

УДК 621.311

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

МАМЕДЯРОВ О. С., НАСИБОВ В.Х., ЗАРБИЕВА Н. Ф., СУЛЕЙМАНЛЫ Л. Э.

АзНИИ Энергетики и Энергопроектирования

Предложена методика выбора оптимального режима электростанции промышленного предприятия в части распределения нагрузки между агрегатами станции и покупной электроэнергией из энергосистемы. Рассмотрены режимы электростанции в конденсационном и теплофикационном циклах.

Современные тенденции в области электрообеспечения промышленного предприятия требуют снижения доли затрат на электроэнергию в себестоимости готовой продукции и обеспечения их энергетической безопасности. Для их решения многие предприятия создают собственные энергетические базы, включающие тепловые электростанции и котельные, использующие попутный газ, технологический пар и другие виды энергоносителей.

В таком случае в составе крупного промышленного предприятия создаются собственные ТЭС, что приводит к существенному изменению структуры энергетического хозяйства. При этом возникает необходимость определения экономически целесообразной загрузки ТЭС промышленного предприятия, и определения мощности, получаемой из энергосистемы. Для этой оптимизационной задачи имеем:

Минимизируемая функция – суммарные затраты на топливо для ТЭС, стоимость приобретаемой электроэнергии из энергосистемы и потери активной мощности в сетях.

Ограничением является баланс активной мощности генераторов электростанций, мощности поступающей из энергосистемы, мощности нагрузки и потери мощности в сети.

Для рассматриваемой задачи в первом приближении потерями мощности в сети энергосистемы можно пренебречь. При этом математически задача сформулируется следующим образом: необходимо минимизировать суммарную стоимость расхода топлива на производство электроэнергии на электростанции и затраты на покупную электроэнергию для обеспечения всех потребителей промышленного предприятия электрической энергией. Таким образом, имеем:

$$\text{Целевая функция } F = \sum a_i B_i + a_3 P_3 \longrightarrow \min$$

где:  $a_i$  – стоимость 1 т условного топлива на агрегате  $i$  (ман/т.у.т.);

$B_i$  – расход условного топлива на агрегате  $i$  (т.у.т.);

$a_3$  – удельная стоимость покупной мощности (ман/кВт);

$P_3$  – мощность поступающая из энергосистемы (кВт, МВт).

$$\text{Ограничение } W = \sum P_i + P_3 - P_n$$

где  $P_i$  – нагрузка  $i$  агрегата электростанции;

$P_3$  – мощность поступающая из энергосистемы;

$P_n$  – суммарная нагрузка предприятия.

Задача может быть решена методом Лагранжа.

Функция Лагранжа

$$S = F + \lambda W = \sum_{i=1}^n a_i B_i + a_3 P_3 + \lambda \left( \sum_{i=1}^n P_i + P_3 - P_H \right) \rightarrow \min$$

Для нахождения оптимальных значений  $P_i$  и  $P_3$  при заданной суммарной нагрузке  $P_H$  необходимо приравнять нулю частные производные  $\frac{\partial S}{\partial P_i}$  и решить систему из  $n+1$  уравнений относительно мощности агрегатов и мощности, поступающей из энергосистемы.

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial P_i} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial B_i}{\partial P_i} + \lambda = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial P_3} = a_3 + \lambda = 0 \end{cases}$$

где  $n$  - число агрегатов электростанции.

Обозначим  $a_i \frac{\partial B_i}{\partial P_i} = a_i b_i$  - относительный прирост стоимости расхода топлива на  $i$  агрегате электростанции.

С помощью полученных  $n+1$  уравнений находятся  $n$  оптимальных мощностей агрегатов станции и мощность, поступающая из энергосистемы.

