

Оценка экономической эффективности модернизации оборудования тепловых электростанций

Канд. техн. наук А.Н. ПЕРМИНОВ

Федеральное космическое агентство РФ (Роскосмос),

д-р техн. наук М.М. ПЕНЬКОВ, канд. техн. наук А.И. ПТУШКИН

Военно-космическая академия им. М.Ф. Можайского

A technique and the example of calculation of the optimum conditions of financing the measures on modernization of technical equipment directed to the improvement of the indices of quality of operation is presented. The example is related «to a power-and-heating plant.

В настоящее время основным направлением улучшения работы большинства объектов городской технической инфраструктуры является их модернизация. Именно таким образом осуществляется и совершенствование работы существующих тепловых электроцентралей (ТЭЦ). Для разработки оптимальных планов финансирования этого процесса необходимо знать чувствительность показателей качества функционирования отдельных видов оборудования, входящего в состав ТЭЦ, и ТЭЦ в целом к вложению средств на реализацию работ, которые предполагается выполнить в ходе модернизации. Функцию, характеризующую эту чувствительность, в дальнейшем будем называть функцией отклика.

В процессе обследования ТЭЦ можно определить перечень работ на каждом виде оборудования, в результате выполнения которых могут быть улучшены показатели экономической эффективности ее функционирования. Каждая из таких работ должна характеризоваться затратами на ее проведение и вкладом в повышение экономической эффективности ТЭЦ. Эта информация может быть использована в качестве исходных данных для последовательного определения соответствующих функций отклика отдельных видов оборудования и ТЭЦ в целом.

Обозначим:

I – число видов оборудования, подвергаемых модернизации;

J_i – количество возможных мероприятий (работ), направленных на модернизацию i -го оборудования ТЭЦ.

Исходные данные для решения задачи определения названных выше функций отклика целесообразно представить совокупностью таблиц, построенных для каждого вида оборудования и имеющих структуру, представленную в табл. 1.

Таблица 1

Перечень работ по модернизации оборудования i -го вида	Стоимость выполнения работ	Вклад в повышение экономической эффективности ТЭЦ
r_{i1}	c_{i1}	$\Delta \Pi_{i1}$
r_{i2}	c_{i2}	$\Delta \Pi_{i2}$
...
r_{ij}	c_{ij}	$\Delta \Pi_{ij}$
...
r_{iJ}	c_{iJ}	$\Delta \Pi_{iJ}$

Примечания:

1. r_{ij} – условное наименование j -й работы ($j = 1, J_i$) по модернизации i -го вида оборудования ($i = 1, I$);

c_{ij} – затраты на выполнение работы r_{ij} ;

$\Delta \Pi_{ij}$ – приращение показателя экономической эффективности ТЭЦ за счет выполнения j -й работы по модернизации i -го вида оборудования.

2. Работы по модернизации размещены в порядке возрастания стоимости их выполнения.

Суммарное изменение показателя экономической эффективности ТЭЦ $\Delta \Pi_i$ за счет модернизации i -го вида оборудования является некоторой функцией частных приращений этого показателя, т.е.

$$\Delta \Pi_i = f(\Delta \Pi_{i1}, \Delta \Pi_{i2}, \dots, \Delta \Pi_{ij}, \dots, \Delta \Pi_{iJ_i}). \quad (1)$$

Функция (1) часто является аддитивной. Например, это имеет место в случае, когда в качестве показателя эффективности мероприятий по модернизации ТЭЦ рассматривается величина снижения эксплуатационных расходов. В этом случае функция (1) примет вид

$$\Delta \Pi_i = \sum_{j=1}^{J_i} \Delta \Pi_{ij}. \quad (2)$$

Тогда для определения функций отклика ТЭЦ на модернизацию отдельных видов оборудования, а также их совокупности может быть применен метод динамического программирования.

Определение функций отклика ведется последовательно: сначала находят функции отклика, характеризующие чувствительность показателя снижения расходов на обеспечение функционирования ТЭЦ к модернизации отдельных видов оборудования (задача 1), а затем на основе этих данных – суммарную функцию отклика (задача 2). Рассмотрим эти задачи.

Задача 1.

Исходными данными для решения первой задачи являются данные, приведенные в табл. 1.

Дано:

зависимости $\Delta\Pi_{ij}(c_{ij})$, представленные таблично.

