

## УПРЕЖДАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЙ

Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова

## ENERGY EFFICIENCY ANTICIPATORY CONTROL OF AN ENTERPRISE

L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova

Рассматривается многоуровневая задача снижения энергетических издержек предприятий на основе упреждающего управления. Предложены гибкие стратегии упреждающего управления энергетической эффективностью на основе решения противоречивых задач оптимизации показателей энергетической эффективности методом ограничений.

*Ключевые слова:* энергетическая эффективность, упреждающее управление.

Multilevel problem of decreasing energy expenses of an enterprise on the basis of anticipatory control is considered. Flexible strategy for energy efficiency anticipatory control on the basis of contradictory problems solution to optimize energy efficiency figures by restriction method is proposed.

*Keywords:* energy efficiency, anticipatory control.

### Введение

Одной из базовых задач развития промышленного производства в настоящее время является повышение эффективности использования энергетических ресурсов, что обеспечивает не только снижение себестоимости продукции и рост ее конкурентоспособности, но и служит также основным фактором снижения экологической нагрузки на окружающую среду, и, следовательно, обеспечения устойчивого развития предприятия.

Для повышения эффективности использования энергетических ресурсов целесообразно рассматривать многоуровневую постановку задачи снижения энергетических издержек предприятий на основе упреждающего управления при решении противоречивых задач оптимизации показателей энергетической эффективности методом ограничений.

Принципиальные идеи, связанные с методом ограничений, развивались академиком В.М. Глушковым в виде концепции «системной оптимизации». На этой основе метод ограничений получил дальнейшее развитие в работах В.С. Михалевича, В.Л. Волковича применительно к задачам исследования и проектирования сложных систем управ-

ления. Математический аппарат нестационарных процессов математического программирования, ориентированный на решение задач в противоречивой постановке, получил развитие в работах И.И. Еремина и В.Д. Мазурова. Применительно к задаче распознавания образов здесь следует отметить работы К. Эйблау и Д. Кэйлора, Л.А. Расстригина, Р.Х. Эренштейна. Для адаптивных систем управления метод ограничений на основе решения рекуррентных целевых неравенств развивался в работах В. А. Якубовича.

### Многоуровневая постановка задачи снижения энергетических издержек

Управление энергетической эффективностью производства на предприятии необходимо осуществлять на основе *системного подхода* с использованием *современных интеллектуальных технологий*.

Многоуровневая постановка задачи снижения энергетических издержек предприятия представлена на рис. 1.

В основе управления энергетической эффективностью производства лежит проведение на постоянной основе *энергетической экспертизы*

---

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

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

---

**Lev Sergeevich Kazarinov** – Doctor of Science (Engineering), professor, dean of Computer Technologies, Control and Radioelectronics Faculty of South Ural State University; kazarinov@ait.susu.ac.ru

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

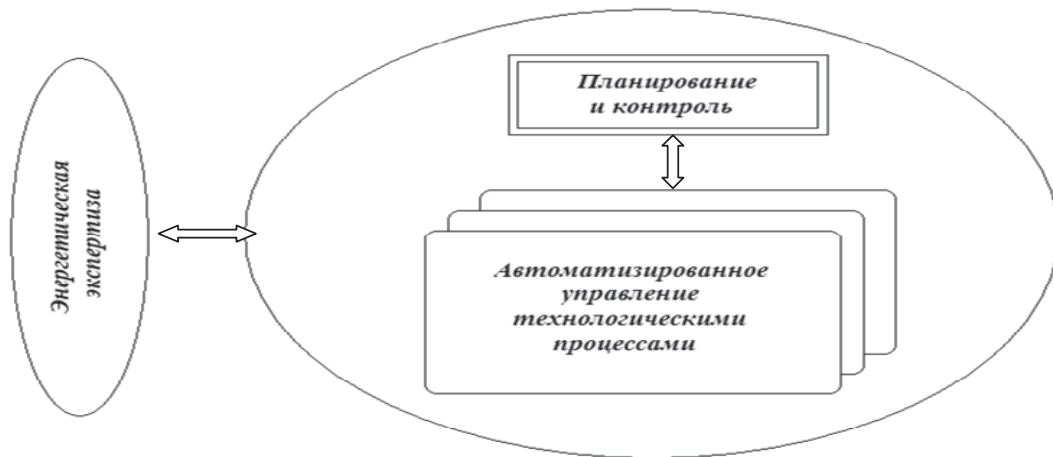


Рис. 1. Структура управления энергетической эффективностью производства [1]

технологических и производственных процессов. Задачами энергетической экспертизы являются:

- проведение энергетического обследования производства с целью выявления мест нерационального использования и прямых потерь ресурсов;
- построение энергетического баланса производства;
- оценка энергоемкости локальных производственных процессов и всего производства в целом;
- факторный анализ энергетических характеристик производственных процессов;
- выявление резервов снижения энергоемкости как локальных производственных процессов, так и всего производства в целом;
- составление перечня энергосберегающих мероприятий и формирование программ энергосбережения.

На уровне *планирования и контроля* для определенного периода определяются плановые задания по энергоемкости производственных участков, и в дальнейшем за данный период осуществляется контроль их выполнения. Назначение обоснованных плановых заданий по энергоемкости и оценка их выполнения осуществляется исходя из объективного анализа возможностей технологического оборудования и особенностей его функционирования в существующих производственных условиях. Данные сведения должны основываться

на *результатах энергетической экспертизы* технологических и производственных процессов.

Генеральной задачей *автоматизированного управления технологическими процессами* является обеспечение их производственной эффективности, неотъемлемой составляющей которой является энергетическая эффективность. Показатели энергетической эффективности технологических процессов существенно зависят от режимов работы технологического оборудования. Поэтому задание режимов работы технологического оборудования должно использовать результаты энергетической экспертизы, наладки режимов технологических процессов, обеспечивающих *оптимальное ведение режимов* по показателям энергетической эффективности.

