

Шеметов А.Н.<sup>1</sup>, Федорова С.В.<sup>2</sup>, Кузнецов С.В.<sup>2</sup>, Ляпин Р.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

<sup>2</sup>НЧОУ ВО «Технический университет УГМК»

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВОМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В статье рассмотрены научные и методологические основы управления энергохозяйством горно-металлургических предприятий – от формирования математических моделей энергозатрат до оперативного управления режимами энергопотребления. Представлен отечественный и зарубежный опыт теоретического решения задач оптимизации технологического режима и энергосбережения. Выделены основные особенности энергопотребления горно-металлургических предприятий. Предложены оригинальные адаптивные модели управления энергоёмкими потребителями электроэнергии, построенные на базе теории нечетких множеств.

**Ключевые слова:** энергохозяйство, энергопотребление, оперативное управление, оптимизация, горно-металлургический комплекс.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных нестабильных условиях рынка промышленной продукции и энергоносителей управление энергохозяйством крупных предприятий невозможно без соответствующего информационного обеспечения, позволяющего оперативно реагировать на изменения условий производства. Потребление энергетических ресурсов в большинстве сфер деятельности зависит от целого комплекса производственных и технологических факторов, поэтому для выработки и принятия технически верных и экономически обоснованных решений необходимо установление закономерностей формирования энергозатрат в виде математических моделей энергопотребления, учитывающих уровень и динамику энергопотребления [1-6]. Особенно актуальна эта задача для энергоёмких горно-металлургических предприятий, режим работы которых характеризуется сложной системой взаимосвязанных, зачастую вероятностно заданных или нечетких факторов.

Соответственно модели и алгоритмы управления энергохозяйством должны учитывать вариативность изменения технологических и экономических режимов и предлагать «на выходе» максимально гибкие, адаптивные организационно-технические решения на всех административных уровнях управления: от оперативного регулирования параметров работы отдельных агрегатов до оптимизации общепроизводственной системы нормирования, прогнозирования и планирования энергозатрат.

### МЕТОДЫ

С точки зрения системного подхода, энергохозяйство промышленного предприятия можно представить в виде разветвленной иерархической структуры, где каждый уровень выполняет свои задачи, отличающиеся степенью локализации и детализации:

На нижнем уровне имеется подробная информация по текущему состоянию каждого крупного потребителя энергии (электроприемника) с возможностью оперативного (*on-line*) вмешательства в технологический процесс,

но без учета средне- или долгосрочной перспективы функционирования предприятия. Поэтому здесь решаются локальные задачи оптимального управления по критерию максимального производства продукции заданного качества. Соответственно набор переменных процесса ограничен только числом каналов АСУТП.

Простейшие математические модели электропотребления описывают каждую технологическую операцию и электропривод на базе известных фундаментальных законов физики и затем агрегируются по принципу «снизу вверх» [7-8]. Такой подход используется по сей день при малой размерности электрического хозяйства и относительной простоте электрооборудования и технологических режимов, например для насосов и тому подобной «вентиляторной» нагрузкой:

$$P = \frac{H \cdot Q}{100 \cdot \eta}, \quad (1)$$

где  $H$  – напор перекачиваемой среды, м;  $Q$  – производительность, м<sup>3</sup>/ч;  $\eta$  – полный КПД установки.

Если для каждого конкретного насоса, дымососа или вентилятора принять напор величиной постоянной, то его электропотребление можно считать прямо пропорциональным производительности, что справедливо и для всей насосной системы в целом (рис. 1).

Однако такой упрощенный подход не позволяет оценить некоторые характерные особенности работы потребителей [1, 9-10]. Например, для газозавоздуходувки это сезонный фактор, связанный с некоторым снижением производительности в летнем сезоне (в результате проведения плановых ремонтов) и с повышением плотности холодного воздуха зимой (рис. 2).

Таким образом, для более сложных объектов возникает необходимость учета большого количества технологических связей, что приводит к переходу от детерминированной аналитической постановки задачи к вероятностно-статистической, при которой энергетические характеристики рассматриваются как многомерные регрессионные зависимости, отражающие совокупность параметров состояния машин и механизмов:

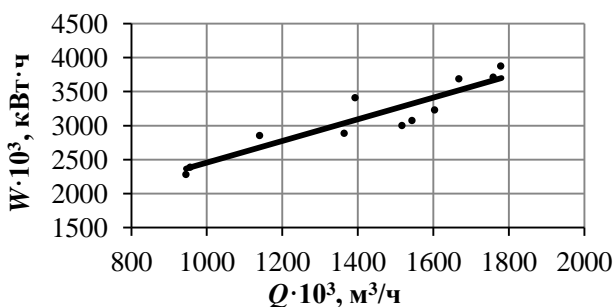


Рис. 1. Зависимость электропотребления газовоздуходук

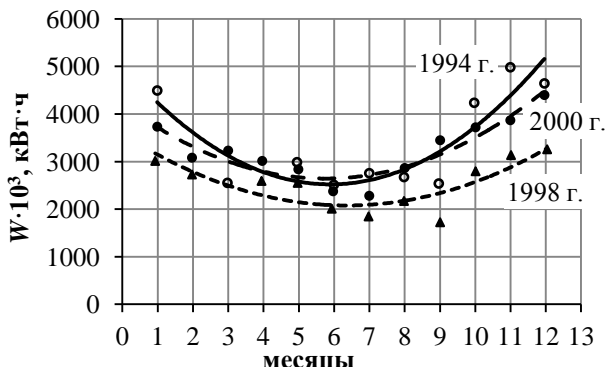


Рис. 2. Изменение электропотребления газовоздуходук в течение года

$$y_{iq} = \sum_{j=1}^k b_j x_{ij} + a_{ij} z_{ij} + e_i; \quad j = \overline{1, m}; \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где  $\vec{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$  – вектор результативных энергетических показателей;  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  – векторы значимых производственных факторов.

Принципиально важно, что речь идет не о точном однозначном решении, а лишь о наличии математического ожидания и приемлемой для практики инженерной ошибки прогнозной модели электропотребления. При этом решение задачи моделирования производится комплексно, с учетом статистических критериев и технического анализа причинно-следственных связей между технологическими и энергетическими факторами.

На среднем уровне управления (цеха и передель) осуществляется переход от поагрегатных и пооперационных расчетов к выделению некоторых существенных параметров, характеризующих расход электроэнергии данного промышленного объекта в целом. Например, для горно-обогатительных предприятий (аглофабрик) [9-10] учитываются следующие показатели:

- месячный объем производства, тыс. т;
- средний состав сырья (шихты) в течение месяца;
- средние показатели качества продукции (агломерата).

Выбор значимых факторов производится на основании матрицы парных коэффициентов корреляции технологических и энергетических показателей (табл. 1). Здесь следует отметить тесную связь расхода электроэнергии с производительностью  $Q_{агл}$  ( $r=0,41-0,68$ ) и показателями качества сырья  $Тонк.к-т$  ( $r=0,28-0,39$ ), отражающими обобщенные количественные и качественные характеристики процесса.

Исходя из этого для описания процессов электропотребления предложены математические модели следующего вида:

– однофакторная

$$W = 27,19 \cdot Q_{агл} + 3169000 \quad (R^2 = 0,864; \delta_{ср.кв} = 9,09\%); \quad (3)$$

– многофакторная

$$W = 36,16 \cdot Q_{агл} - 30080 \cdot Тонк.к - 4789 \cdot Возврат + 13170 \cdot Флюс - 1384000 \cdot Топливо + 9123000 \quad (R^2 = 0,91; \delta_{ср.кв} = 3,69\%). \quad (4)$$

Последняя имеет значительно более высокую точность и, в принципе, может быть использована для нормирования и прогнозирования энергозатрат. Однако проблемы с практическим применением могут быть обусловлены неопределенностью технико-экономических и технологических показателей в различных нестационарных производственных условиях, отличающихся от нормального установившегося хода технологического процесса. Экстраполяция классических регрессионных моделей за пределы конкретных интервалов варьирования факторов, как правило, невозможна, поскольку неизвестно действительны ли в новой области полученные ранее закономерности.

В теории автоматического управления для решения подобных задач широко используется математический аппарат нечеткой логики (*fuzzy-logic*), который позволяет описывать степень неопределенности данных в виде обобщенной функции принадлежности [11-12]. А поскольку в заведомо ненормальных режимах неопределенность данных выше, чем при нормальной работе, мерой нечеткости можно считать величину отклонения электропотребления от среднего значения (рис. 3).

Для построения нечеткой регрессионной модели электропотребления

$$\tilde{y} = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 x_1 + \tilde{a}_2 x_2 + \dots + \tilde{a}_n x_n \quad (5)$$

необходимо сгенерировать функцию принадлежности в виде  $\alpha$  – уровней множеств коэффициентов  $\tilde{a}_i (i=0;n)$ , удовлетворяющих условию минимума отклонения расчетных нечетких значений выходного параметра  $\tilde{y}_i$  от его исходных (выборочных) нечетких значений:

$$\sum_{i=1}^N (y_i^{\alpha_j} - \tilde{y}_i^{\alpha_j})^2 \rightarrow \min, \quad j = \overline{1, p}, \quad (6)$$

где  $\alpha: \{ \alpha_0=0, \alpha_1, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_p=1 \}$  — уровни значимости выбранной нечеткой функции принадлежности.