Найти:

для каждого $i = \overline{1, I}$ и $C_i = c_{i1}, c_{i1} + \Delta c_i, c_{i1} +$

$$+ 2 \Delta c_i, \dots, \sum_{j=1}^{J_i} c_{ij},$$

где C_i – возможное количество средств, выделяемых на модернизацию i -го вида оборудования ТЭЦ;

Δc_{ij} – точность распределения средств по работам плана модернизации i -го вида оборудования,

определить

$$\overrightarrow{*X_i} = \arg \max_{x_{ij}} \sum_{j=1}^{J_i} \Delta\Pi_{ij}(x_{ij} c_{ij}) \quad (3)$$

при условии, что

$$\sum_{j=1}^{J_i} x_{ij} c_{ij} \leq C_i, \quad (4)$$

где $x_{ij} \in \{0, 1\}$;

$\overrightarrow{*X_i} = [*x_{i1}, *x_{i2}, \dots, *x_{iJ_i}]^T$ – вектор, характеризующий

оптимальный объем работ по модернизации i -го вида оборудования при выделении для этой цели ассигнований в размере c_i . Каждому элементу $*x_{ij}$, равному 1, соответствует работа r_{ij} , а элементы $*x_{ij}$, равные нулю, указывают на то, что соответствующие им работы r_{ij} нецелесообразно выполнять при данном уровне финансирования c_i .

Так как задача решается для спектра значений C_i , то в результате ее решения получим не только оптимальный объем работ по модернизации i -го вида оборудования, но и дискретную функцию $\Delta\Pi_i(C_i)$, характеризующую чувствительность показателя снижения расходов на обеспечение функционирования ТЭЦ к вложению средств на модернизацию i -го вида оборудования.

Задача 2.

Исходными данными для решения второй задачи яв-

ляются зависимости $\Delta\Pi_i(C_i)$, $i = \overline{1, I}$.

Дано:

зависимости $\Delta\Pi_i(C_i)$ для каждого i -го вида оборудования, полученные в результате решения предыдущей задачи.

Найти:

для всех $C = c^{\min}, c^{\min} + \Delta c, c^{\min} + 2\Delta c, \dots, c^{\max}$,

где $c^{\min} = \min_i C_i^{\min}$;

$$c^{\max} = \sum_{i=1}^I C_i^{\max};$$

Δc – точность распределения средств на модернизацию оборудования ТЭЦ,
определить

$$\overrightarrow{*C} = \arg \max_{c_i} \sum_{i=1}^I \Delta\Pi_i(c_i) \quad (5)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^I c_i \leq C, \quad (6)$$

где $\overrightarrow{*C} = [*c_1, *c_2, \dots, *c_I]^T$ – вектор, элементы которого равны оптимальному количеству средств, необходимому для модернизации i -го вида оборудования (нулевые элементы этого вектора соответствуют видам оборудования, модернизация которых при данном уровне финансирования C нецелесообразна).

Так как задача решается для спектра значений C , то в результате ее решения получим не только оптимальное распределение средств по видам оборудования, но и дискретную функцию $\Delta\Pi(C)$, характеризующую чувствительность показателя снижения расходов на обеспечение функционирования ТЭЦ к вложению средств на модернизацию ТЭЦ в целом.

В связи с тем, что в обеих задачах как критерий оптимальности, так и ограничения являются аддитивными функциями, для их решения может быть применен метод динамического программирования [1]. Запишем функциональные уравнения Беллмана для каждой из этих задач.

Задача 1.

Для безальтернативного варианта работ по модернизации эти уравнения будут иметь вид:

$$\Delta\tilde{\Pi}_{ii}(\xi_{ii}) = \Delta\Pi_{ii}(c_{ii}); \quad \forall \xi_{ii} < c_{ii} \Delta\tilde{\Pi}_{ii}(\xi_{ii}) = 0; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{\Pi}_{ij}(\xi_{ij}) = \max_{x_{ij}} & [\Delta\Pi_{ij}(x_{ij} c_{ij}) + \\ & + \Delta\Pi_{i,j-1}(\xi_{ij} - x_{ij} c_{ij})], \quad j = \overline{2, J_i}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta\tilde{\Pi}_{ij}(\xi_{ij})$ – максимальное значение показателя оптимальности при выполнении j -х работ по модер-

Таблица 2

ξ_i	$\Delta\tilde{\Pi}_{il}(\xi_i)$	$\langle \hat{x}_{i11}, \hat{x}_{i12}, \dots, \hat{x}_{i1k_{i1}} \rangle$	$\Delta\tilde{\Pi}_{i2}(\xi_i)$	$\langle \hat{x}_{i21}, \hat{x}_{i22}, \dots, \hat{x}_{i2k_{i2}} \rangle$	\dots	$\Delta\tilde{\Pi}_{ij_i}(\xi_i)$	$\langle \hat{x}_{ij_1}, \hat{x}_{ij_2}, \dots, \hat{x}_{ij_{k_{ij_i}}} \rangle$
1	2	3	4	5		$2J_i - 2$	$2J_i$
0							
c_{i11}							
$c_{i11} + \Delta c$							
$c_{i11} + 2\Delta c$							
\dots							
$\sum_{j=1}^{J_i} c_{ijk_{ij}}$							

низации i -го вида оборудования и при условии, что

$$\sum_{v=1}^j x_{iv} c_{iv} \leq \xi_{ij}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \xi_{ij} = 0, c_{i1}, c_{i1} + \Delta c_i, c_{i1} + \\ + 2\Delta c_i, \dots, \sum_{v=1}^j c_{iv}, \quad j = \overline{2, J_i} - \text{возможный уровень} \end{aligned}$$

финансирования j -х работ по модернизации i -го вида оборудования.

