

ЭНЕРГЕТИКА

Э. А. АМАТУНИ

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА
 СЛОЖНЫХ ТЭЦ

Рассматривается оптимальное распределение электрической и тепловых нагрузок различных параметров между агрегатами ТЭЦ (турбоагрегатами, котлоагрегатами, РОУ) при условии, что заданы тепловые схемы ТЭЦ, суммарные электрические и тепловые нагрузки, состав работающего оборудования с их энергетическими характеристиками. В общем виде энергетические характеристики турбин представляются в виде полиномов, доходящих до четвертой степени (для турбин типа «ПТ» и «Т»), а также в виде гладких невыпуклых функций с несколькими точками излома (для турбин типа «Р») и представляются следующими функциями и неравенствами.

а. Турбины типа «ПТ»:

$$Q = Q(P, x, y), \quad (1)$$

$$x^*(P, y) - x \geq 0, \quad (2)$$

$$P^*(x, y) - P \geq 0, \quad P - P^0(x, y) \leq 0, \quad (3)$$

где Q — расход тепла на турбину; P — электрическая мощность турбины; y — величина производственного отбора; x — отбор тепла на теплофикацию; x^* — максимально возможная теплофикационная нагрузка при заданных P и y ; P^* и P^0 — соответственно максимально и минимально возможные мощности при заданных x и y . Функции x^* , P^* и P^0 представляются также в виде полиномов.

б. Турбины типа «Т» могут работать с трехступенчатой, двухступенчатой (по тепловому и электрическому графику) схемами подогрева сетевой воды, а также в чисто конденсационном режиме. Каждый из этих режимов представляется своей энергетической характеристикой. В общем виде энергетическая характеристика турбины типа «Т» представляется в виде:

$$Q = Q(\tau_1, \tau_2, W_{св}, x, P_{к}, \theta), \quad (4)$$

$$x^*(P(x), P_{к}(x), \theta) - x \geq 0, \quad (5)$$

где τ_1, τ_2 — температура сетевой воды за бойлерами и перед бойлерами; $W_{св}$ — расход сетевой воды через бойлеры; $P_{к}$ — давление в верхнем теплофикационном отборе; $P_{к}$ — конденсационная мощность,

вырабатываемая за счет дополнительного расхода пара в конденсаторе сверх вентиляционного расхода; X^* — максимально возможная тепловая нагрузка турбины; θ — параметр, характеризующий режим работы турбины ($\theta=0$ — конденсационный режим, $\theta=1$ — режим с трехступенчатой схемой подогрева сетевой воды, $\theta=2$ — режим с двухступенчатой схемой подогрева сетевой воды при работе по тепловому графику, $\theta=3$ — двухступенчатый подогрев при работе по электрическому графику).

в. Турбины типа «Р»:

$$Q = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i (P - a_i), \quad P = c_0 + \sum_{j=1}^3 \lambda_j (y - c_j), \quad (6)$$

где $a_0, a_i, a_i, c_0, c_j, \lambda_j$ — постоянные коэффициенты. Здесь вычисление вторых и последующих членов производится только в случае принятия аргументом значений, превосходящих вычитаемую от него в скобках численную величину.

В настоящее время существует большое разнообразие методов решения задач выпуклого нелинейного программирования [1, 2, 3], что, прежде всего, указывает на сложность проблемы поиска и трудности, связанные с оценкой эффективности использования того или иного метода решения задачи. Для решения задач нелинейного невыпуклого программирования, к которым относится рассматриваемая задача оптимизации режима сложных ТЭЦ (в силу невыпуклости энергетических характеристик турбин), возникают дополнительные трудности, связанные с тем, что в рассматриваемой области изменения переменных может быть не один, а несколько минимумов, и первый найденный минимум может быть не абсолютным. В настоящее время нет общего эффективного метода преодоления этой трудности. Учитывая отсутствие общего решения и строгих доказательств сходимости алгоритмов невыпуклого нелинейного программирования, в АрмНИИ Энергетики разработан специальный алгоритм, основанный на применении комбинации метода проектирования градиентов [4], обеспечивающего спуск в локальный минимум, с методом «оврагов» [5], позволяющим выходить из областей локальных минимумов с целью отыскания глобального.

Предметом настоящей статьи является применение метода проектирования градиентов, обеспечивающего спуск в локальный минимум, для оптимизации режима сложных ТЭЦ, включающих сочтения турбин типов «ПТ», «Т», «Р».