Форма представленных на рис. 3 кривых позволяет не использовать в расчетах сложных аналитических функций принадлежности, а обойтись всего тремя характерными уровнями значимости:  $\alpha=0,5; 0,8; 1$ .

Для каждого такого уровня уравнение регрессии (5) можно записать в виде системы:

$$\begin{cases} y^{\alpha_0} = a_0^{\alpha_0} + a_1^{\alpha_0} x_1 + a_2^{\alpha_0} x_2 + \dots + a_n^{\alpha_0} x_n, \\ y^{\alpha_1} = a_0^{\alpha_1} + a_1^{\alpha_1} x_1 + a_2^{\alpha_1} x_2 + \dots + a_n^{\alpha_1} x_n, \\ \dots \\ y^{\alpha_p} = a_0^{\alpha_p} + a_1^{\alpha_p} x_1 + a_2^{\alpha_p} x_2 + \dots + a_n^{\alpha_p} x_n, \end{cases} \quad (7)$$

где каждая строка аналогична классическим регрессионным моделям.

Для выбранных уровней задаем нечеткие значения функции отклика (расхода электроэнергии) таким образом, чтобы в нормальном (исследуемом) режиме разброс был наименьшим, а по мере отклонения от нормы – увеличивался:

около 6840 = 0,5\6200 + 0,8\6520 + 1\6840 + 0,8\7160 + 0,5\7480;  
 около 8640 = 0,5\8000 + 0,8\8320 + 1\8640 + 0,8\8960 + 0,5\9280;  
 около 11520 = 0,5\10960 + 0,8\11240 + 1\11520 + 0,8\11800 + 0,5\12080;  
 около 12960 = 0,5\12680 + 0,8\12820 + 1\12960 + 0,8\13100 + 0,5\13240  
 и т.д.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате серии процедур регрессионного анализа на базе этих данных были рассчитаны параметры нечеткой модели электропотребления, представленные в табл. 2.

Преимущества полученной нечеткой модели наглядно проявляются при реализации процесса оперативного управления [13-16], особенно в условиях противоречивых критериев оптимальности — одновременно увеличить объем выпуска продукции, её качество и снизить затраты:

$$\sum_{k=1}^M \omega_{i,k} f_{i,k}(x) \rightarrow \max, \quad i = \overline{1, N}, \quad (8)$$

где весовые коэффициенты  $\omega_{i,j}$  указывают степень важности каждого из критериев управления.

Для удобства оператора нечеткие функции и ограничения в оптимизационной задаче формируются словесно, в виде лингвистических конструкций, например: «Допустимо, чтобы  $H_1$  было не меньше, чем  $c_1$  и желательно, чтобы не меньше, чем  $c_2$ ». Этой фразе можно поставить в соответствие нечеткое множество с функцией принадлежности:

$$\mu_1(H_1) = \begin{cases} 0, & \text{если } H_1 \leq c_1; \\ \frac{H_1 - c_1}{c_2 - c_1}, & \text{если } c_1 \leq H_1 \leq c_2; \\ 1, & \text{если } H_1 \geq c_2, \end{cases} \quad (9)$$

где  $c_1 = \text{const}$  и  $c_2 = \text{const}$ .

Как показано выше, каждому нечеткому параметру ставится в соответствие своя функция принадлежности  $\mu_k(H_k)$ , которые в совокупности формируют для отдельных критериев управления (производительность, качество и затраты) обобщенную нечеткую функцию полезности:

$$v(H, \omega) = v(\mu_0(H_0), \dots, \mu_M(H_M), \omega_0, \dots, \omega_M). \quad (10)$$

Весовые коэффициенты  $\omega_k$  в задаче (8) определяются методом экспертных оценок — путем попарного сравнения полученных промежуточных вариантов с помощью нечетких лингвистических характеристик-термов вида: «эквивалентно», «несколько лучше (хуже)», «значительно лучше (хуже)», «строго лучше (хуже)».