В случае наличия в перечне работ по модернизации i -го вида оборудования альтернативных вариантов показатель снижения расходов на обеспечение функционирования ТЭЦ и ограничения должны быть записаны в виде:

$$\Delta\Pi_i = \sum_{j=1}^{J_i} \Delta\Pi_{ij} (x_{ij1} c_{ij1} + x_{ij2} c_{ij2} + \dots + x_{ijk_{ij}} c_{ijk_{ij}}); \quad (10)$$

$$\forall i, j, k \quad x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} c_{ijk} \in \{0, 1\}; \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} (x_{ij1} c_{ij1} + x_{ij2} c_{ij2} + \dots + x_{ijk_{ij}} c_{ijk_{ij}}) \leq C_i, \quad (12)$$

где k_{ij} – количество альтернативных вариантов выполнения j -й работы по модернизации i -го вида оборудования;

c_{ijk} – стоимость выполнения k -го варианта j -й работы по модернизации i -го вида оборудования.

Далее будем предполагать, что работы и альтернативные варианты их выполнения упорядочены в соответствии с условиями:

$$c_{i11} \leq c_{i21} \leq c_{ij1} \leq \dots \leq c_{iJ_i1};$$

$$c_{ij1} < c_{ij2} < \dots < c_{ijk_{ij}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J_i}.$$

С учетом (10) – (12) уравнения (7), (8) примут вид:

$$\Delta\tilde{\Pi}_i(\xi_i) = \Delta\Pi_i(\xi_i), \quad \xi_{i1} = 0, c_{i11},$$

$$c_{i11} + \Delta c_i, c_{i11} + 2\Delta c_i, \dots, c_{i1k_{i1}}; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{\Pi}_{ij}(\xi_{ij}) = \max_{\langle x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijk_{ij}} \rangle \in X_{ij}} \left[\Delta\Pi_{ij} \left(\sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} c_{ijk} \right) + \right. \\ \left. + \Delta\tilde{\Pi}_{i,(j-1)} \left(\xi_{ij} - \sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} c_{ijk} \right) \right]; \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{v=1}^j \sum_{k=1}^{k_{iv}} (x_{ivk} c_{ivk}) \leq \xi_{ij}, \quad \xi_{ij} = 0, c_{i11}, c_{i11} + \Delta c_i, c_{i11} + \\ + 2\Delta c_i, \dots, \sum_{v=1}^j c_{ivk_v}, \quad j = \overline{2, J_i}, \quad (15) \end{aligned}$$

где ξ_{ij} – множество $(k_{ij} + 1)$ кортежей из k_{ij} элементов, которые имеют следующую структуру: все элементы первого кортежа равны 0, у второго кортежа первый элемент равен 1, а остальные 0, у третьего – второй элемент равен 1, а остальные 0, у $(k_{ij} + 1) - k_{ij}$ -й элемент равен 1, а остальные 0. Например, если $k_{ij} = 3$, то $\xi_{ij} = \{<0,0,0>, <1,0,0>, <0,1,0>, <0,0,1>\}$.

Результаты вычислений по формулам (13), (14), (15) и соответствующие им условно-оптимальные кортежи для каждого вида оборудования целесообразно представить в виде табл. 2.

Задача 2.

Функциональные уравнения Беллмана, необходимые для построения функции отклика для ТЭЦ в целом имеют вид:

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{\Pi}_i(\xi_i) = \Delta\Pi_i(\xi_i), \quad \xi_1 = 0, c_1, c_{11} + \Delta c, \\ c_{11} + 2\Delta c_1, \dots, \sum_{j=1}^{J_i} c_{ijk_{ij}}; \quad (16) \end{aligned}$$

$$\Delta\tilde{\Pi}_i(\xi_i) = \max_{\bar{c}_i \in \bar{C}_i} [\Delta\Pi_i(\bar{c}_i) + \Delta\tilde{\Pi}_{i-1}(\xi_i - \bar{c}_i)]; \quad (17)$$

$$\xi_1 = 0, c_{11}, c_{11} + \Delta c, c_{11} + 2\Delta c_1, \dots,$$

$$\sum_{v=1}^i \sum_{j=1}^{J_j} c_{ivk_j}, \quad i = \overline{2, I}, \quad (18)$$

где $\bar{C}_i = \{\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_r, \dots, \bar{c}_{R_i}\} \subseteq C_i$ – подмножество

Таблица 3

ξ	$\Delta\tilde{\Pi}_1(\xi)$	\hat{c}_1	$\Delta\tilde{\Pi}_2(\xi)$	\hat{c}_2	\dots	$\Delta\tilde{\Pi}_1(\xi)$	\hat{c}_1
1	2	3	4	5		$2I-1$	$2I$
0							
c_{11}							
$c_{11}+\Delta c$							
$c_{11}+2\Delta c$							
\dots							
$\sum_{v=1}^{i-1} \sum_{j=1}^{J_v} c_{ivk_{vj}}$							

неповторяющихся элементов множества C_i ;

R_i – количество неповторяющихся элементов множества C_i .