Постановка и решение задачи. В математической постановке рассматривается задача нахождения минимума нелинейной функции

$$F = \sum_{i=1}^r B_i(Q_i) \quad (7)$$

при ограничениях, заданных в виде равенств и неравенств:

1. Условие баланса тепла по паропроводу острого пара

$$g_1 = \sum_{i=1}^l Q_i(P_i, x_i, y_i) + \sum_{i=l+1}^h Q_i(P_i, x_i) + \sum_{i=h+1}^q Q_i(P_i, y_i) + \\ + \sum_{i=q+1}^k Q_i(P_i) + \sum_{j=1}^l Q_j^R(z_j) - \sum_{i=1}^r Q_i^A = 0. \quad (8)$$

2. Условие баланса электрической мощности по станции

$$g_2 = \sum_{i=1}^n P_i - N = 0. \quad (9)$$

3. Условие баланса по теплу, отпускаемому на теплофикацию

$$g_3 = \sum_{i=1}^k x_i - Q_T = 0. \quad (10)$$

4. Условие баланса пара, отпускаемого из j -го коллектора на производство

$$g_s = \sum_{i=1}^k K_{ij} y_i + z_j - D_j = 0; \quad j = 1, \dots, \xi; \quad s = 3 + j. \quad (11)$$

5. Условия, отражающие режимные ограничения турбин типов «ПТ» и «Т»:

$$g_j = x_i^*(P_i, y_i) - x_i \geq 0; \quad i = 1, \dots, l; \quad j = \xi + 3i - 2; \\ g_s = P_i^*(x_i, y_i) - P_i \geq 0; \quad s = j + 1; \quad (12)$$

$$g_d = P_i - P_i^0(x_i, y_i) \geq 0; \quad d = j + 2; \\ g_l = x_i^*(P_i(x_i), P_{\text{max}}(x_i), \theta) - x_i \geq 0; \quad (13)$$

$$i = l + 1, \dots, h; \quad j = 3l + \xi + l,$$

С целью удобства дальнейших выкладок, условия (12) и (13) представим одинаковой записью:

$$g_j = \varphi_j(P_i, x_i, y_i) \geq 0; \quad (14)$$

$$j = 1 + \xi, \dots, m; \quad m = \xi + 3l + (h - l).$$

6. Условия, накладываемые на область изменения переменных:

$$P^0 \leq P \leq P^*; \quad X^0 \leq X \leq X^*; \quad Y^0 \leq Y \leq Y^*; \\ Z^0 \leq Z \leq Z^*; \quad Q^{s0} \leq Q^s \leq Q^{s*}, \quad (15)$$

где B_i и Q_i^A — соответственно расход топлива и тепловая нагрузки i -го котлоагрегата; r — число котлов на станции; l — число турбин типа „ПТ“; h — число турбин типов „ПТ“ и „Т“; n — общее число турбин на станции; Q_T^R и z_j — соответственно расход тепла и пара

через i -й РОН; ξ — число коллекторов, отпускающих пар на производство; N , Q , и D_j — соответственно заданные суммарные, электрическая мощность, теплофикационная нагрузка и производственные отборы с j -го коллектора; K_{ij} — постоянный коэффициент, указывающий на наличие связи i -й турбины с j -м коллектором ($K_{ij} = 1$, если i -я турбина связана с j -м коллектором и $K_{ij} = 0$ в противном случае); верхними индексами „0“ и „*“ обозначены, соответственно, минимальные и максимальные значения переменных.

Вводя так называемые свободные переменные $V(v_1, \dots, v_m)$, можно ограничения, заданные в виде неравенств (14), преобразовать в равенства

$$g_j = \varphi_j(P_i, x_i, y_i) - v_j^* = 0; \quad j = 1 + \xi, \dots, m. \quad (16)$$

Тогда задача сводится к нахождению минимума функций (7) при наличии ограничений в виде равенств $g_j(U) = 0$ ($j = 1, \dots, m$) и неравенств $U^0 \leq U \leq U^*$, где $U(P, X, Y, Z, V)$ — $3n + m + \xi$ -мерный вектор искоемых переменных.