Объектом автоматизированного управления является *автоматически регулируемый технологический процесс (САР-ТП)*, состоящий из собственно технологического процесса (*ТП*), локальных систем автоматического (*САР*) и ручного регулирования его режимных параметров. Типовая структура технологического комплекса *САР-ТП* приведена на рис. 2. Здесь используются следующие обозначения:  $y_{2,0}$  – вектор заданий оптимальных режимов;  $h$  – вектор заданий ручного управления;  $u$  – вектор управляющих воздействий автоматического регулирования;  $e$  – вектор ошибок

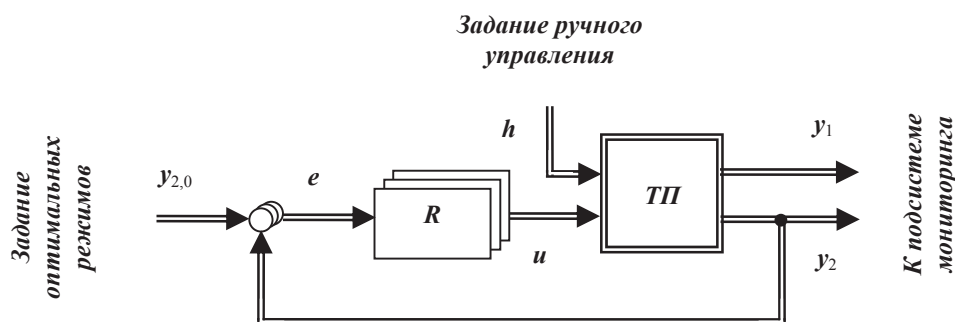


Рис. 2. Общая структура технологического комплекса САР-ТП

автоматического регулирования;  $R$  – блок автоматических регуляторов;  $y_1, y_2$  – вектора выходных сигналов датчиков режимных параметров собственно технологического процесса и подсистемы автоматического регулирования.

Общая схема автоматизированного управления технологическими процессами при оптимальном ведении режимов по показателям энергетической эффективности приводится на рис. 3.

Здесь управляющие воздействия на технологический комплекс *САР-ТП* поступают от блока формирования задания на управление (*ФЗУ*) и оперативно диспетчерского управления (*ОДУ*). Задание оптимальных режимов является одним из звеньев подсистемы автоматической оптимизации режимов технологического процесса, составными частями которой в общем случае являются блок выработки оптимальных корректирующих воздействий (*АО*), обеспечивающий достижение экстремума показателей эффективности, а также подсистема мониторинга режимных параметров и показателей эффективности процесса (*М-ТП*).

Ведение технологического процесса осуществляется на основе оперативно-диспетчерского управления *ОДУ*, необходимая информация для которого поступает от подсистемы мониторинга текущего состояния процесса *М-ТП*, и планового задания, поступающего от подсистемы планирования и контроля (*П и К*). Оперативно-диспетчерское управление осуществляется в ручном режиме. При этом, исходя из задания номинальных режимов (*ЗНР*), управляющие воздействия направляются непосредственно на технологический комплекс *САР-ТП* и блок формирования задания на управление *ФЗУ*.

Задание номинальных режимов (*ЗНР*) осуществляется на основе технологического регламента

процесса. Технологический регламент процесса составляется при его проектировании и в дальнейшем корректируется по результатам эксплуатации, регламентных испытаний и технологической экспертизы. Технологический регламент должен быть оптимизирован по критериям энергетической эффективности. В общем случае он зависит от режимных параметров технологического процесса. Поэтому при ведении технологического процесса задание номинальных режимов осуществляется с учетом текущего состояния процесса, информация о котором поступает от подсистемы мониторинга *М-ТП*, а также планового задания, поступающего от подсистемы планирования и контроля (*П и К*).

Одним из центральных звеньев системы управления эффективностью технологического процесса является подсистема мониторинга текущего состояния процесса *М-ТП*. Данная подсистема обеспечивает необходимой информацией все звенья выработки управляющих воздействий по достижению эффективности технологического процесса. Чтобы эффективно управлять, необходимо, прежде всего, «видеть» объект управления. Обеспечение полноты информационного «видения» технологического объекта управления является главной задачей подсистемы *М-ТП*.

#### Алгоритм построения оптимальной модели прогнозирования

Энергетические характеристики технологического оборудования определяют нижнюю достижимую границу потребления энергетических ресурсов, так как сверху эта граница фактически отсутствует – нерациональное потребление ресурсов может быть по объему произвольным. В связи с этим рассмотрим методику построения опти-

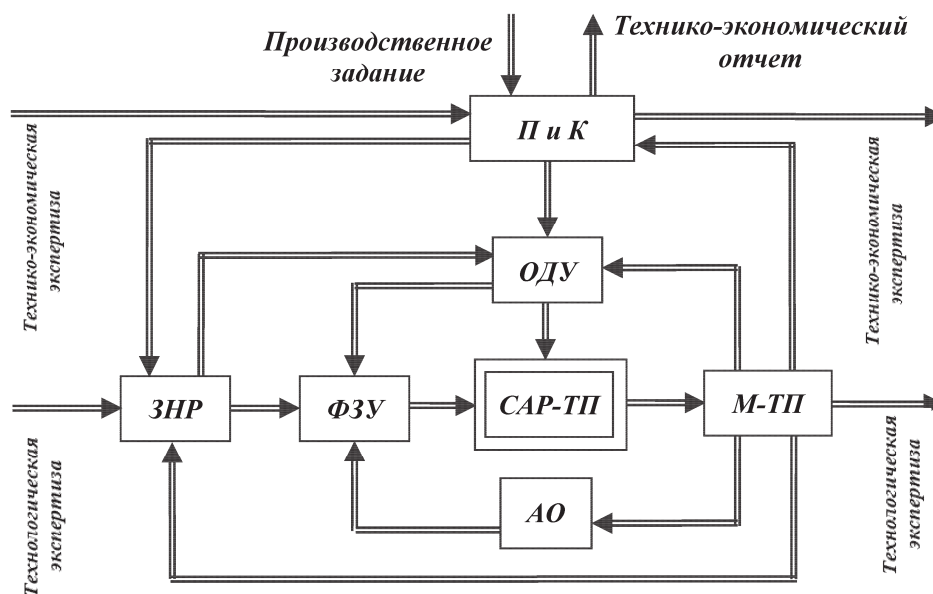


Рис. 3. Схема производственной системы управления эффективностью технологических процессов

**мальной модели прогнозирования** [2] потребления ресурсов, основанной на различных оценках ошибки прогнозирования в положительную или отрицательную сторону. Методику будем рассматривать для общего случая потребления покупного ресурса, к которым относятся, например, природный газ и электрическая энергия.

Общий вид прогнозной модели:

$$y = f[\mathbf{a}](\mathbf{x}), \quad (1)$$

где  $y$  – объем потребления ресурса;  $\mathbf{x}$  – вектор технологических факторов,  $\mathbf{a}$  – вектор структурных параметров прогнозирующих моделей.

Ошибка прогнозирования:

$$e_k = y_k - f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_k), \quad k \in I_n, \quad (2)$$

где  $k$  – индекс статистического наблюдения, принимающий значение из индексного множества  $I_n$ .

На рис. 4 представлен график штрафа, налагаемого в зависимости от цены ошибки прогнозирования потребления ресурса.

Если же прогноз завышен, то поставка ресурса будет избыточной, за что предприятию, естественно, тоже придется платить.

Суммарный штраф за неточный прогноз

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

где  $c_r$ ,  $c_{ш}$  – цена ресурса и величина штрафа соответственно,  $e_k^-$ ,  $e_k^+$  – отрицательные и положительные значения ошибки, определяемые выражением (2).