При этом, если $\xi_i \leq \bar{c}_{R_i}$, то $(\xi_i - \sum_{v=1}^{i-1} \bar{c}_{R_v}) \leq \bar{c}_i \leq \xi_i$.

В противном случае – $(\xi_i - \sum_{v=1}^{i-1} \bar{c}_{R_v}) \leq \bar{c}_i \leq \bar{c}_{R_i}$.

Результаты расчетов по формулам (16), (17), (18) и соответствующие им условно-оптимальные значения ресурсов, которые целесообразно выделить на модернизацию i -го вида оборудования, так же как и при решении предыдущей задачи, удобно представить в виде табл. 3, аналогичной по структуре табл. 2.

Изложенная методика была применена для оценки экономической эффективности модернизации типовой теплоэлектроцентрали средней мощности, предназначеннной для энергообеспечения города с населением около 100 тыс. человек. Установленная электрическая мощность ТЭЦ составляет 60 МВт, располагаемая (на момент обследования) – 36 МВт, установленная тепловая мощность – 180 Гкал/ч, располагаемая – 70 Гкал/ч. Оборудование ТЭЦ смонтировано в 60–80-е годы прошлого века. Котельное оборудование представлено энергетическими паровыми котлами типов БКЗ-75, БКЗ-50 и ГМ-50, а также водогрейными котлами типа ПТВМ-50. Турбинное оборудование представлено паровыми турбинами типа ПТ-12-35/10М. Отвод недопользованного тепла из конденсаторов турбин обеспечивается системой циркуляционного охлаждения на основе башенных градирен с пленочным оросителем и центробежных насосов типа 24ДН. Оборудование химводоподготовки включает в себя установки химического обессоливания методами фосфатирования, Na- и H-катионирования и декарбонизации, а также деаэраторы для удаления кислорода. Для связывания остатков кислорода и углекислоты предусмотрена коррек-

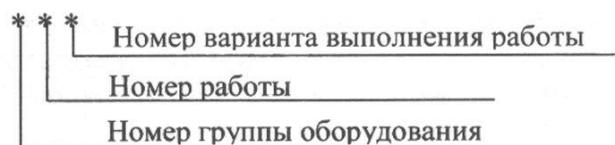


Рис. 1. Система кодирования работ

ционная обработка воды аммиаком и сульфитом натрия. Особенностью ТЭЦ является использование в качестве топлива топочного мазута марки М-100, отличающегося высокой стоимостью – 3 тыс. руб. за 1 т.

Обследование технического состояния и энергетический аудит оборудования ТЭЦ показали, что на станции имеются существенные резервы повышения ее экономичности с помощью как мероприятий ремонтно-профилактического характера, так и модернизации. Часть мероприятий, относящихся к модернизации, может носить альтернативный характер.

Наиболее существенный эффект может быть получен при реализации ремонтно-профилактических работ и работ по модернизации систем циркуляционного охлаждения конденсаторов турбин [2], установок химводоподготовки [3] и котлоагрегатов [4]. Рассмотрим более подробно перечень и характер этих работ. При этом будем использовать систему их кодирования, представленную на рис. 1.

При обследовании состояния и режимов работы 1-й группы оборудования – системы охлаждения конденсаторов турбин – было выявлено значительное превышение подачи циркуляционных насосов над расходом воды, требующимся для обеспечения нормальной работы турбин. Такой перерасход приводит к большим дополнительным потерям электроэнергии на привод насосов. Для уменьшения указанных потерь необходимо проведение следующих работ.

✓ Ремонт и перекрытие задвижек в отводах трубопровода циркуляционной воды на неработающие турбины для устранения паразитных перетечек (стоимость разовых затрат на реализацию составляет 0,5 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 1,6 млн руб. для всех работающих насосов).

✓ Уменьшение номинальной подачи центробежных насосов, что возможно за счет реализации одного из следующих мероприятий:

- обточка рабочих колес эксплуатируемых насосов (стоимость разовых затрат на реализацию составляет для всех насосов 1 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 2,5 млн руб.);

- установка на действующие насосные агрегаты уст-

ройств по регулированию частоты вращения (стоимость разовых затрат на реализацию составляет для всех насосов 4 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 3,3 млн руб.).