Из полученной системы из  $n+1$  уравнений следует, что

$$-\lambda = a_i b_i \quad (i = \overline{1, n})$$

$$-\lambda = a_3$$

$$\text{или} \quad a_1 b_1 = a_2 b_2 = \dots = a_n b_n = a_3$$

Полученное выражение показывает, что оптимум, т.е. минимум затрат, достигается при равенстве относительных приростов стоимости расхода топлива на каждом агрегате и удельной стоимости покупной электроэнергии.

Величина  $a_3$  может зависеть от величины покупной мощности (электроэнергии), но, в основном, в пределах договорной приобретаемой мощности может оставаться постоянной.

Если стоимость покупной электроэнергии постоянная  $a_3 = \text{const}$ , то графически полученное выражение для трех агрегатной электростанции реализуется следующим образом (рис.1).

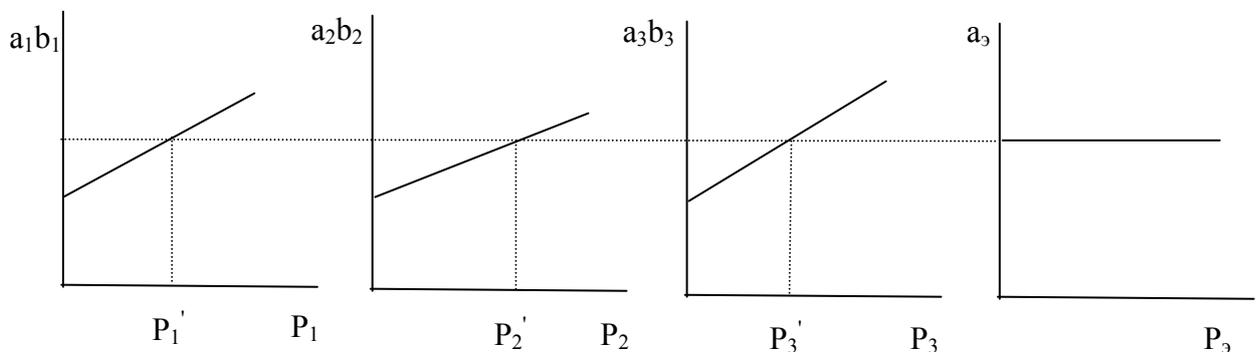


Рис.1

Если  $P_H = P_1' + P_2' + P_3'$ , то получение электроэнергии от собственной электростанции или покупка из энергосистемы равноценны; если  $P_H < (P_1' + P_2' + P_3')$ , то целесообразно электроэнергию полностью получать от собственной электростанции;

если же  $P_n > (P_1' + P_2' + P_3')$ , тогда недостаток энергии целесообразно получать из энергосистемы.

Рассмотрим методику распределения нагрузки промпредприятия между агрегатами собственной электростанции и покупной электроэнергией, получаемой из энергосистемы, для трех агрегатной конденсационной и теплофикационной электростанций.

а) Конденсационная электростанция

Примем следующие аналитические расходные характеристики агрегатов

$$V_1 = 0,8 + 0,3 P_1 + 0,02 P_1^2 \quad (\text{т})$$

$$V_2 = 1,0 + 0,4 P_2 + 0,03 P_2^2 \quad (\text{т})$$

$$V_3 = 1,2 + 0,25 P_3 + 0,035 P_3^2 \quad (\text{т})$$

ХОП расхода топлива будут

$$b_1 = 0,3 + 0,04 P_1 \quad (\text{т/МВт})$$

$$b_2 = 0,4 + 0,06 P_2 \quad (\text{т/МВт})$$

$$b_3 = 0,25 + 0,07 P_3 \quad (\text{т/МВт})$$

Стоимость топлива для отдельных агрегатов примем равными:

$$a_1 = 500 \text{ тыс.ман/т}$$

$$a_2 = 400 \text{ тыс.ман/т}$$

$$a_3 = 600 \text{ тыс.ман/т}$$

Максимальные нагрузки агрегатов

$$P_{1 \text{ max}} = 10 \text{ МВт}$$

$$P_{2 \text{ max}} = 15 \text{ МВт}$$

$$P_{3 \text{ max}} = 8 \text{ МВт}$$

Тариф на покупную электроэнергию рассмотрим в трех вариантах

$$a_{\text{э}1} = 240 \text{ тыс.ман/МВт},$$

$$a_{\text{э}2} = 300 \text{ тыс.ман/МВт},$$

$$a_{\text{э}3} = 400 \text{ тыс.ман/МВт}.$$

Максимальная нагрузка предприятия  $P_{n \text{ max}} = 25 \text{ МВт}$ .