Ставится задача: определить оптимальное значение вектора неизвестных коэффициентов  $\mathbf{a}$  зависимости (1) по критерию минимума суммарного штрафа (3) за неточный прогноз. В общем случае данная задача относится к классу задач нелинейного программирования общего вида с недифференцируемым критерием многоэкстремального вида.

Ниже приводится метод решения поставленной задачи при упрощающих предположениях.

Предположим, что зависимость (1) имеет линейный характер:

$$y = \sum_{j=0}^n a_j x_j, \quad x_0 \equiv 1. \quad (4)$$

Решение задачи будем осуществлять на основе модифицированного критерия:

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

где  $s_r$ ,  $s_{ш}$  – некоторые весовые коэффициенты;  $e_k^-$ ,  $e_k^+$  – отрицательные и положительные значения ошибки соответственно,

$$e_k = y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk}. \quad (6)$$

Условие минимума критерия (5)

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = -s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) \left( y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} - s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) \left( y_k - \sum_{j=0}^n a_j x_{jk} \right) x_{ik} = 0, \quad (7)$$

где  $I(|e_k^-|)$ ,  $I(|e_k^+|)$  – характеристические функции, определяемые выражением

$$I(e) = \begin{cases} 1, & \text{при } e > 0, \\ 0, & \text{при } e \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Характеристические функции  $I(|e_k^-|)$ ,  $I(|e_k^+|)$

определяют вхождение соответствующих слагаемых в состав выражения критерия (3) в зависимости от знака ошибок (6) и удовлетворяют условию

$$I(|e_k^-|) \cdot I(|e_k^+|) = 0.$$

Соотношения (7) определяют систему алгебраических уравнений, которые на основе эквивалентных преобразований можно привести к каноническому виду:

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (9)$$

$$g_{ij} = s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) x_{ik} x_{jk} + s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) x_{ik} x_{jk},$$

$$d_i = s_r^2 \sum_k I(|e_k^-|) y_k x_{ik} + s_{ш}^2 \sum_k I(|e_k^+|) y_k x_{ik}.$$

При фиксированных значениях характеристических функций  $I(|e_k^-|)$ ,  $I(|e_k^+|)$  система уравне-

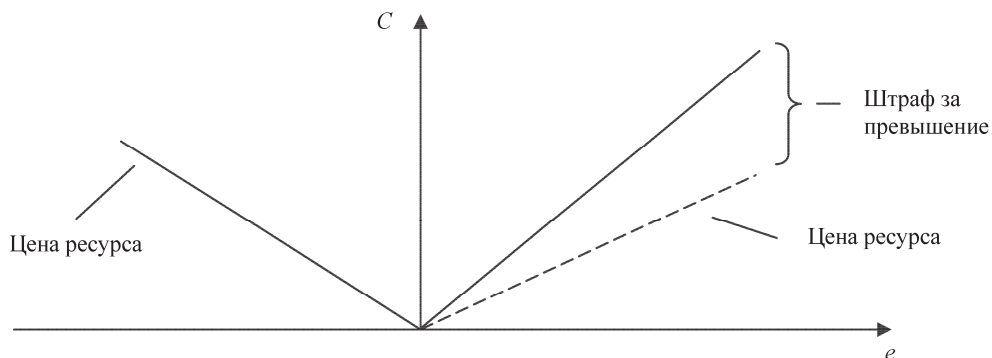


Рис. 4. Цена ошибки

ний (9) будет линейной и может быть решена известными методами. В результате для полученного решения значения характеристических функций  $I\left(\left|e_k^-\right|\right)$ ,  $I\left(\left|e_k^+\right|\right)$  могут быть пересчитаны. Дальнейшее решение нелинейной задачи осуществляется итерационно на основе последовательных решений системы линейных алгебраических уравнений (9) с последующим пересчетом значений характеристических функций. Описанный решающий процесс реализует метод наискорейшего спуска минимизации целевой функции (5). Если решающий процесс сходится, то он сходится к искомому решению.

В случае если описанный решающий процесс не сходится, то будет наблюдаться «хаотический» процесс пересчета значений характеристических функций. В этом случае необходимо использовать методы решения переборных задач. Таким методом может служить, например, генетический алгоритм в сочетании с методом фильтрующих ограничений.

В рамках рассматриваемого подхода модифицированный критерий (5) используется для выделения субоптимальных решений. Оценка же точности субоптимальных решений осуществляется на основе исходного критерия (3). Так как веса  $s_r$ ,  $s_{ш}$  в модифицированном критерии не определены, то на множестве субоптимальных решений можно построить зависимость

$$C = C(s_r, s_{ш}). \quad (10)$$

Окончательное решение находится на основе экстремальной задачи

$$\min_{\{s_r, s_{ш}\}} C(s_r, s_{ш}). \quad (11)$$

В общем случае линейная зависимость (4) может быть неадекватной для представления реальных свойств исследуемого технологического процесса. Это приводит к противоречивым постановкам решаемой задачи. Для решения подобных задач могут быть использованы подходы, основанные на процессах адаптации и самоорганизации моделей прогноза.

#### Общая схема решения задач методом ограничений

Метод ограничений представляет собой одно из перспективных направлений исследований, связанных с процессами адаптации и самоорганизации в автоматизированных системах управления.

Основную идею метода ограничений можно иллюстрировать следующим образом.

Предположим, ставится задача найти условный минимум показателя  $p_1(\mathbf{x})$  при ограничении на другой показатель  $p_2(\mathbf{x}) \leq p_{2, \text{доп}}$ . Типовой подход состоит в построении функции Лагранжа  $p_0(\mathbf{x}) = p_1(\mathbf{x}) + \lambda p_2(\mathbf{x})$ , где  $\lambda$  – неопределенный множитель Лагранжа. Решение находится на основе безусловной минимизации функции Лагранжа. При

этом неопределенный множитель Лагранжа определяется из условия удовлетворения решением заданного ограничения. Искомое решение лежит в области Парето – области неуплощаемых решений. Множитель Лагранжа определяет асимптоту, проведенную к области Парето в точке решения.

В случае сложной конфигурации области Парето рассматриваемая ситуация выбора решения значительно усложняется. В качестве иллюстрации на рис. 5 представлена область Парето, которая является несвязной и разделена на две подобласти  $G_1$ ,  $G_2$ .

Кроме того, область  $G_1$  имеет линейный участок  $A-C$ . В этом случае на основе метода Лагранжа нельзя выделить определенное решение. Здесь весь линейный участок  $A-C$  представляет собой множество оптимальных решений, так как функция Лагранжа на этом участке будет постоянной, хотя составляющие ее показатели могут менять свои значения. Решаемая задача имеет множество экстремумов. При этом в области  $G_1$  находятся локальные экстремумы, в то время как глобальный экстремум лежит в области  $G_2$ .