Решение задачи начинается с произвольного задания переменных \hat{U} так, чтобы выполнялись условия (9), (10), (11) и (15). При этом для заданной точки \hat{U} в общем случае будут справедливы соотношения $g_j(\hat{U}) = b_j$ ($j = 1, \dots, m$), в которых, по крайней мере, некоторые из b_j отличны от нуля. Осуществляя спуск по направлению нормали к гиперповерхности ограничений $g_j(U) = 0$, можно попасть в точку $U_0 = \hat{U} - S(U_0)$, расположенную на этой гиперповерхности, где $S(U)$ — вектор, совпадающий по направлению с вектором нормали к гиперповерхности ограничений. Поскольку точка U_0 заранее неизвестна, то в первом приближении можно считать, что $S(U_0) \approx S(\hat{U})$. Вектор $S(\hat{U})$ характеризует направление и величину шага, с помощью которого можно попасть на гиперповерхность ограничений: $G(U_0) = 0$,

$$S(\hat{U}) = A^*(\hat{U})\delta, \quad (17)$$

где вектор δ определяется из системы

$$A(\hat{U})\delta = G(\hat{U}), \quad (18)$$

где $G(\hat{U})$ — m -мерный вектор с компонентами $g_j(\hat{U})$; $A(U) = m \times (3n + m)$ матрица с элементами $\partial g_j / \partial U$. Если после выполнения найденного таким образом шага, ограничения $G=0$ еще не будут соблюдаться, то можно сделать еще один шаг с использованием рассмотренного выше метода.

После того, как вычислен начальный вектор переменных U_0 , осуществляется процесс проектирования вектора-градиента целевой функции ∇F на направление, касательное к гиперповерхности ограничений

[4]. При этом, новые значения переменных на $\tau+1$ -м шаге, дающем наибольшее уменьшение величины F , определяются зависимостью

$$U^{(\tau+1)} = U^{(\tau)} - T^{(\tau)} d^{(\tau)}, \quad (19)$$

здесь T — вектор, касательный к гиперповерхности ограничений, определяемый из соотношения

$$T = \tau F(U) + A^T(U) W, \quad (20)$$

где $W = [w_1, \dots, w_m]$ — m -мерный вектор-столбец, элементами которого являются множители Лагранжа, определяемые из системы линейных уравнений

$$A(U) A^T(U) W = -A(U) \tau F(U); \quad (21)$$

d — скаляр, величина которого равна длине шага из точки U в направлении T .

В направлении вектора T делается один или несколько шагов, пока не нарушается условие

$$\sum_{j=1}^m [g_j(U)]^2 \leq \varepsilon_0, \quad (22)$$

где ε_0 — заданная величина, определяющая некоторую допустимую окрестность гиперповерхности ограничений. После этого производится спуск на гиперповерхность ограничений по направлению к нормали.

В качестве критерия окончания процесса оптимизации методом проектирования градиентов принимается соотношение

$$|F(U^{(\tau)}) - F(U^{(\tau-1)})| \leq \varepsilon, \quad (23)$$

здесь ε — заданное малое положительное число, зависящее от требуемой точности.

Из полученной точки делается большой дополнительный $\tau+1$ -й шаг и выясняется соотношение $F(U^{(\tau+1)})$ и $F(U^{(\tau)})$. Если $F^{(\tau+1)} < F^{(\tau)}$ и, одновременно, $|F^{(\tau+1)} - F^{(\tau)}| > \varepsilon$, то процесс решения задачи продолжается описанным выше способом. Если $F^{(\tau+1)} \geq F^{(\tau)}$, то имеет место локальный минимум в точке $U^{(\tau)}$. Из полученной точки локального минимума решение задачи продолжается методом „оврагов“.

Вычислительная схема алгоритма и результаты расчетов. На основе описанного выше метода составлен алгоритм оптимизации режима работы сложных ТЭЦ, который сводится к следующему:

1. Произвольно задаются значения переменных \dot{U} с обеспечением условий (9), (10), (11) и (15).
2. Вычисляется начальная точка U_0 , удовлетворяющая ограничениям

$$g_j(U_0) = 0 \quad (j = 1, \dots, m) \quad \text{и} \quad U^0 \leq U \leq U^*.$$

3. Вычисляются компоненты вектор-градиентов $\nabla F(U)$, $\nabla G(U)$.
4. Вычисляются множители Лагранжа $W(w_1, \dots, w_m)$.
5. По соотношению (20) определяются компоненты вектора T .
6. По зависимости (19) вычисляются новые значения переменных U^{i+1} , причем величина шага d выбирается так, чтобы уменьшение функции F в направлении T было наибольшим.