Рассмотрим задачу для следующих значений мощности: 60%, 80%, 100%.

На рис.2 представлены ХОП стоимости топлива агрегатов, суммарная ХОП станции и тарифная характеристика покупной электроэнергии.

В таблице 1 представлено в соответствии с рис.2 распределение нагрузки в 25, 20, 15 мВт при различных стоимостях покупной электроэнергии.

Таблица 1

режим	$P_n$	$a_3 = 120 \text{ тыс.ман/МВт}$				$a_3 = 150 \text{ тыс.ман/МВт}$				$a_3 = 200 \text{ тыс.ман/МВт}$			
		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_3$
1	25	3,5	2,5	1,5	17,5	7,5	5,5	3,5	8,5	10,0	9,0	6,0	-
2	20	3,5	2,5	1,5	12,5	7,5	5,5	3,5	3,5	9,0	7,0	4,0	-
3	15	3,5	2,5	1,5	7,5	7,0	5,0	3,0	-	7,0	5,0	3,0	-

б) Теплофикационная электростанция.

Для теплофикационной электростанции необходимо дополнительно учитывать отбор пара на производственные и бытовые нужды (отопление). В соответствии с [8], здесь оптимизацию удобнее всего вести по зависимости мощности турбины от расхода свежего пара, которая имеет вид, представленный на рис.3.