Каждой такой метке соответствует функция принадлежности  $\pi_r(r)$ :

$$\pi_1(r) = \begin{cases} 1 - 25r^2, & \text{если } |r| \leq 0,2; \\ 0, & \text{если } |r| \geq 0,2; \end{cases}$$

$$\pi_2(r) = \begin{cases} 1 - 25(r - 0,3)^2, & \text{если } 0,1 \leq |r| \leq 0,5; \\ 0, & \text{если } |r| \leq 0,1 \text{ и } |r| \geq 0,5; \end{cases} \quad (11)$$

и т.д.,

где  $r = v(\mu(H_1), \omega) - v(\mu(H_2), \omega)$ ;  $H_1, H_2$  – допустимые значения критериев управления.

Если производится  $L$  сравнений, то получим  $L$  функций принадлежности, а результирующее оптимально-компромиссное решение определяется на пересечении этих функций:

$$\omega^* = \max_{\omega} \pi(\omega) \quad (12)$$

относительно каждого из  $m$  критериев управления.

Алгоритм оперативного управления состоит из четырех шагов:

1. Формирование начальных нечетких управляющих сигналов  $\omega_{i,j}^0$ .
2. Решение локальных задач оптимизации (9), где нечеткие множества  $\tilde{F}_{k,i}$  дискретизированы на несколько  $\alpha$ -уровней, исходя из вида функции  $\mu_r$ .
3. Поиск центрального оптимально-компромиссного решения (12) и определение координирующих сигналов  $\tilde{\omega}_{i,j}$ .
4. Предоставление результатов расчета эксперту-оператору (лицу, принимающему решение).

Если результат признан удовлетворительным, процедура заканчивается, и значения нечетких координирующих сигналов  $\tilde{\omega}_{i,j}$  подаются на исполнительные механизмы. В противном случае оператор, через лингвистические терм-команды, задает новые желаемые значения критериев управления и осуществляет возврат к шагу №2.

Покажем пример решения задачи оперативного управления для нескольких агломерационных машин, являющихся фрагментом технологической схемы аглофабрики:

$$\tilde{\omega}_{i,1} \tilde{f}_{i,1}(x, z) + \tilde{\omega}_{i,2} \tilde{f}_{i,2}(x, z) + \tilde{\omega}_{i,3} \tilde{f}_{i,3}(x, z) \rightarrow \max, \quad x \in X, \quad (13)$$

где  $x$  – вектор управляемых переменных (технологический режим);  $z$  – вектор неуправляемых переменных (состав сырья).

Выходные параметры обозначим тремя нечеткими переменными:

$\tilde{f}_{i,1}$  – производительность  $i$ -й агломашины, т/ч или т/смен;  
 $\tilde{f}_{i,2}$  – обобщенный показатель качества агломерата  $i$ -й агломашины (по содержанию железа, %);  
 $\tilde{f}_{i,3}$  – электропотребление  $i$ -й агломашины, кВт·ч.

Для их описания используем регрессионные уравнения с нечеткими коэффициентами вида

$$Q_{\text{агл}}: \tilde{f}_{i,k}(x_{i,j}, z_{i,j}) = \langle \tilde{a}_{i,k}, x \rangle + \langle \tilde{b}_{i,k}, z \rangle$$

и лингвистические терм-множества

$$\tilde{f}_{i,j} := \{\text{мало, норма, много}\}.$$

В качестве целевой функции верхнего уровня примем укрупненные экономические показатели производства:

$$\Phi_0 = \sum_i c_{i,1} \cdot f_{i,1} - \sum_i c_{i,3} \cdot f_{i,3} \rightarrow \max,$$

где  $c_{i,1}$  – отпускная цена готовой продукции (агломерата), руб./т;  $c_{i,3}$  – цена электрической энергии, руб./кВт·ч.

Для аглофабрики, имеющей в своем составе  $n$  агломашин, последнее выражение преобразуется к эквивалентной задаче в пространстве нечетких координирующих сигналов:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 f_{i,j} \cdot \tilde{\omega}_{i,j} \rightarrow \max. \quad (14)$$

Для описания этой задачи на основании экспертных оценок технологического персонала составлена нечеткая переходная таблица, которая связывает лингвистические и числовые значения координирующих сигналов:

1. Производительность, т:	
«очень низкая»	150 – 350
«низкая»	350 – 550
«средняя»	550 – 650
«высокая»	650 – 850
«очень высокая»	850 – 1100
2. Качество агломерата, % Fe:	
«очень низкое»	51 – 53
«низкое»	53 – 55
«среднее»	55 – 56
«высокое»	56 – 58
«очень высокое»	58 – 60
3. Расход электроэнергии, кВт·ч:	
«очень низкий»	6000 – 9500
«низкий»	9500 – 12500
«средний»	12500 – 13000
«высокий»	13000 – 15000
«очень высокий»	15000 – 18000

После решения и анализа  $n$  локальных задач нечеткой оптимизации управляющий центр может выбрать соответствующую управляющую лингвистическую команду: «увеличить», «уменьшить» или «оставить», как это показано в табл. 3, тем самым изменяя приоритеты управления в зависимости от текущей ситуации на производстве.