Потенциальный экономический эффект оценивался расчетом стоимости сэкономленной электроэнергии.

Анализ технического состояния и эффективности функционирования оборудования 2-го вида – системы химводоподготовки – показал, что она не обеспечивает требуемого качества очистки воды. Это приводит к частому выходу из строя котельного оборудования в результате коррозии и образования накипи. Для улучшения очистки воды следует провести следующие мероприятия.

- ✓ Строительство станции очистки и возврата конденсата от оборудования топливоподачи (стоимость разовых затрат на реализацию составляет 3 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 0,7 млн руб.).

- ✓ Внедрение новых методов коррекционной обработки питательной и котловой воды для очистки от остатков кислорода и углекислоты с учетом наличия альтернативных вариантов:

- применение реагента П-2 разработки ЦКТИ (стоимость разовых затрат на реализацию составляет 4 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 1,4 млн руб.);

- использование реагента «Хеламин» (стоимость разовых затрат на реализацию составляет 5 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 1,6 млн руб.).

- ✓ Внедрение новых установок по обессоливанию воды с учетом того, что возможны альтернативные варианты:

- монтаж установок по термическому обессоливанию воды (стоимость разовых затрат на реализацию составляет 11 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 3,8 млн руб.);

- монтаж установок на основе использования явления обратного осмоса (стоимость разовых затрат на реализацию составляет 15 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 4,3 млн руб.).

Оценка потенциального экономического эффекта проводилась в предположении, что средний межремонтный период увеличивался в 2 раза, соответственно, в 2 раза уменьшались среднегодовые суммы затрат на ремонт котлов.

Анализ технического состояния и конструктивных

особенностей 3-го вида оборудования – паровых и водогрейных котлов всех типов – показал, что для повышения КПД-брутто котлов желательно проведение следующих мероприятий.

- ✓ Установка распылительных головок механических форсунок (ОСТ 108.836.03 – 80) для улучшения качества распыления топлива (стоимость разовых затрат на реализацию составляет для всех котлов 5 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 4,2 млн руб.).

- ✓ Установка кислородомера с регулирующим комплексом типа АКГ с целью обеспечения оптимального коэффициента избытка воздуха (стоимость разовых затрат на реализацию составляет для всех котлов 6 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 3,6 млн руб.).

- ✓ Установка на мазутном хранилище теплообменников типа «труба в трубе» для прогрева паром мазута до температуры 130 °С (стоимость разовых затрат на реализацию составляет для всех мазутных емкостей 9 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 4,8 млн руб.).

- ✓ Внедрение системы газоимпульсной периодической очистки внутренней поверхности топки от нагара (стоимость разовых затрат на реализацию составляет для всех котлов 16 млн руб., а оценка соответствующей ежегодной экономии средств – 8,8 млн руб.).

Оценку потенциального экономического эффекта

Таблица 4

Условные номера работ	Индикаторы работ (альтернативных вариантов их выполнения)	Стоимость выполнения работ (альтернативных вариантов), млн руб.	Годовая экономия, млн руб./год
11	x_{111}	0,5	1,6
12	x_{121}	1,0	2,5
	x_{122}	4,0	3,3
21	x_{211}	3,0	0,7
22	x_{221}	4,0	1,4
	x_{222}	5,0	1,6
23	x_{231}	11,0	3,8
	x_{232}	15,0	4,3
31	x_{31}	5,0	4,2
32	x_{32}	6,0	3,6
33	x_{33}	9,0	4,8
34	x_{34}	16	8,8

Таблица 5
Результаты пошагового решения задачи 1 для системы циркуляционного охлаждения конденсаторов турбин

ξ	$\Delta \tilde{\Pi}_{11}(\xi)$	\hat{x}_{111}	$\Delta \tilde{\Pi}_{12}(\xi)$	$\hat{x}_{121}, \hat{x}_{122}$
0,0	0,0	0,0	0,0	<0,0>
0,5	1,6	1	1,6	<0,0>
1,0			2,5	<1,0>
1,5			4,1	<1,0>
4,0			4,1	<1,0>
4,5			4,9	<0,1>

Таблица 6
Результаты пошагового решения задачи 1 для оборудования химводоподготовки

ξ	$\Delta \tilde{\Pi}_{21}(\xi)$	\hat{x}_{111}	$\Delta \tilde{\Pi}_{222}(\xi)$	$\hat{x}_{121}, \hat{x}_{122}$	$\Delta \tilde{\Pi}_{223}(\xi)$	$\hat{x}_{121}, \hat{x}_{122}$
0	0,0	0	0,0	<0,0>	0	<0,0>
3	0,7	1	0,7	<0,0>	0,7	<0,0>
4			1,4	<1,0>	1,4	<0,0>
5			1,6	<0,1>	1,6	<0,0>
7			2,1	<1,0>	2,1	<0,0>
8			2,3	<0,1>	2,3	<0,0>
11					3,8	<1,0>
14					4,5	<1,0>
15					5,2	<1,0>
16					5,4	<1,0>
19					6,1	<1,0>
23					6,6	<0,1>

проводили на основе анализа данных о величине повышения КПД-брутто котлов, расчета соответствующей экономии мазута и уменьшения затрат на его закупку.