Решение для той же задачи, но на основе метода ограничений, находится путем решения соответствующих целевых неравенств:

– для экстремальной точки  $B$

$$\left. \begin{aligned} p_1(\mathbf{x}) &\leq p_{1,B}, \\ p_2(\mathbf{x}) &\leq p_{2,B}; \end{aligned} \right\}$$

– для экстремальной точки  $D$

$$\left. \begin{aligned} p_1(\mathbf{x}) &\leq p_{1,D}, \\ p_2(\mathbf{x}) &\leq p_{2,D}; \end{aligned} \right\}$$

Очевидно, что проблем, связанных с локализацией точек решения относительно области Парето, здесь не возникает. Все проблемы перемещаются в решение соответствующих систем целевых неравенств.

В этой связи необходимо отметить, что инженерные показатели качества технических систем не случайно формулируются в виде ограничений – технических условий. Ограничения позволяют точно определить требуемое качество системы, достижение же заданного качества – задача проектировщиков и эксплуатационного персонала. Более того, директивное повышение качественных показателей заставляет персонал искать пути улучшения качества систем, осуществлять поиск новых решений. С другой стороны, если технические условия выполняются с запасом, то внимание к этим показателям можно ослабить. В итоге производственные ресурсы сосредотачиваются на критических направлениях, что повышает эффективность решения поставленных задач.

Таким образом, постановка задач выбора решений и управления на основе метода ограничений может быть представлена в математической



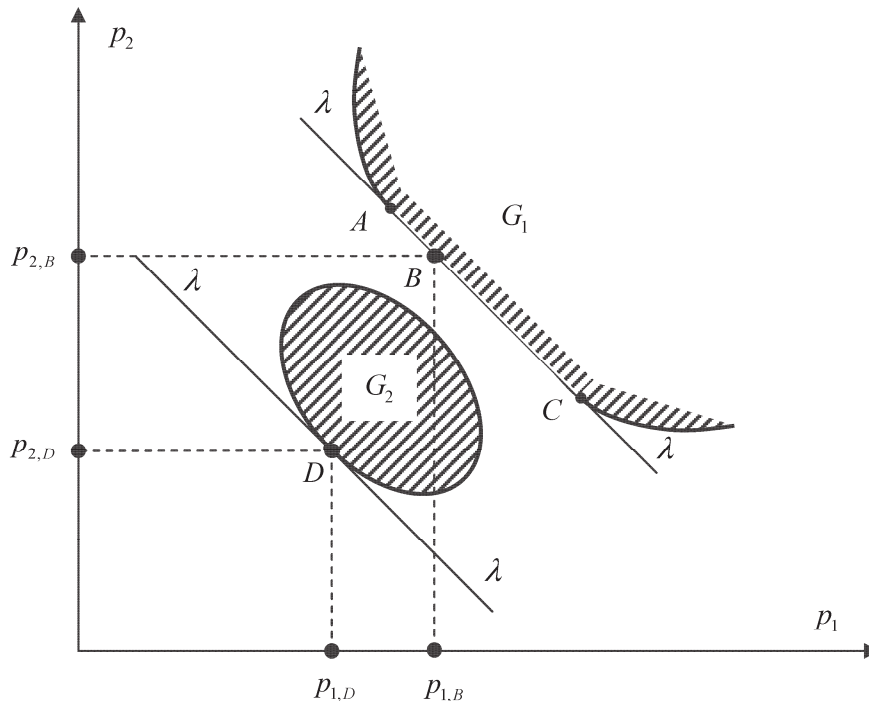


Рис. 5. Выбор решений методом ограничений при сложной конфигурации области Парето

форме как задача решения системы целевых неравенств:

$$y_i^- \leq y_i \leq y_i^+, \quad (12)$$

$$y_i = f_i(\mathbf{x}), \quad i \in I_{\text{нер}}. \quad (13)$$

Здесь неравенства (12) определяют условия задачи, представляемые как множества допустимых или желаемых значений координат  $y_i$  объекта управления. Сам объект управления описывается уравнениями связи (13). Целью решения задачи является нахождение допустимого значения  $\mathbf{x}_{\text{доп}}$  вектора управляемых координат  $\mathbf{x}$ , удовлетворяющего системе неравенств (12)–(13).

Если система неравенств (12)–(13) является совместной, то поставленная задача является разрешимой в смысле возможности нахождения допустимого решения  $\mathbf{x}_{\text{доп}}$ . В противном случае задача в обычном смысле решения не имеет. Постановка задачи (12)–(13) в этом случае считается противоречивой.

Выделим из неравенств (12) ограничения, которые существенно препятствуют решению поставленной задачи. С этой целью назначим неравенствам (12) определенные веса, которые отражают степень важности удовлетворения соответствующего ограничения:

$$\begin{aligned} y_i^- \leq y_i \leq y_i^+ : \alpha_i, \\ \alpha_i \geq 0, \quad \sum_{i \in I_{\text{нер}}} \alpha_i = 1, \quad i \in I_{\text{нер}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\alpha_i$  – веса неравенств,  $I_{\text{нер}}$  – индексное множество системы неравенств (14).

Введем показатель совместности неравенств (14)

$$C = \sum_{i \in I_{\text{нер}}} \alpha_i \mu_i, \quad (15)$$

где  $\mu_i$  – характеристическая функция  $i$ -го неравенства ( $\mu_i = 1$ , если неравенство  $y_i^- \leq y_i \leq y_i^+$  выполняется, и  $\mu_i = 0$  в противном случае).

В силу соотношений (13) показатель совместности (14) определен на векторе  $\mathbf{x}$ :

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I_{\text{нер}}} \alpha_i \mu_i(\mathbf{x}). \quad (16)$$

На основе введенного показателя (16) решение системы взвешенных неравенств (12)–(13) можно представить как решение экстремальной задачи [3–6].

$$\max_{(\mathbf{x})} C(\mathbf{x}). \quad (17)$$

Если система взвешенных неравенств (12)–(13) совместна, то

$$\max_{(\mathbf{x})} C(\mathbf{x}) = C(\mathbf{x}_{\text{доп}}) = 1, \quad (18)$$

при этом веса неравенств на решение не влияют.

Иначе обстоит дело при несовместной системе неравенств. В этом случае решение экстремальной задачи (17) выделяет максимально-совместную подсистему неравенств

$$y_i^- \leq y_i \leq y_i^+ : \alpha_i, \quad i \in I_{\text{нер}}^{\text{max}} \subseteq I_{\text{нер}}, \quad (19)$$

для которых  $\mu_i(\mathbf{x}_{\text{доп}}) = 1$ . Здесь  $I_{\text{нер}}^{\text{max}}$  – индексное множество выделенной максимально-совместной подсистемы неравенств.

