. *Ekonomika promyshlennosti [Industrial Economics]*, 2012, № 3, pp. 42–46.
3. Barbasova T.A., Zakharova A.A. Ways to Increase the Energy Efficiency of the Chelyabinsk Region [Puti povysheniya energeticheskoy effektivnosti Chelyabinskoy oblasti]. *Innovatsionnyy Vestnik Region [Innovation Herald Region]*. 2012. № 2. pp. 69–75.
4. Koptsev L.A., Yapryntseva I.A. Modeling of Fuel Consumption in JSC “Magnitogorsky Iron and Steel Works” [Modelirovaniye potrebleniya topliva v OAO «ММК»]. *Promyshlennaya energetika [Industrial Energy]*. Moscow: NTF “Progress”, 2004, Issue. Number 5, pp. 2–6.
5. Kazarinov L.S., Bordetsky A.B. Optimization Algorithm for Design Problems with Inconsistent Specifications [Algoritm optimizatsii dlya zadach proyektirovaniya pri protivorechivom tekhnicheskome zadani]. *Informatsionnyye i upravlyayushchiye elementy i sistemy. Trudy CHPI [Information and control elements and systems. Proceedings of the ChPI]*, № 231, Chelyabinsk, 1979.
6. Kazarinov L.S., Bordetsky A.B. On the Determination of the Committee System of Weighted Inequalities. [Ob opredelenii komiteta sistemy vzveshennykh neravenstv]. *Kibernetika [Cybernetics]*. № 5. 1981.
7. Kazarinov L.S., Omelchenko N.V. Coordination of Decisions in the Multi-level Design Systems. [Koordinatsiya resheniy v mnogourovnevnykh sistemakh proyektirovaniya]. *Voprosy kibernetiki. Metody i modeli otsenki effektivnosti razvivayushchikhsya sistem [Problems of Cybernetics. Methods and models for assessing the effectiveness of developing systems]*. Moscow: Nauka, 1982.
8. Yapryntseva I.A. The Preparation to Control the Consumption of Fuel in the JSC “Magnitogorsky Iron and Steel Works” on the Basis of Mathematical Statistical Dependencies [Podgotovka k upravleniyu potrebleniyem topliva v OAO «ММК» na osnove matematicheskikh statisticheskikh zavisimostey] *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra [Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center]*. [http://www.sci.urfu.ac.ru/news/2004\\_4\(26\)/](http://www.sci.urfu.ac.ru/news/2004_4(26)/). pp. 96–100.
9. Kazarinov L.S. *Sistemnyye issledovaniya i upravleniye / kognitivnyy podkhod/: nauchno-metodicheskoye posobiye / [System Studies and Management / Cognitive Approach /: Research Tools /]* L.S. Kazarinov. Chelyabinsk: Publisher SUSU, 2011. 524 p.
10. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Zakharova A.A. Optimal Prediction of Energy Resources Consumption, in Value Criterion [Optimal'noye prognozirovaniye potrebleniya energeticheskikh resursov po stoimostnomu kriteriyu] *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika»*. [The Bulletin of the South-Ural State University. Series «Computer Technology, Control, Electronics»]. 2013. Volume 13, № 1, pp. 90–94.
11. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Zakharova A.A. Automated Information Decision Support System on Control and Planning Energy Resources Usage [Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniy po kontrolyu i planirovaniyu potrebleniya energeticheskikh resursov] *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika»*. [The Bulletin of the South-Ural State University. Series «Computer Technology, Control, Electronics»]. 2012. № 23. pp. 118–122.
12. Kazarinov L.S. *Vvedeniye v metodologiyu sistemnykh issledovaniy i upravleniya: monografiya [Introduction to the Methodology of Systems Research and Management: Study]*. Chelyabinsk: Publisher SUSU, 2008. 344 p.

*Поступила в редакцию 18 марта 2013 г.*