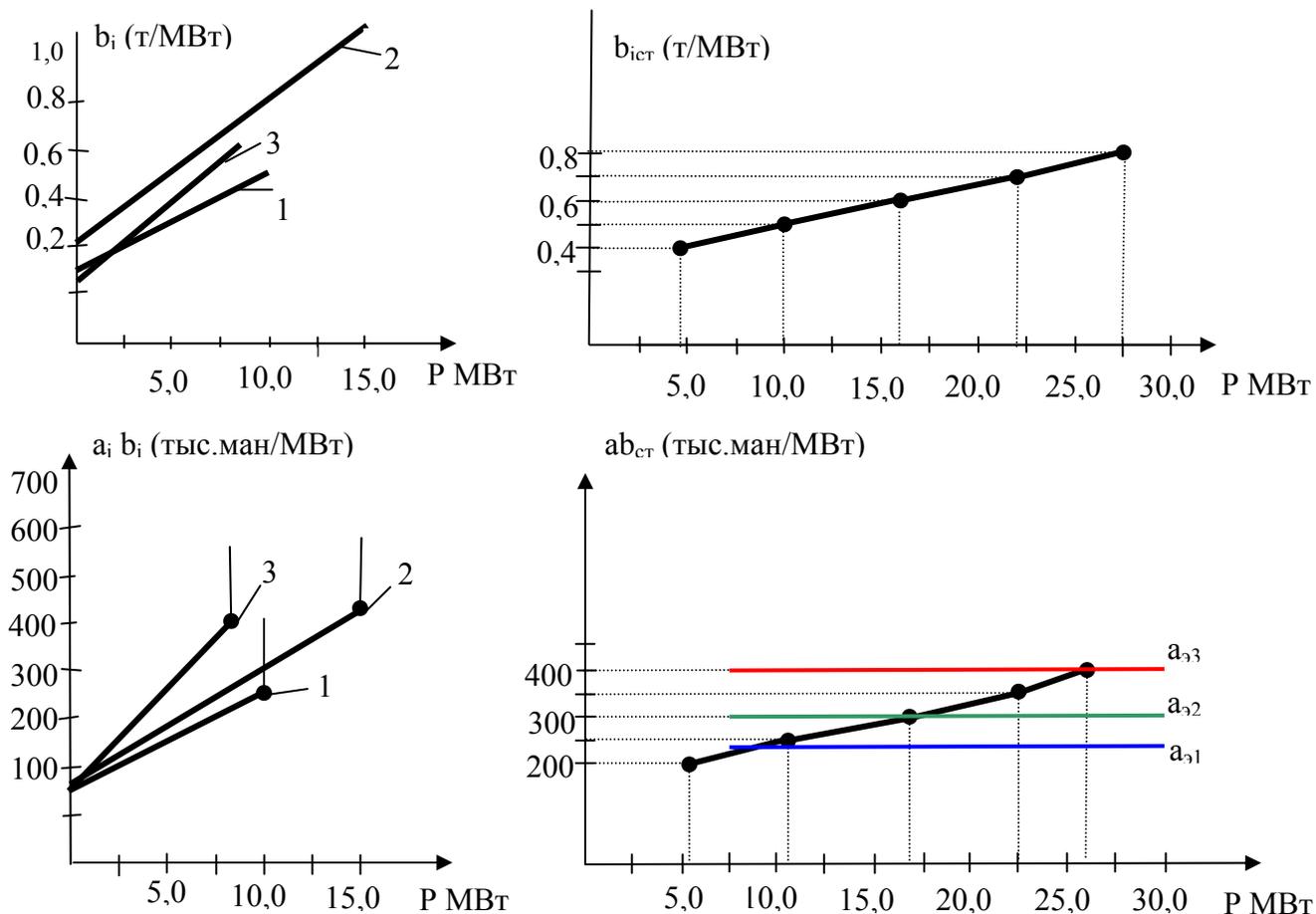


Рис.2

На рисунке  $(P_{от} / P_0)=k$ , представляет долю отбора от мощности турбины, которая должна задаваться в качестве исходных данных. Для удобства пользования характеристикой рис.3 установлена регрессионная зависимость расхода пара от электрической нагрузки генератора  $P_G$  и мощности идущей на отбор, составляющей от 0,4% до 56%.

Наилучшие результаты дает линейная регрессия. Уравнение регрессии для агрегата мощности до 16 МВт имеет следующий вид

$$V=0,66+0,153 P_G+0,1 P_{от} \quad (т)$$

где  $P_G$  – мощность генератора (МВт);

$P_{от}$  – мощность отбора, принимается  $P_{от}=KP_G$ ;

$K$  - доля отбора ( $K=0,04-0,56$ ).

Принимая во внимание, что  $P_{от}=KP_G$ , расходная характеристика агрегата принимает следующий вид

$$V=0,66+(0,153 +0,1K) P_G$$

а выражение для относительного прироста расхода топлива

$$b_i=0,153 +0,1K_i$$

Полученное выражение показывает, что ХОП является семейством горизонтальных линий, определяемых долей отбора.

Рассмотрим распределение суммарной нагрузки предприятия между тремя агрегатами электростанции и покупной электроэнергией при разных значениях отбора.