Смысл максимально-совместной подсистемы (19) состоит в том, что она определяет допустимое решение задачи, удовлетворяющее наиболее важным условиям. При этом условия, которые противоречат полученному решению, из критерия (16) исключаются по признаку  $\mu_i = 0$ .

Согласование противоречивых условий решаемой задачи может быть получено с использованием различных подходов.

Наиболее просто согласование условий решаемой задачи осуществляется на основе метода уступок. При этом, например, в качестве допустимых принимаются значения координат объекта управления, которые получаются в результате решения задачи (17):

$$y_{i, \text{доп}} = f_i(x_{\text{доп}}), i \in I_{\text{нер}} \setminus I_{\text{нер}}^{\text{max}}. \quad (20)$$

В общем случае процедура согласования условий решаемой задачи может осуществляться в диалоговом режиме, когда на каждом шаге согласования осуществляются определенные уступки по ограничениям (14), а также изменяются веса ограничений. При этом соответственно решается задача (17), которая формально дает ответ на вопрос: является согласуемая постановка задачи противоречивой или нет? В итоге указанная процедура приводит к согласованной постановке задачи выбора решения. Метод уступок не приводит к качественно новому решению рассматриваемой задачи и сводится лишь к количественному согласованию ее условий.

Принципиально иная ситуация возникает, если все наложенные ограничения (12) являются существенными и поэтому не подлежащие уступкам. В этом случае решение (19) считается частичным, так как удовлетворяет лишь подмножеству  $I_{\text{нер}}^{\text{max}} \subset I_{\text{нер}}$  ограничений. В общем случае противоречивая система неравенств (12)–(13) характеризуется множеством максимально-совместных подсистем, которые определяют соответствующее множество частичных решений:

$$y_i^- \leq y_i \leq y_i^+, i \in I_{\text{нер}}^k; k \in K_{\text{нер}}, \quad (21)$$

для которых  $\mu_i(x_{\text{доп}}^k) = 1$ . Здесь  $I_{\text{нер}}^k$  – индексное множество неравенств, входящих в  $k$ -ю максимально-совместную подсистему;  $K_{\text{нер}}$  – множество значений индекса  $k$  максимально-совместных подсистем системы неравенств (12)–(13).

Таким образом, с формальной точки зрения противоречивым постановкам задач выбора решений соответствует множество частичных решений, из которых каждое в отдельности удовлетворяет лишь части условий решаемой задачи, а в совокупности они могут удовлетворять всем условиям решаемой задачи. В данной ситуации не существует единственного решения и движение вперед в решении задачи может быть достигнуто лишь на основе неформального подхода.

Неформальный подход здесь должен реализовать интеллектуальную операцию, которая, согласно ранее данной классификации, представляет собой операцию синтеза конкретного. Другими словами, на основе рассмотрения частных решений необходимо попытаться предложить синтетическое решение, которое бы удовлетворяло противоречивым условиям задачи. Как было рассмотрено ранее, интеллектуальная операция синтеза конкретного может быть представлена в виде последовательности операций синтеза абстрактного и операции конкретизации. Операция синтеза абстрактного представляет собой выдвижение идеи решения задачи. Таким образом, дальнейшее движение вперед в решении задач с противоречивыми условиями неразрывно связано с выдвижением идеи системного согласования частных решений.

Например, противоречивость постановки решаемой задачи может быть вызвана тем, что при ее формулировке не были учтены некоторые определяющие обстоятельства. Полученные частные решения могут служить основой поиска неучтенных обстоятельств. Если эти обстоятельства будут найдены, то общее решение задачи может быть сформулировано, например, следующим образом:

$$x_{\text{доп}}^s(z) = \sum_{k \in K_{\text{нер}}} x_{\text{доп}}^k v(z = \omega_k). \quad (22)$$

Здесь переменная  $z$  принимает свои значения на множестве обстоятельств  $\{\omega_k\}$ . Переменная  $v(z = \omega_k)$  представляет собой характеристическую функцию равенства  $z = \omega_k$  (если  $z = \omega_k$ , то  $v = 1$ , в противном случае  $v = 0$ ). В итоге решение (22) носит гибкий адаптивный характер, при котором в зависимости от обстоятельств реализуется определенное частное решение.

В общем случае выдвижение идеи системного согласования частных решений представляет собой неформальный акт интуитивного поиска решения.

В этой связи обратим внимание, что исследования в области психологии решения задач показывают, что процесс решения, как правило, осуществляется в несколько стадий.

Первая стадия характеризуется попытками решения задачи на основе разнообразных ходов и приемов. Так как в общем случае с первой попытки задача в целом не решается, то на основе многочисленных попыток удается получить лишь частичные результаты. По мере накопления частичных результатов постепенно формируется общее видение контуров решения задачи. Наконец количественное накопление частных результатов приводит к качественному скачку. Наступает интуитивное озарение и рождается идея решения задачи. Выдвижение идеи решения задачи составляет вторую стадию процесса решения. На третьей стадии, исходя из полученной идеи, находится уже искомое решение – конкретный результат. Кроме того,

возможен и прямой путь решения задачи, когда конкретное решение рождается непосредственно на основе интуитивного озарения после накопления частных результатов. В этом случае говорят о двух стадиях процесса решения задач.

Указанная общая схема решения задач достаточно точно вписывается в ранее рассмотренный базовый логический модуль системного исследования.

Действительно, на первой стадии процесса решения происходит накопление частных результатов, определяющих в том или ином смысле частичные решения рассматриваемой задачи. Процесс накопления частных результатов заканчивается при достижении логической полноты множества частных результатов. Логическая полнота множества частных результатов состоит в том, что они должны в совокупности удовлетворять противоречивым условиям; кроме того, они должны образовывать полный конструктивный базис для искомого системного решения.

Получение логически полного множества частных результатов позволяет выдвинуть идею системного решения задачи. Выдвижение идеи системного решения, как уже отмечалось, составляет содержание интеллектуальной операции синтеза абстрактного. После этого на основе интеллектуальной операции конкретизации (движения от абстрактного к конкретному) определяется конкретное системное решение задачи. Указанное решение может быть получено также прямым путем на основе интеллектуальной операции синтеза конкретного. Оба пути решения задачи являются эквивалентными в том смысле, что приводят к одному и тому же результату. С математической точки зрения это означает коммутативность диаграммы интеллектуальных операций в процессе решения задач.

Рассмотрим вопрос: Как возникают противоречия в постановках задач?

Противоречия возникают в процессе прогрессивного развития. Действительно, направление прогрессивного развития можно формализованно представить как последовательность все более совершенных целей:

$$\theta_0 < \theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_l < \dots \quad (23)$$

Каждую цель  $\theta_l$  можно математически сформулировать, например, как целевую область в пространстве координат объекта управления, определяемую системой неравенств:

$$\theta_l : y_{i,l}^- \leq y_i \leq y_{i,l}^+, \quad i \in I_{\text{нер}}^l, \quad (24)$$

где  $I_{\text{нер}}^l$  – индексное множество неравенств на  $l$ -й стадии развития.

