

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОФИКАЦИИ НА ТЭЦ

Е.В. БАРОЧКИН, В.П. ЖУКОВ, доктора техн. наук, А.А. БОРИСОВ, асп.

Сформулирована задача оптимального распределения нагрузки на ТЭЦ и предложен модифицированный метод множителей Лагранжа для ее решения, учитывающий ограничения по суммарной нагрузке и ограничения по допустимой области значений параметров каждого агрегата. Приведен пример решения оптимизационной задачи.

Ключевые слова: энергосбережение, энергетические характеристики, методы многомерной оптимизации, распределение нагрузки.

DEVELOPING CALCULATION AND OPTIMIZATION METHODS OF HEAT SUPPLY SYSTEMS AT HEAT POWER STATIONS

E.V. BAROCHKIN, V.P. ZHUKOV, Doctors of Engineering, A.A. BORISOV, Post Graduate Student

The authors solve the problem of optimum load distribution at heat power stations and suggest the modified method of Lagrangian coefficients for its solution. This method takes into account the limits to total load and to legitimate range of each unit's parameters points. The example of optimization task solution is given.

Key words: energy efficiency, power characteristics, methods of multidimensional optimization, load distribution.

Условия функционирования энергетических предприятий в настоящее время существенно отличаются от условий, для которых они проектировались и сооружались. Это приводит к их эксплуатации в нерасчетных и неэффективных режимах. В связи с этим оптимальное распределение нагрузки оборудования ТЭЦ для заданной суммарной нагрузки является актуальной задачей.

Оптимизационная задача выбора загрузки оборудования ТЭЦ, схема которой приведена на рисунке, формулируется следующим образом: оптимально распределить заданную электрическую и тепловую нагрузки между турбоагрегатами для обеспечения минимального суммарного расхода тепловой энергии [1]:

$$F_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^n N_i \times q_i(Q_{ni}, Q_{mi}, N_i) \longrightarrow \min_{Q_{ni}, Q_{mi}, N_i}, \quad (1)$$

где Q_n , Q_m – тепловые нагрузки производственного и теплофикационного отборов пара соответственно; N – электрическая мощность турбогенератора; q – удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии; n – количество турбоагрегатов, участвующих в распределении нагрузки; индекс i показывает номер агрегата.

Суммарные значения тепловых и электрических нагрузок, которые необходимо распределить, считаются заданными и записываются в виде ограничений

$$Q_n = \sum_{i=1}^n Q_{ni}; \quad Q_m = \sum_{i=1}^n Q_{mi}; \quad N = \sum_{i=1}^n N_i. \quad (2)$$

Математическая модель энергетического оборудования традиционно представляется в виде графических энергетических характеристик $q_i(Q_{ni}, Q_{mi}, N_i)$ [2, 3]. Получение приемлемых для компьютерного анализа аналитических зависимостей энергетических характеристик

выполняется на основании специального расчетного анализа. Известные графические характеристики методом наименьших квадратов аппроксимируются линейными, квадратичными, кубическими, кусочно-кубическими зависимостями и кусочно-кубическими сплайнами. Для определения наиболее приемлемого вида зависимости, обеспечивающей необходимую точность, проведены численные эксперименты, результаты которых представлены в табл. 1. Значения средней погрешности R , приведенные в табл. 1, для оценки качества аппроксимации вычисляются согласно выражению

$$R = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - y_{ri}}{y_i} \right|, \quad (3)$$

где индекс r соответствует значению, рассчитанному по аппроксимирующей зависимости.

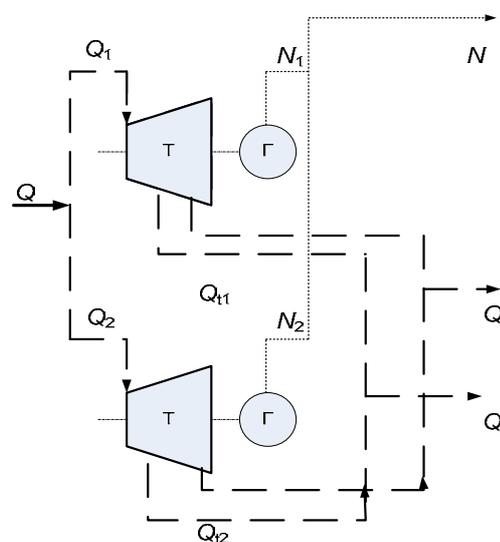


Схема отпусков электрической и тепловой энергии с ТЭЦ: Т – турбина; Г – генератор; штриховой линией показаны энергопоток с паром; пунктирной – с электрическим током