Все указанные мероприятия являются аддитивными, поскольку их можно проводить независимо друг от друга.

Экономические показатели рассмотренных работ и вариантов их выполнения, являющиеся исходными данными для решения задачи 1, сведены в табл. 4.

Табл. 5, 6 и 7 иллюстрируют результаты пошагового решения задачи 1 на основе применения рекуррентных

Таблица 7
Результаты пошагового решения задачи 1 для котлоагрегатов

ξ	$\Delta \tilde{\Pi}_{31}(\xi)$	\hat{x}_{31}	$\Delta \tilde{\Pi}_{32}(\xi)$	\hat{x}_{32}	$\Delta \tilde{\Pi}_{33}(\xi)$	\hat{x}_{33}	$\Delta \tilde{\Pi}_{34}(\xi)$	\hat{x}_{34}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4,2	1	4,2	0	4,2	0	4,2	0
9			4,2	0	4,8	1	4,8	0
11			7,8	1	7,8	0	7,8	0
14					9,0	1	9,0	0
20					12,6	1	12,6	0
21							13,6	1
27							16,6	1
30							17,8	1
36							20,4	1

Таблица 8
Функция отклика на вложение средств в модернизацию системы циркуляционного охлаждения конденсаторов турбин

Затраты, млн руб.	0	0,5	1	1,5	4,5
Годовая экономия, млн руб./год	0	1,6	2,5	4,1	4,9

Таблица 9
Функция отклика на вложение средств в модернизацию оборудования химводоподготовки

Затраты, млн руб.	3	4	5	7	8	11	14	15	16	19	23
Годовая экономия, млн руб./год	0,7	1,4	1,6	2,1	2,3	3,8	4,5	5,2	5,4	6,1	6,6

Таблица 10
Функция отклика на вложение средств в модернизацию котлоагрегатов

Затраты, млн руб.	5	9	11	14	20	21	27	30	36
Годовая экономия, млн руб./год	0,7	1,4	1,6	2,1	2,3	3,8	4,5	5,2	5,4

соотношений (13), (14) для первого, второго и третьего вида оборудования соответственно.

Таблица 11

Результаты пошагового решения задачи 2 для ТЭЦ в целом

ξ	$\Delta\tilde{\Pi}_1(\xi)$	\hat{c}_1	$\Delta\tilde{\Pi}_2(\xi)$	\hat{c}_2	$\Delta\tilde{\Pi}_3(\xi)$	\hat{c}_3	ξ	$\Delta\tilde{\Pi}_1(\xi)$	\hat{c}_1	$\Delta\tilde{\Pi}_2(\xi)$	\hat{c}_2	$\Delta\tilde{\Pi}_3(\xi)$	\hat{c}_3
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,5					20,7	27,0
0,5	1,6	0,5	1,6	0,0	1,6	0,0	31,5					21,9	30,0
1,0	2,5	1,0	2,5	0,0	2,5	0,0	33,5					22,4	27,0
1,5	4,1	1,5	4,1	0,0	4,1	0,0	34,5					22,7	30,0
4,5	4,9	4,5	4,9	0,0	4,9	0,0	35,5					22,9	27,0
5,5			5,5	4,0	5,8	5,0	36,5					23,5	30,0
6,0			5,5	4,0	6,7	5,0	37,5					24,5	36,0
6,5			5,7	5,0	8,3	5,0	40,5					25,3	36,0
9,5			6,4	8,0	9,1	5,0	42,5					26,1	36,0
11,5			7,0	7,0	9,4	11,0	44,5					26,7	36,0
12,0			7,0	7,0	10,3	11,0	45,5					26,8	36,0
12,5			7,9	11,0	11,9	11,0	46,5					27,1	36,0
15,5			8,6	14,0	13,1	14,0	47,5					27,4	36,0
18,5			9,5	16,0	13,9	14,0	48,5					28,3	36,0
19,5			10,1	15,0	14,1	11,0	51,5					29,0	36,0
20,5			10,3	16,0	14,7	14,0	52,5					29,7	36,0
21,0			10,3	16,0	15,1	20,0	53,5					29,2	36,0
21,5			10,3	16,0	16,7	20,0	55,5					30,5	36,0
22,5			10,3	16,0	17,7	21,0	56,5					30,7	36,0
25,5			11,0	19,0	18,5	21,0	59,5					31,4	36,0
27,5			11,5	23,0	19,3	21,0	63,5					31,9	36,0

На основе данных, содержащихся в первых и предпоследних столбцах этих таблиц, можно построить интересующие нас функции отклика для каждого вида оборудования. Эти функции представлены численно (табл. 8, 9 и 10) и графически (рис. 2, а, б и в).