В процессе развития целевая область изменяется и налагает все более «сильные» ограничения на допустимые значения координат объекта. Происходит развитие и самого объекта, у него появляются дополнительные степени свободы – коор-

динаты, отражающие новые свойства объекта и требующие введения соответствующего управления. Это неизбежно приводит к противоречивым постановкам задач выбора решений.

Разрешение противоречий осуществляется на основе самоорганизации, формализованной схемой которой является базовый логический модуль системного исследования. При этом в рамках базовой схемы развитие системного исследования осуществляется на основе итеративных процессов решения задач.

В начале изложения рассматриваемой логики решения задач мы полагали, что генеральная идея решения уже сформирована и целью системного исследования является разработка конкретных планов реализации данной идеи. В процессе развития исходной идеи мы пришли к противоречивым постановкам задач, решение которых требует генерации новых идей и соответственно разработки новых планов их реализации. Таким образом, процесс системного исследования итеративно повторяется, но уже на новом витке развития.

#### Система управления энергетической эффективностью

Энергетические характеристики могут быть использованы при решении задач *оптимизации технологических процессов* по критерию снижения объемов потребляемых ресурсов, для *формирования заявок на поставки* энергетических ресурсов, а также для *контроля и нормирования энергопотребления*.

При *наладке и регулировании*, а также в задачах *оперативного управления* технологическими процессами факторные зависимости используются для оптимального выбора значений режимных параметров, при которых потребление энергетических ресурсов процессом минимально.

Для задач *нормирования*, которые решаются на технико-экономическом уровне управления – более высоко, чем уровень непосредственного управления технологическими процессами, использование многофакторных зависимостей, отражающих технологические подробности процессов, может оказаться избыточным. В этом случае значения технологических факторов необходимо принимать *оптимальными* из условия минимума показателя энергетической эффективности процесса. В итоге будет получена оптимальная зависимость показателя энергетической эффективности, например, от энергоемкости  $b_{\text{min}}$  в зависимости от базового показателя производительности процесса (например, объема производства  $p_{\text{пр}}$ ).

Полученную зависимость  $b_{\text{min}}(p_{\text{пр}})$  можно использовать для решения задач нормирования. Подобная зависимость фактически будет определять нормативную область Парето для технологических процессов, вынуждая эксплуатационный персонал



к оптимальному ведению процесса. Такой подход является естественным для решения задач управления производством в рамках организационной структуры предприятия.

В сочетании с *M&T*-технологией повышения эффективности производственных процессов использование факторных моделей позволяет организовать следующую формализованную процедуру последовательного улучшения энергетической эффективности технологических процессов в многоуровневой иерархической постановке.

1<sup>0</sup>. В результате проведения энергетических обследований и испытаний технологического процесса строятся факторные модели потребления энергетических ресурсов в зависимости от существенных режимных факторов, которые определяют *энергетические характеристики процесса*.

2<sup>0</sup>. На основании энергетических характеристик процесса управляющий орган выдает нижестоящим исполнителям задание по энергетической эффективности ведения технологического процесса при заданных объемах производства и оптимальных значениях режимных факторов.

3<sup>0</sup>. Если исполнители не выполняют задания по энергетической эффективности ведения технологического процесса, то управляющий орган организует контроль работы исполнителей с целью проверки оптимальности ведения процесса. Если выявляются нарушения технологического регламента ведения процесса, то исполнителю предписывается – устранить допущенные нарушения. В противном случае признается, что расчетная модель, которую использует орган управления, является неточной. В итоге ставится задача уточнения расчетной модели.

4<sup>0</sup>. Переход к п. 1<sup>0</sup>. Процедура управления итеративно повторяется.

Рассмотренная процедура управления сходится к некоторому оптимальному регламенту ведения технологического процесса, когда располагаемые резервы повышения энергетической эффективности процесса будут реализованы. Дальнейшее улучшение показателей энергетической эффективности необходимо уже осуществлять на основе метода ограничений с использованием принципов адаптации и самоорганизации.

Положительным свойством рассмотренной процедуры управления энергетической эффективностью процессов является использование точных расчетных моделей. Применение точных моделей обеспечивает минимизацию потерь, так как позволяет их достоверно выявлять и, как следствие, четко ставить задачи по устранению нерациональных расходов энергетических ресурсов.

Инструментальной поддержкой рассматриваемой процедуры управления энергетической эффективностью технологических процессов на предприятии могут служить экспертные системы поддержки управления (*ЭСПУ*), разрабатываемые применительно к конкретному производству. Экспертные системы должны базироваться на комплексе *знаний технологии и процессов управления*. Органичное сочетание знаний технологии и процессов управления является основой успешного решения задач энергосбережения.

### Программа мониторинга потребления энергетических ресурсов

Данная программа предназначена для прогнозирования и управления потреблением энергетическими ресурсами – электроэнергией, топливных газов (природного, коксового и доменного) – на металлургическом предприятии [7].

Рассмотрим работу программы.

Стартовое окно, позволяющее сделать выбор ресурса, потребление которого нужно спрогнозировать, представлено на рис. 6.

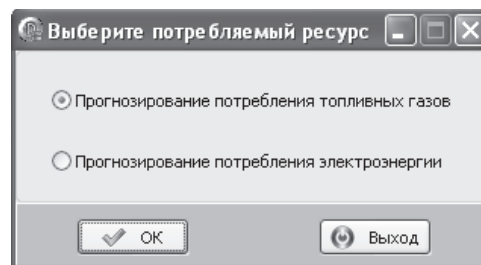


Рис. 6. Стартовое окно

Дальнейшую работу программы рассмотрим для прогнозирования потребления топливных газов. При этом заметим, что работа программы для прогнозирования потребления электроэнергии будет аналогична.

После выбора «Прогнозирование потребления топливных газов» появляется окно, представленное на рис. 7.



Рис. 7. Окно выбора операции в меню прогноза потребления топливных газов

В окне присутствуют четыре кнопки: «просмотр отчета», «плановый объем производства», «фактические данные», «факторный анализ». Рассмотрим назначение этих четырех кнопок более подробно.

### Просмотр отчета

При нажатии на кнопку «Просмотр отчета» появляется окно выбора месяца и года, за который необходимо просмотреть отчет о потреблении топливных газов отдельными цехами (рис. 8). Окно, предназначенное для отображения отчета в виде таблицы, представлено на рис. 9.