Таблица 1

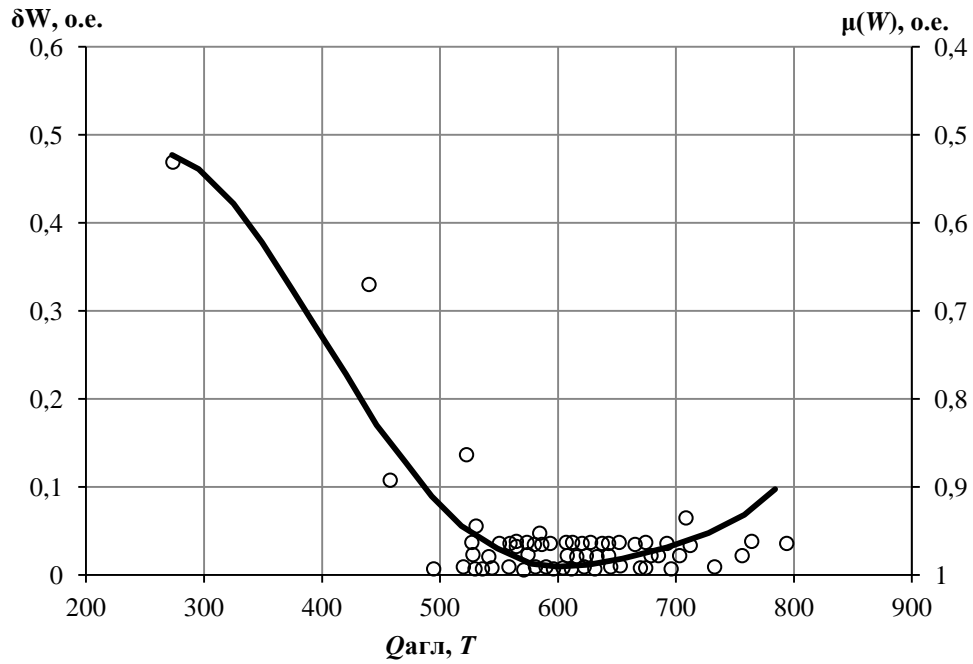
Матрица парных коэффициентов корреляции для энергетических и технологических показателей аглофабрики

	Qагл	Тонк.к	Возврат	Флюсы	Тв,топл	Fe	FeO	Осн-ть	Мелочь
Q агл	1								
Тонк. к-т	0,848	1							
Возврат	0,553	0,688	1						
Флюсы	0,523	0,439	0,155	1					
Тв,топл	0,164	0,207	0,217	0,381	1				
Fe	0,503	0,740	0,582	0,165	0,159	1			
FeO	-0,440	-0,228	-0,379	-0,621	-0,374	-4E-2	1		
Осн-ть	0,780	0,739	0,545	0,864	0,418	0,376	-0,669	1	
Мелочь	-0,710	-0,779	-0,675	-0,481	-0,535	-0,650	0,330	-0,705	1
W (кВт·ч)	<b>0,679</b>	<b>0,386</b>	0,149	-0,327	-0,292	0,249	0,276	0,043	-0,112