Табл. 11 иллюстрирует результаты пошагового решения задачи 2 на основе применения рекуррентных соотношений (16), (17) для ТЭЦ в целом. Функция отклика ТЭЦ на вложение средств в модернизацию ее оборудования представлена таблично (табл. 12) и графически (рис. 2, г).

Знание полученных функций отклика позволяет решить задачу оптимального использования средств, выделяемых на модернизацию ТЭЦ. Для этого необходимо выполнить так называемый “обратный ход” алгоритма динамического программирования.

По заданному количеству средств C определяем максимальный годовой эффект, который можно получить при оптимальном распределении этих средств по видам оборудования. Значение этого эффекта $\Delta\tilde{\Pi}(C)$ содержится в строке $\xi = C$ с номером $(2I - 1)$ табл. 3 (в рассмотренном примере в предпоследнем столбце табл. 11). В столбце $2I$ (последнем) этой же строки (см. табл. 3) находим оптимальное количество средств $*c_I$, необходимое для модернизации I -го вида оборудования (в примере – 3-го вида). Затем в строке $\xi = C - *c_I$ этой же таблицы в столбце $2(I - 1)$ находим оптимальное количество средств $*c_{(I-1)}$, которое необходимо выделить на модернизацию $(I - 1)$ -го вида оборудования. Далее последовательно входим в строки $\xi = C - *c_I - *c_{(I-1)} \dots$

$$\xi = C - \sum_{r=0}^{I-1} *c_{I-r} \text{ и соответственно находим } *c_{(I-2)},$$

Таблица 12

Функция отклика на вложение средств модернизации ТЭЦ

Затраты, млн руб.	Годовая экономия, млн руб./год	Затраты, млн руб.	Годовая экономия, млн руб./год
0	0	28,5	20,7
0,5	1,6	31,5	21,9
1	2,5	33,5	22,4
1,5	4,1	34,5	22,7
4,5	4,9	35,5	22,9
5,5	5,8	36,5	23,5
6	6,7	37,5	24,5
6,5	8,3	40,5	25,3
9,5	9,1	42,5	26,1
11,5	9,4	44,5	26,7
12	10,3	45,5	26,8
12,5	11,9	46,5	27,1
15,5	13,1	47,5	27,4
18,5	13,9	48,5	28,3
19,5	14,1	51,5	29
20,5	14,7	52,5	29,7
21	15,1	53,5	29,9
21,5	16,7	55,5	30,5
22,5	17,7	56,5	30,7
25,5	18,5	59,5	31,4
27,5	19,3	63,5	31,9

$*c_{(I-3)}, \dots, *c_I$. Формально этот алгоритм можно записать следующим образом.

Шаг 1. $*c_I = \hat{c}_I(\xi = C)$.

Шаг 2. $*c_{I-1} = \hat{c}_I(\xi = C - *c_I)$.

.....

Шаг I . $*c_{I-1} = \hat{c}_I\left(\xi = C - \sum_{r=0}^{I-1} *c_{I-r}\right)$.

.....

Шаг I . $*c_I = \hat{c}_I\left(\xi = C - \sum_{r=0}^{I-2} *c_{I-r}\right)$.

Получив распределение средств по видам оборудования, определяем оптимальный перечень работ по его модернизации. Для этого, зная $*c_i$ для каждого вида оборудо-

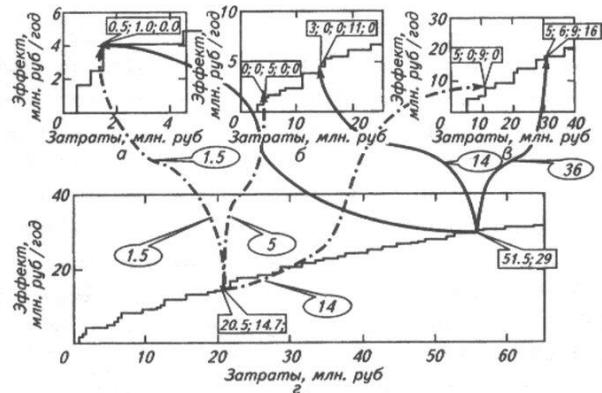


Рис. 2. Функции отклика показателя эффективности

ТЭЦ на модернизацию:
а – системы циркуляционного охлаждения конденсаторов турбин; б – оборудования химводоподготовки;
в – котлоагрегатов; г – совокупности рассматриваемого оборудования