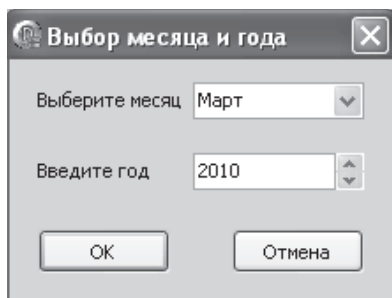


Рис. 8. Окно выбора месяца и года

Таблица (рис. 9) содержит в себе следующие столбцы:

- цех – название цеха;
- продукция – продукция, выпускаемая соответствующим цехом;
- объем производства (плановый и фактический);
- расход топлива:
- план – плановый расход топлива, рассчитываемый на основе регрессионного метода по плановому объему производства;
- план/факт – плановый расход топлива, рассчитываемый на основе регрессионного метода по фактическому объему производства;
- факт – фактическое потребление топлива соответствующим цехом;
- удельный расход топлива (плановый и фактический);
- перерасход топлива;
- удельный перерасход топлива, %.

В окне (рис. 9) имеется кнопка «Печать отчета», предназначенная для распечатки таблицы.

### Плановый объем производства

При нажатии на кнопку «Плановый объем производства» появляется окно выбора месяца и года, за который необходимо ввести плановый объем производства отдельно по цехам (см. рис. 8). Окно, предназначенное непосредственно для ввода планового объема производства по цехам, представлено на рис. 10.

### Фактические данные

При нажатии на кнопку «Фактические данные» появляется окно выбора месяца и года, за который необходимо ввести информацию о фактическом объеме производства и фактическом расходе топлива отдельно по каждому цеху (рис. 10). Окно, предназначенное непосредственно для ввода информации о фактическом объеме производства и фактическом расходе топлива отдельно по каждому цеху, представлено на рис. 11.

### Факторный анализ

При нажатии на кнопку «Факторный анализ» появляется окно, представленное на рис. 12.

Расчет величины потребления топливных газов осуществляется отдельно по каждому цеху на основе многофакторного регрессионного анализа. Рассматриваемое окно (рис. 12) предназначено для данного расчета.

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

Цех	Продукция	Объем производства		Расход топлива			Удельный расход топлива		Перерасход	Удельный перерасход, %
		план	факт	план	план/факт	факт	план	факт		
ТЭЦ	Выработка тепла, Гк.									
ЦЭС	Выработка пара, Гкал									
ПВЭС	Выработка пара, Гкал									
ППЦ №4	Прокат, т.									
ПСС котельн. №4	Выработка пара, Гкал									
ПСС котельн. №5	Выработка пара, Гкал									
ППЦ ст. 2350	Прокат, т.									
ППЦ ст. 4500	Прокат, т.									
КЭП	Вал %									
ППЦ-10	Листовой прокат, т.									
ППЦ-5	Листовой прокат, т.									
ППЦ-3 Терм. отделен	Листовой прокат, т.									
ППЦ-3 АГНЦ	Листовой прокат, т.									
ППЦ-3 АНО	Листовой прокат, т.									
ППЦ-8	Листовой прокат, т.									
Мини-ТЭЦ ПСС	Выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч									
ИДЛ ИОФ-1	Известь, т.									
ИДЛ ИОФ-2	Известь, т.									
ИДЛ ИОФ-4	Известь, т.									
ГОП Аглофабрики	Агломерат, т.									

Рис. 9. Окно отчета

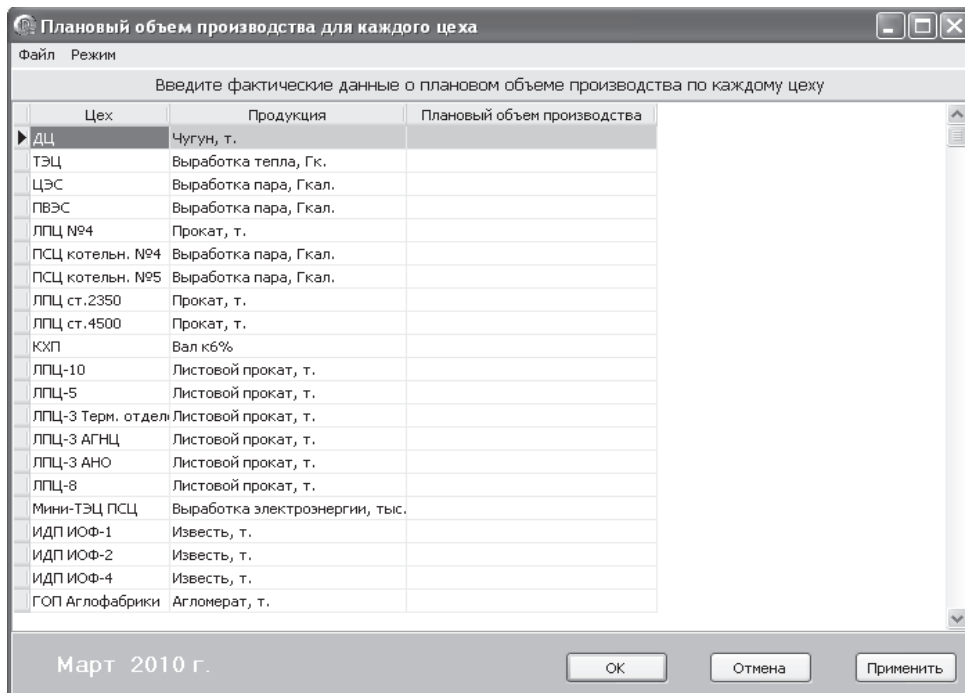


Рис. 10. Окно для ввода планового объема производства по каждому цеху

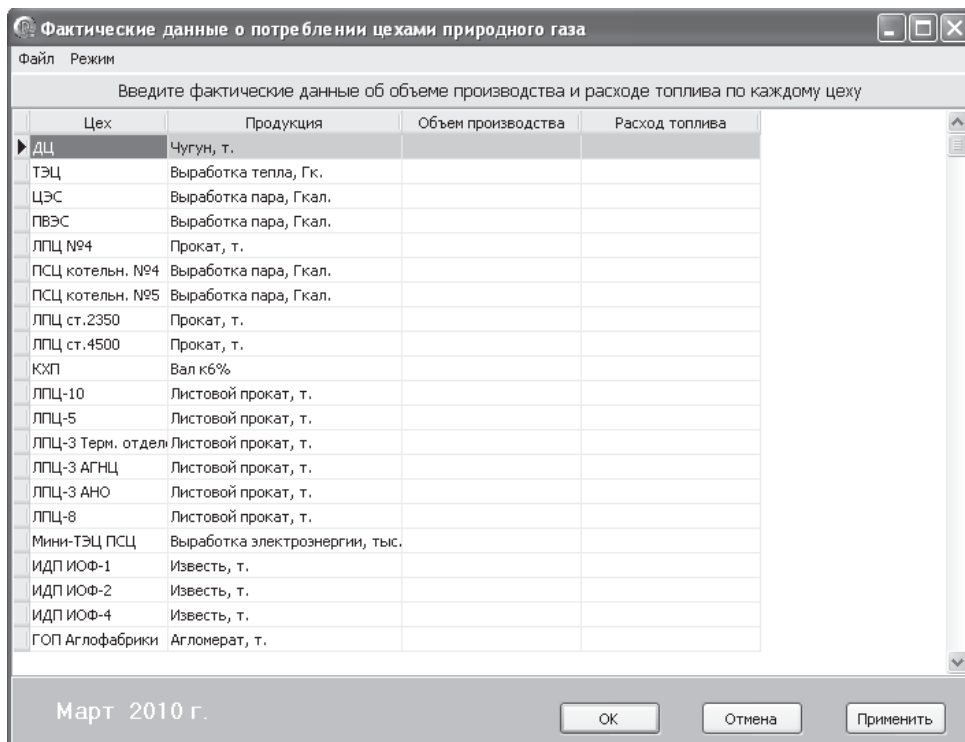


Рис. 11. Окно для ввода информации о фактическом объеме производства и фактическом расходе топлива отдельно по каждому цеху