7. Проверяются условия $U^0 \leq U \leq U^*$ и, если они удовлетворены, то осуществляется переход к п. 8, если они нарушены для одной или сразу для нескольких переменных, то осуществляется пересчет шага T по формуле $d = \Delta U / T$, где $\Delta U = \max \|\Delta U^0\|, \|\Delta U^*\|$; $\Delta U^* = U^{i+1} - U^*$; $\Delta U^0 = U^0 - U^{i+1}$.

8. Проверяется условие (22), если оно удовлетворено, то осуществляется переход к п. 9; если нет, осуществляется спуск на гиперповерхность ограничений по направлению нормали к $G(U^{i+1})$.

9. Проверяется условие (23), если оно не удовлетворено, то процесс решения задачи повторяется с п. 3, если оно удовлетворено, то делается дополнительный шаг d_0 и если $F(U^{i+1}) < F(U)$ и одновременно $|F(U^{i+1}) - F(U)| > \epsilon$ осуществляется переход к п. 3, если же $F(U^{i+1}) \geq F(U)$, то решение задачи продолжается методом „оврагов“.

Описанный алгоритм реализован в виде ФОРТРАН-программы на ЭВМ ЕС-1020 для оптимизации режимов ТЭЦ Башкирэнерго.

Здесь приводятся результаты расчетов для одной ТЭЦ Башкирэнерго, схема которой представлена на рис. 1. Рассматриваемая ТЭЦ опускает пар давлением 1; 2; 10 и 16 атa. Котельная группа состоит из десяти котлов: котлы № 1, 2, 3—ТП-41 составляют котельную группу среднего давления, а котлы 4-10—ТГМ—высокого давления.

Котельные группы среднего и высокого давлений связаны между собой через РОУ 140/100. Турбинная группа состоит из десяти турбоагрегатов: № 1,2—ПТ-25-3М; № 3—ПТ-25-4; № 4—ПТ-60-130; № 6—Т-100-130 и № 7-10—Р-50-130.

Рассматривается оптимизация режима станции при $N = 373,4 \text{ МВт}$, $Q_0 = 128 \text{ Гкал/ч}$, $D_1 = 1102 \text{ т/ч}$, $D_2 = 245 \text{ т/ч}$.

На рис. 2 приведен график изменения значений целевой функции от числа итераций. В произвольно заданной начальной точке \hat{U} некоторые из условий (14) нарушены, т. е. начальный режим станции является фиктивным. Действительный режим U_0 , удовлетворяющий ограничениям задачи, получен после 6-й итерации. Результаты реализации алгоритма, основанного на методе проектирования градиентов, после 1-й и 28-й итераций, при которых процессе сошелся, приведены в табл. 1. Экономия топлива за счет оптимизации $\Delta F = 2,7 \text{ т/ч}$, что составляет 1,8% от величины суммарного расхода топлива на ТЭЦ.

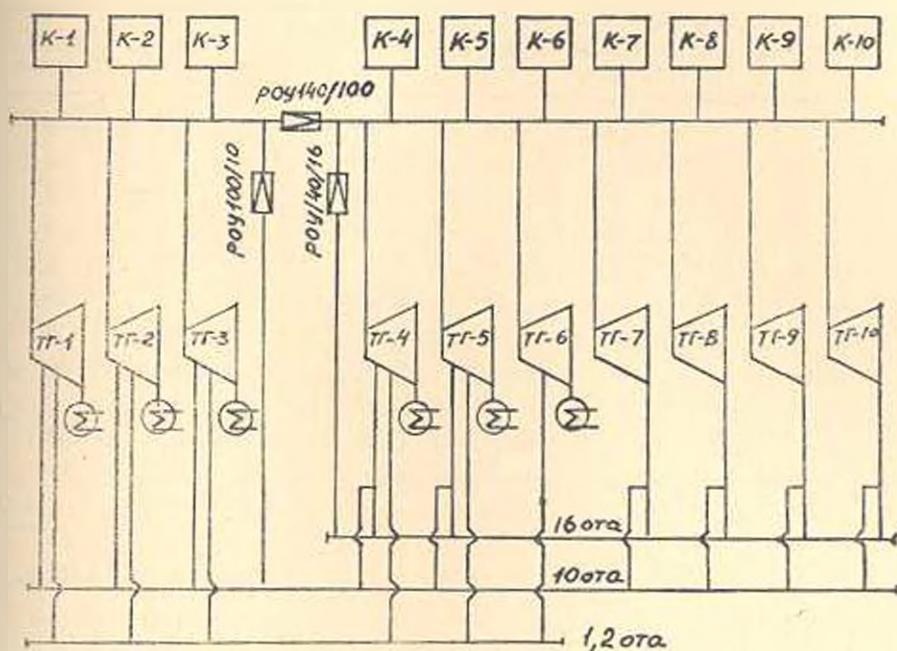


Рис. 1.