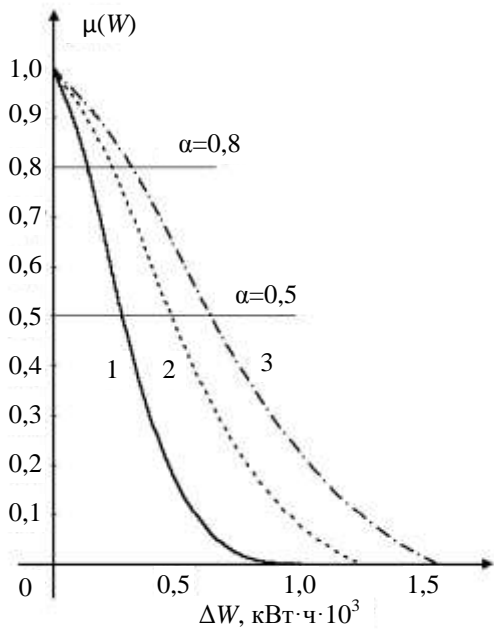
Таблица 2

Параметры нечеткой модели электропотребления для агломашины

Коэф-т	Переменная	Значения для уровней принадлежности $\alpha$				
		- 0,5	- 0,8	1	0,8	0,5
$a_0$	–	-7756	-7050	-6343	-5637	-4931
$a_1$	$H$	1,045	1,015	0,9847	0,9543	0,924
$a_2$	$Q_{\text{агл}}$	2,598	2,474	2,349	2,225	2,101
$a_3$	$t_{\text{зак}}$	3,237	3,101	2,966	2,831	2,695
$a_4$	$V_{\text{л}}$	946,4	934,2	922,0	909,8	897,6
$a_5$	Тонк. к-т	42,04	41,86	41,69	41,51	41,33



a



Отклонение производительности от нормального хода процесса:

1 -  $Q_{агл} \leq 450$  т/смен.

2 -  $450 \leq Q_{агл} \leq 550$  т/смен.

3 -  $\Delta Q_{агл} > 600$  т/смен.

b

Рис. 3. Функции принадлежности для нечетких значений электропотребления: а – экспериментальная зависимость дисперсии электропотребления от режима работы (производительности); б – расчетные функции принадлежности, аппроксимированные для трех уровней принадлежности  $\alpha=0,5; 0,8; 1$

Таблица 3

Функции принадлежности нечетких координирующих сигналов

Терм-множества	Координирующий сигнал	Лингвистические команды	Диапазон изменения $\tilde{\omega}_{i,j}$ , отн.ед.
«мало»	$\tilde{\omega}_{i,1}$	«увеличить»	0,393 – 0,408
«норма»		«оставить»	0,364 – 0,393
«много»		«уменьшить»	0,349 – 0,364
...	...	...	...
«мало»	$\tilde{\omega}_{i,3}$	«увеличить»	0,636 – 0,651
«норма»		«оставить»	0,607 – 0,636
«много»		«уменьшить»	0,592 – 0,607

Численные значения координирующих сигналов в переходной таблице представляют собой выраженные в относительных единицах компоненты оптимально-компромиссного режима  $\tilde{\omega}_{i,j}$ , соответствующие задаче (13).

По данным базового 2002 года принимаем обобщенные экономические показатели:  $c_{i,1}=98,3$  руб./т;  $c_{i,3}=0,31$  руб./кВт·ч.

На нулевой итерации (в существующем режиме) выходные значения показателей нижнего уровня (производительность и электропотребление) составляли:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{i,1} &= 605,86 \text{ т/смен.} := \text{«средний»}; \\ \tilde{f}_{i,3} &= 12870 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.} := \text{«средний»}; \\ Q_{a2l} &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,1} = 2423,44 \text{ т/смен.}; \\ W &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,3} = 51480 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.} \end{aligned}$$

При этом значение целевой функции центра (экономический эффект):  $\Phi_0=254071$  руб./смен.

Оператор, имея в своем распоряжении альтернативные лингвистические команды (см. табл. 3), корректирует ход технологического процесса, например в сторону увеличения производительности.

В результате предварительного решения задачи центра определяют численные значения координирующих сигналов:

$$\tilde{\omega}_{i,1} = 0,408; \quad \tilde{\omega}_{i,3} = 0,592,$$

и после повторного пересчета программа-советчик диспетчера выдает новые значения:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{i,1} &= 696,94 \text{ т/смен.} := \text{«высокий»}; \\ \tilde{f}_{i,3} &= 11268 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.} := \text{«низкий»}; \\ Q_{a2l} &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,1} = 2787,75 \text{ т/смен.}; \\ W &= \sum_{i=1}^n \tilde{f}_{i,3} = 45072 \text{ кВт} \cdot \text{ч/смен.} \end{aligned}$$

Соответственно оптимальное значение целевой функции центра  $\Phi_1=260063,7$  руб./смен. Таким образом, сменная производительность аглофабрики увеличится на 364 т, электропотребление сократится на 6408 кВт·ч, а прибыль возрастет на 5992 руб. в смену.

Если эти показатели не устраивают оператора (например, из-за превышения лимитов на энергоресурсы), он корректирует управляющие команды и вновь направляет их на элементы нижнего уровня. В итоге, активный диалог человека и ЭВМ позволяет достигнуть наиболее реального компромиссного решения, не ограниченного жесткими логическими альтернативами обычных алгоритмов управления. Это облегчает работу и расширяет возможности диспетчера-оператора, который в своей деятельности может руководствоваться не только жесткими альтернативами, но и конкретной ситуацией на производстве, прибегая при этом к помощи своей интуиции и опыта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены актуальные задачи анализа и управления режимами электропотребления в условиях энергоемкого горно-металлургического производства путем установления закономерностей электропотребления основных переделов, разработки научно-методических вопросов прогнозирования и оптимизации расхода электроэнергии, направленных на снижение энергозатрат и повышение оперативности и точности расчетов показателей электропотребления.