дования, входим в строку $\xi = *c_i$ табл. 2 и в столбце $2J_i$ (последнем) находим оптимальный кортеж индикаторов вариантов выполнения J_i -й работы $\langle \hat{x}_{i,1}, \hat{x}_{i,2}, \dots, \hat{x}_{i,k_{ij}} \rangle$. Отличный от нуля элемент этого кортежа определяет оптимальный вариант выполнения J_i -й работы, стоимость

которой $*c_{ij} = \sum_{k=1}^{k_{ij}} \hat{x}_{ij,k} (\xi = *c_i) c_{ij,k}$. Далее, как и в предыдущем случае, последовательно входим в строки $\xi_i = *c_i - *c_{ij}$, $\xi_i = *c_i - *c_{ij} - *c_{i(j_i-1)}$, ..., $\xi_i = *c_i - *c_{i(j_i-1)} - \sum_{r=0}^{j_i-2} *c_{i(j_i-r)}$ и соответственно находим

$$*c_{i(j_i-1)} = \sum_{k=1}^{k_{i(j_i-1)}} \hat{x}_{i(j_i-1),k} (*c_i = *c_i - *c_{ij}) c_{i(j_i-1),k},$$

.....

$$*c_{i(j_i-1)} = \sum_{k=1}^{k_{i(j_i-1)}} \hat{x}_{i(j_i-1),k} (*c_i = *c_i - \sum_{r=0}^{j_i-2} *c_{i(j_i-r)}) c_{i(j_i-1),k},$$

.....

$$*c_{ii} = \sum_{k=1}^{k_{ii}} \hat{x}_{ii,k} (*c_i = *c_i - \sum_{r=0}^{j_i-2} *c_{i(j_i-r)}) c_{ii,k}.$$

Предположим, что на модернизацию ТЭЦ может быть выделено 51,5 млн руб. Тогда, следуя изложенному алгоритму, получим, что, выполнив на эту сумму работы по модернизации ТЭЦ, можно обеспечить ежегодную экономию в размере 29 млн руб., если эти средства будут распределены следующим образом: на модернизацию котлоагрегатов – 36 млн руб., на оборудование химводоподготовки – 14 млн руб. и на систему

охлаждения конденсаторов турбин – 1,5 млн руб. При этом должен быть выполнен весь предусмотренный комплекс работ на котлоагрегатах, на оборудовании химводоподготовки – работы по строительству станции очистки и возврата конденсата от оборудования топливоподачи стоимостью 3 млн руб. и монтажу установок по термическому обессоливанию воды стоимостью 11 млн руб., а на системе охлаждения конденсаторов турбин – работы по устранению паразитных перетечек и обточке рабочих колес эксплуатируемых насосов стоимостью 0,5 и 1 млн руб. соответственно.

В случае, когда на модернизацию ТЭЦ будет выделяться 20,5 млн руб., максимально возможная годовая экономия составит 14,7 млн руб. При этом на котлоагрегатах должны быть выполнены работы по установке более совершенных распылительных головок механических форсунок (ОСТ 108.836.03 – 80) и установке на мазутном хранилище теплообменников типа «труба в трубе» общей стоимостью 14 млн руб., на оборудовании химводоподготовки – только работы по внедрению реагента «Хеламин» стоимостью 5 млн руб., а на системе охлаждения конденсаторов турбин – те же работы, что и в предыдущем случае, стоимостью 1,5 млн руб.

Рис. 2 иллюстрирует рассмотренные примеры. Он также наглядно показывает, как изменяется чувствительность рассматриваемого показателя экономической эффективности к объему финансирования работ по модернизации. В данном случае с ростом объема финансирования она уменьшается. Так, вложение первых 20 млн руб. обеспечивает годовую экономию в размере 14 млн руб., вторых – в размере 10 млн руб., а третьих – только 6 млн руб.

На основе знания функций отклика можно решать не только задачи оптимального распределения единовременно выделяемых средств, но и задачи распределения средств по годам таким образом, чтобы суммарный эффект за N лет был бы максимальным.

Таким образом, изложенная методика позволяет получить богатый материал для обоснования и принятия решения о режиме финансирования тех или иных работ, направленных на улучшение показателей качества функционирования различных технических объектов.

Список литературы

1. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования / Пер. с англ.; Под ред. А.А. Первозванского. – М.: «Наука», 1965.
2. Кричченко Г.И. Гидравлические машины. Турбины и насосы. – М.: Энергия, 1978.
3. РД 24.031.120 – 91. Методические указания. Нормы качества сетевой и подпиточной воды водогрейных котлов, организация вводно-химического режима и химического контроля. – СПб.: АО НПО ЦКТИ, 1993.
4. Янкилевич В.Н. Наладка газомазутных промышленных котельных. – М.: Энергия, 1978.