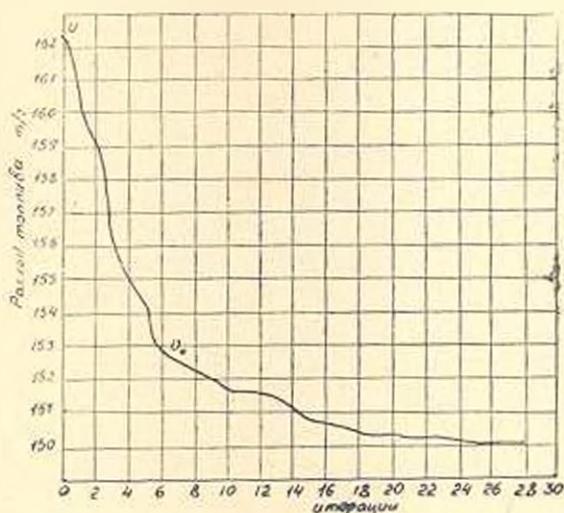


Рис. 2.

Анализ проведенных расчетов показал, что решение задачи сходится к локальному минимуму за 25—30 итераций; время счета одной итерации на ЭВМ ЕС-1020 составляет от восьми до десяти секунд; общее время решения задачи около 5 минут.

Таблица 1

№ т. г.	$\tau = 0$				$\tau = 28$			
	P МВт	X Гкал/час	$Y_{10 \text{ ата}}$ т/час	$Y_{16 \text{ ата}}$ т/час	P МВт	X Гкал/час	$Y_{10 \text{ ата}}$ т/час	$Y_{16 \text{ ата}}$ т/час
1	25,65	21,28	87,21	0	3,50	2,00	5,00	0
2	25,65	21,28	87,21	0	3,50	2,00	5,00	0
3	21,65	19,74	73,50	0	22,92	10,58	90,79	0
4	40,99	32,85	131,05	0	60,00	37,23	84,76	0
5	40,97	32,85	0	34,1	60,00	76,19	0	5,0
6	66,29	0	0	0	34,80	0	0	0
7	37,97	0	241,00	0	52,27	0	305,48	0
8	37,97	0	241,00	0	52,27	0	305,48	0
9	37,97	0	241,00	0	52,27	0	305,48	0
10	37,97	0	0	210,9	31,81	0	0	240,0
$F = 162,5 \text{ т/час}$					$F = 150,2 \text{ т/час}$			

АрмНИИЭ

Поступило 15.VII.1976

Է. Հ. ԱՄԱՏՈՒՆԻ

ԲԱՐԴ ԶԷԿ-ԵՐԻ ԻՆՏԻՄՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԻԶԱՑԻԱՅԻ
ԽՎԱՅԻՆ ՄԵԹՈԴ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Հողվածում դիտվում է բարդ ՋէԿ-երի ռեժիմների օպտիմիզացիայի խնդրի լուծումը պրագմենտների պրոլեկցիայի մեթոդով, որը թույլ է տալիս դանել լոկալ մինիմումը: Հաշվարկները ցույց են տվել, որ խնդրի լուծման խանրացիոն պրոցեսը գույամիավում է լոկալ մինիմումի կետում՝ միջին հաշվով 25—30 խանրացիայից հետո, իսկ լուծման ընդհանուր ժամանակը կազմում է 5÷6 րոպե:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Фиацко А., Мак-Корлик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной минимизации. Изд. «Мир», 1972.
2. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. Изд. «Мир», 1967.
3. Полак Э. Численные методы оптимизации. Изд. «Мир», 1974.
4. Лейтман Дж. и др. Методы оптимизации с приложениями к механике космического полета. Изд. «Наука», 1965.
5. Гельфанд И. М. и др. Метод орбит в задачах рентгеноструктурного анализа. Изд. «Наука», 1966.