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». При этом

появится окно авторизации. После успешной авторизации будет доступна возможность редактирования значения факторов. Кроме того, в окне присутствует кнопка «Факторная модель», при нажатии которой появляется окно, представленное на рис. 13.

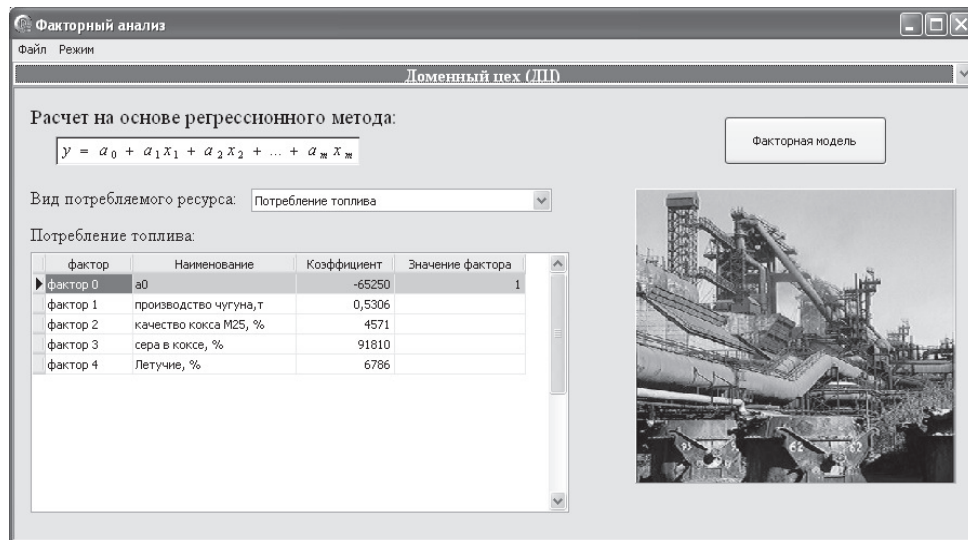


Рис. 12. Факторный анализ

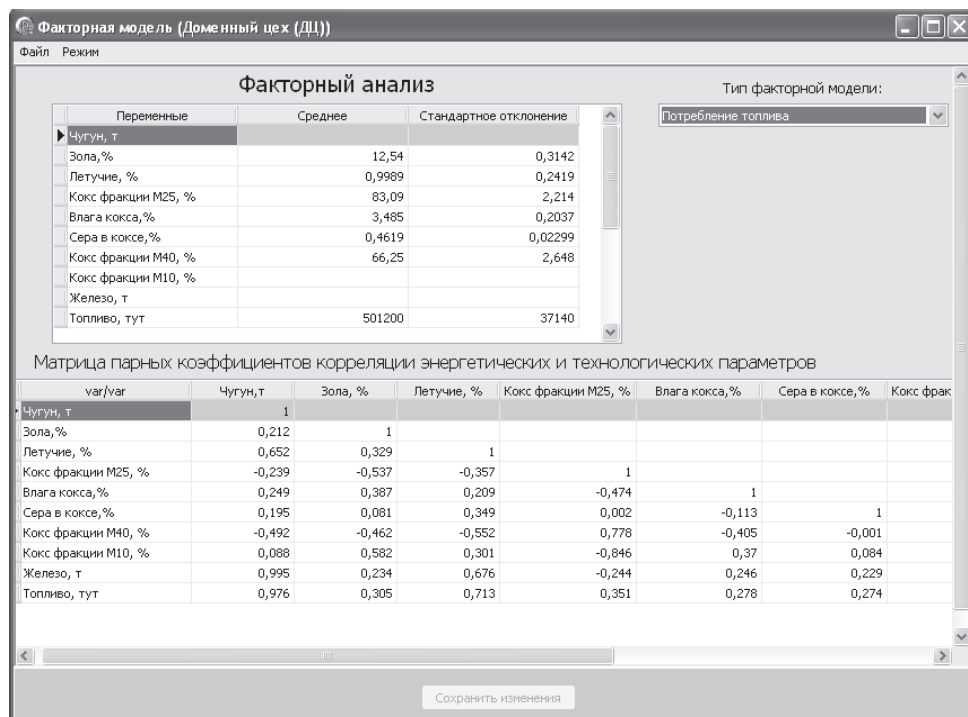


Рис. 13. Факторная модель

Окно (рис. 13) предназначено для вывода факторной модели цеха, выбранного в окне «Факторный анализ» (см. рис. 12). 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 для данного цеха просмотреть не только факторную модель потребления топлива в целом, но и факторные модели потребления отдельных со-

ставляющих топлива, таких как природный, коксовый и доменный газ.

В заключение отметим, что рассмотренный в данном разделе подход к управлению энергетической эффективностью производственных процессов на основе прогнозирующих моделей энергопотребления позволит комплексно организовать работы по энергосбережению в масштабах предприятия. В результате достигается системный эффект от проведения энергосберегающих мероприятий, что в итоге приводит к снижению себестоимости продукции и повышению ее конкурентоспособности.



### Заключение

Рассмотрен предложенный подход к оптимальному решению задач упреждающего управления энергетической эффективностью предприятий региона по критериям технико-экономической и производственной эффективности с целью достижения системного эффекта энергосбережения региона. Предложены алгоритмы упреждающего управления энергетической эффективностью технологических процессов на предприятиях на основе решения противоречивых задач оптимизации показателей энергетической эффективности методом ограничений.

### Литература

1. 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.
2. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургическом производстве // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радио-

электроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7(79). – С. 24–26.

3. 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. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1979. – № 231.

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

5. 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.

6. Казаринов, Л.С. Нестационарные процессы синтеза сложных систем / Л.С. Казаринов. – Иркутск: ИГУ, 1985.

7. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): монография / 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.

Поступила в редакцию 30 сентября 2012 г.