Основные результаты проведенных исследований:

1. Установлены характерные режимные особенности и ключевые факторы, определяющие электропотребление энергоемких агрегатов и цехов. Выбран адекватный аналитический и математический аппарат для описания различных уровней управления энергохозяйством крупного многономенклатурного производства.

2. Подробно рассмотрены достоинства и недостатки существующих методик теоретического (аналитического) описания процессов энергопотребления. Предложены варианты повышения их эффективности и адаптации к современным технико-экономическим задачам.

3. Для моделирования технологических процессов в меняющихся условиях производства с неполной исходной информацией предложено использовать математический аппарат теории нечетких множеств, позволяющий более корректно экстраполировать полученные модели при оптимизационных расчетах и оперативном управлении. Сформулированы основные критерии управления и предложена методика определения оптимально-компромиссного технологического режима.

3. Для реализации математических моделей на практике разработаны алгоритмы оперативного управления технологическим процессом, базирующейся на теории нечеткой многоцелевой оптимизации и принципе адаптивного управления производством посредством активного диалога технолога-оператора и ЭВМ.

Реализация результатов работы, проведенная на базе ОАО «ММК», позволила повысить эффективность управления производством и на 7-10% сократить удельный расход электроэнергии в аглодоменном и прокатном переделах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение и управление энергопотреблением. Теория и практика: монография / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец, А.Н. Шеметов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 422 с.
2. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т.14. №1. С.5-13.
3. Alfares H.K., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. International Journal of Systems Science. 2002, vol. 33, no.1, pp. 23-34.
4. Filik U.B., Gerek O.N., Kurban M. Hourly Forecasting of Long Term Electric Energy Demand Using a Novel Modeling Approach. Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC). 2009, pp.115-118.

5. Ghods L., Kalantar M. Different Methods of Long-Term Electric Load Demand Forecasting; A Comprehensive Review. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. 2011, vol.7, pp. 249-259.
6. Paoletti S., Casini M., Giannitrapani A., Facchini A., Garulli A., Vicino A. Load forecasting for active distribution networks. 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). 2011, pp.1-6.
7. Гофман И.В., Госпитальник Г.Л. Организация и планирование энергохозяйств промышленных предприятий. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. 439 с.
8. Авилов-Карнаухов Б.Н. Электроэнергетические расчеты для угольных шахт. М.: Недра, 1969. 103 с.
9. Белых Б.П., Свердель И.С., Олейников В.К. Энергетические характеристики и электропотребление на горнорудных предприятиях. М.: Недра, 1971. 248 с.
10. Шеметов А.Н., Олейников В.К., Махнев А.М. К вопросу определения удельных норм электропотребления в металлургическом производстве // Электротехнические системы и комплексы. 2003. №9. С. 142-149.
11. Wayne G.H., Possibility Theory and Fuzzy Sets: Theory of Applications to Energy and Environmental Policy Analysis. The J. Energy and Development. 1991, vol.17, no.1, pp.47-64.
12. Van Geert E., Glende I., Halberg N. et al. Methods for Planning under Uncertainty. Towards Flexibility in Power System Development. Electra. 1995, no.161, pp.143-163.
13. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
14. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 200 с.
15. Шеметов А.Н., Олейников В.К. Управление электропотреблением в агломерационном производстве при нечеткой исходной информации // Электрика. 2003. №5. С.24-27.
16. Шеметов А.Н., Муссиров Е.К., Шулепов П.А. Проблемы повышения адекватности учета электроэнергии в условиях ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» // Электротехнические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 199-203.

Поступила в редакцию 14 июня 2016 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### MODERN PROBLEMS AND PROSPECTS OF MODEL FORMING OF ENERGY MANAGEMENT AT ENTERPRISES OF MINING AND METALLURGICAL COMPLEX

Andrey N. Shemetov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: shemetov-a-n@yandex.ru.

Svetlana V. Fedorova

Ph.D. (Eng.), head of Department of Energy, Technical University of UMMC, Verkhnyaya Pyshma, Sverdlovsk region, Russia. E-mail: s.fedorova@ugmk.com.

Sergey V. Kuznetsov

Graduate student, Technical University of UMMC, Serov, Sverdlovsk region, Russia. E-mail: kordinator30@yandex.ru.