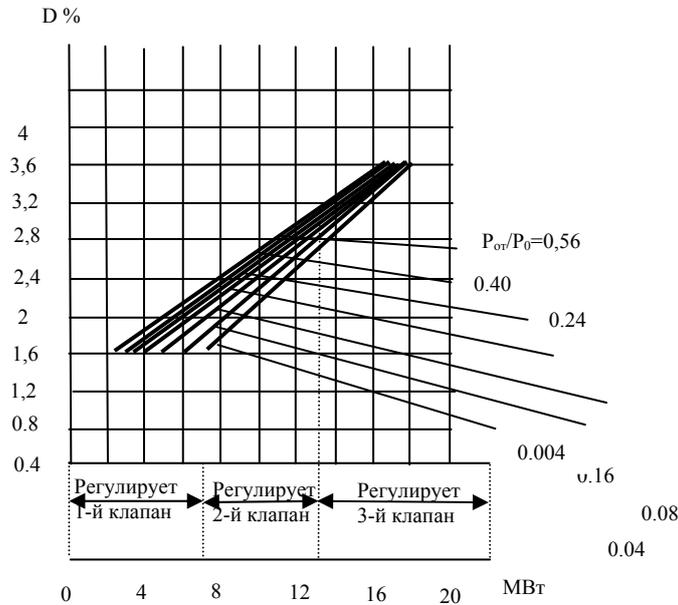


Рис.3

Примем следующие расходные характеристики агрегатов:

$$B_1 = 0,66 + 0,153 P_1 + 0,1 P_{от1}$$

$$B_2 = 0,75 + 0,165 P_2 + 0,12 P_{от2}$$

$$B_3 = 0,6 + 0,145 P_3 + 0,08 P_{от3}$$

ХОП расхода топлива

$$b_1 = 0,153 + 0,1K_1$$

$$b_2 = 0,165 + 0,12K_2$$

$$b_3 = 0,145 + 0,08K_3$$

Для всех агрегатов примем стоимость топлива  $a=750$  тыс.ман/т, тогда стоимость относительного прироста расхода топлива для каждого агрегата при различных значениях  $K$  будут

$$K=0 \quad b_1' = 114,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_2' = 123,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_3' = 108,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}$$

$$K=0,2 \quad b_1' = 129,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_2' = 141,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_3' = 120,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}$$

$$K=0,4 \quad b_1' = 144,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_2' = 159,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_3' = 132,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}$$

$$K=0,5 \quad b_1' = 152,25 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_2' = 168,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}; \quad b_3' = 138,75 \frac{\text{ман}}{\text{кВт}}$$

Распределение нагрузок между агрегатами и значение покупной энергии при  $K=0,2-0,5$  и  $a_3=150$  ман/кВт представлено в таблице 2

Таблица 2

режим	$P_n$	$a_3=150$ ман/кВт.ч															
		K=0,2				K=0,3				K=0,4				K=0,5			
		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_3$
1	25	10	7	8	-	10	-	8	7	10	-	8	7	-	-	8	17
2	20	10	2	8	-	10	-	8	2	10	-	8	2	-	-	8	12
3	15	7	-	8	-	7	-	8	-	7	-	8	-	-	-	8	7

Случаи, когда агрегат не имеет электрическую нагрузку, означает, что он работает только на отбор (теплофикационный режим).

---

1. *Малофеев А.В.* Определение экономически целесообразной загрузки электростанций промышленного предприятия методом динамического программирования. // Изв. ВУЗ-ов. Электромеханика, 2004.- №2.

## **ENERJİSİSTEMDƏ SƏNAYE ELEKTRİK STANSİYASININ OPTİMAL İŞ REJİMİNİN SEÇİLMƏSİ**

**MƏMMƏDYAROV O.S., NƏSİBOV V.X., ZƏRBİYEVA N.F., SÜLEYMANLI L.E.**

Sənaye müəssisəsinə lazım olan enerjinin enerji sistemdən və sənaye müəssisələrinin elektrik stansiyalarının aqreqatları arasında yükün paylanması zəminində sənaye müəssisəsinin elektrik stansiyalarının optimal iş rejiminin seçilməsi metodikası təklif olunmuşdur. Kondensat və tərlofikasion dövrəsində elektrik stansiyasının rejimlərinə baxılmışdır.

## **OPTIMUM OPERATIONAL MODE OPTION OF INDUSTRIAL POWER PLANT IN POWER SYSTEM**

**MAMEDYAROV O.S., NASIBOV V.Kh., ZARBIEVA N.F., SULEYMANLI L.E.**

The methods of optimum mode option of industrial enterprise's electric power plant on load distribution between power plant units and purchased from power system the electric power are offered. The electric power plant modes in condensation and power-and-heat supply cycles are considered.