Roman N. Lyapin

Graduate student, Technical University of UMMC, Zmeinogorsk, Altai Krai, Russia. E-mail: lyapinrn@sib-pm.ru.

The article considers scientific and methodological basis of the energy management of mining and metallurgical enterprises from the formation of mathematical models of energy consumption to the operational management of power modes. It reviews domestic and foreign experience in theoretical optimization of technological modes and energy saving. Main features of the energy consumption of mining and metallurgical enterprises were outlined. Original adaptive models were offered to control energy-intensive consumers of electricity; the offered models are based on the theory of fuzzy sets.

**Keywords:** Power utilities, power consumption, dispatching control, optimization, mining and metallurgical complex.

#### REFERENCES

1. Nikiforov G.V., Oleynikov V.K., Zaslavets B.I., Shemetov A.N. *Energoberezhenie i upravlenie energopotrebleniem* [Energy Saving and Energy Management. Theory and Practical Training]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 422 p.
2. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. et al. Prediction Procedure of Power Consumption at Industrial Enterprise. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Proceedings of the South-Ural State University. Series: Information technology, control, radio electronics], 2014, vol.14, no.1, pp.5-13. (In Russian)
3. Alfares H.K., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *International Journal of Systems Science*. 2002, vol. 33, no.1, pp. 23-34.
4. Filik U.B., Gerek O.N., Kurban M. Hourly Forecasting of Long Term Electric Energy Demand Using a Novel Modeling Approach. *Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC)*. 2009, pp.115-118.
5. Ghods L., Kalantar M. Different Methods of Long-Term Electric Load Demand Forecasting; A Comprehensive Review. Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. 2011, vol.7, pp. 249-259.
6. Paoletti S., Casini M., Giannitrapani A., Facchini A., Garulli A., Vicino A. Load forecasting for active distribution networks. 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). 2011, pp.1-6.
7. Gofman I.V., Gospital'nik G.L. *Organizatsiya i planirovanie*

- energohozyaystv promyshlennykh predpriyatiy* [Organization and Planning of Power Facilities at Industrial Enterprises]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1954. 439 p.
8. Avilov-Karnaukhov B.N. *Elektroenergeticheskie raschety dlya ugolnykh shakht* [Calculation of Power Consumption for Coal Mines]. Moscow, Mineral resources Publ., 1969. 103 p.
  9. Belykh B.P., Sverdel' I.S., Oleynikov V.K. *Energeticheslie kharakteristiki i elektropotreblenie na gornorudnykh predpriyatiyakh* [Energy Characteristics and Energy Consumption at Mining Enterprises]. Moscow, Mineral resources Publ., 1971. 248 p.
  10. Shemetov A.N., Oleynikov V.K., Makhnev A.M. The Issue of Calculation of Rated Power Consumption in Metallurgy. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2003, no.9, pp. 142-149. (In Russian)
  11. Wayne G.H., Possibility Theory and Fuzzy Sets: Theory of Applications to Energy and Environmental Policy Analysis. *The J. Energy and Development*. 1991, vol.17, no.1, pp.47-64.
  12. Van Geert E., Glende I., Halberg N. et al. Methods for Planning under Uncertainty. Towards Flexibility in Power System Development. *Electra*. 1995, no.161, pp.143-163.
  13. Aliev R.A., Tserkovnyy A.E., Mamedova G.A. *Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoy iskhodnoy informatsii* [Production Management in Terms of Indefinite Source Information]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 240 p.
  14. Demenkov N.P. *Nechetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh* [Fuzzy Control in Engineering Systems]. Moscow, Publishing center of Bauman MSTU, 2005. 200 p.
  15. Shemetov A.N., Oleynikov V.K. Power Consumption Control at Sintering Plants under Fuzzy Source Information Conditions. *Elektrika* [Electrical engineering], 2003, no.5, pp.24-27.
  16. Shemetov A.N., Mussirov E.K., Shulepov P.A. The problem of electric power metering performance in FSBEI HPE Nosov Magnitogorsk State Technical University. *Systems and Complexes*, 2012, no. 20, pp. 199-203. (In Russian)

Шеметов А.Н., Федорова С.В., Кузнецов С.В., Ляпин Р.Н. Современные проблемы и перспективы формирования модели управления энергохозяйством на предприятиях горно-металлургического комплекса // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.41-48. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-41-48

Shemetov A.N., Fedorova S.V., Kuznetsov S.V., Lyapin R.N. Modern Problems and Prospects of Model Forming of Energy Management at Enterprises of Mining and Metallurgical Complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 41-48. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-41-48