Таблица 1. Сопоставление математических описаний энергетических характеристик турбоагрегата ПТ-65/75-130/13

Вид аппроксимирующей функции	Энергетическая характеристика ПТ-65/75-130/13 ($x_1 = Q_p, x_2 = Q_t, x_3 = N, y = Q = q^*N, y_1 = q$)	Средняя погрешность R, %	Максимальная погрешность, %
Линейная аппроксимирующая зависимость для всей рабочей области	$y = 21456,20 - 330,36 \cdot x_1 - 647,24 \cdot x_2 + 1915,54 \cdot x_3$	1,15	(-5; 7)
Квадратичная аппроксимирующая зависимость для всей рабочей области	$y = 23603,98 - 322,34 \cdot x_1 - 695,02 \cdot x_2 + 1836,82 \cdot x_3 - 0,05 \cdot x_1^2 + 0,61 \cdot x_2^2 + 0,77 \cdot x_3^2$	1,01	(-4; 5,4)
Кубическая аппроксимирующая зависимость для всей рабочей области	$y = 4466,97 - 278,54 \cdot x_1 - 627,84 \cdot x_2 + 3150,58 \cdot x_3 - 0,99 \cdot x_1^2 - 1,30 \cdot x_2^2 - 27,81 \cdot x_3^2 + 0,01 \cdot x_1^3 + 0,01 \cdot x_2^3 + 0,19 \cdot x_3^3$	0,88	(-4,6; 5,7)
Кусочно-кубическая аппроксимирующая зависимость для заданных Q_p и Q_t	$y_1 = 526,25 + 56,295x_3 + 1,008895x_3^2 + 0,00692567x_3^3$ $Q_n = 0$ и $Q_m = 50$ Гкал/ч		0,05 %
Кусочно-кубические сплайны	$y_1 = c_{11} + x_3 \cdot (c_{12} + x_3 \cdot (c_{13} + x_3 \cdot c_{14}))$		0,01 %

Расчетный анализ показал, что наиболее точное описание энергетических характеристик обеспечивается кусочно-кубическими сплайнами. При этом относительная погрешность рассчитанных значений не превышает 0,01 %, что следует признать для инженерных расчетов более чем приемлемым результатом.

Найденные аналитические зависимости для энергетических характеристик позволили сформулировать и решить методом неопределенных множителей Лагранжа [4] задачу оптимального распределения нагрузки. Для этого целевая функция (1) с учетом ограничений (2) переписывается в виде

$$F^* = F_c - \lambda_1(Q_n - \sum_i Q_{ni}) - \lambda_2(Q_m - \sum_i Q_{mi}) - \lambda_3(N - \sum_i N_i) \longrightarrow \min_{Q_{ni}, Q_{mi}, N_i} \quad (4)$$

где λ_j – множители Лагранжа.

Для описания энергетических характеристик агрегатов используется квадратичная зависимость во всей рабочей области (см. табл. 1). Вычисляя производные целевой функции (4) и приравнявая их к нулю, получаем решение в следующем виде:

$$Q_{ni} = \frac{\lambda_1 - c_{2ii}}{2c_{5i}}; \quad Q_{mi} = \frac{\lambda_2 - c_{3i}}{2c_{6i}}; \quad N_i = \frac{\lambda_3 - c_{4i}}{2c_{7i}};$$

$$\lambda_1 = \frac{2Q_n + \sum \frac{c_{2i}}{c_{5i}}}{\sum \frac{1}{c_{5i}}}; \quad \lambda_2 = \frac{2Q_m + \sum \frac{c_{3i}}{c_{6i}}}{\sum \frac{1}{c_{6i}}};$$

$$\lambda_3 = \frac{2N + \sum \frac{c_{4i}}{c_{7i}}}{\sum \frac{1}{c_{7i}}}, \quad (5)$$

где параметры c_{ji} выбираются согласно табл. 1 (первый индекс показывает номер коэффициента аппроксимирующей зависимости, второй – номер турбоагрегата).

Результаты оптимального распределения нагрузки между четырьмя турбинами ПТ-65/75-130/13 для трех вариантов соотношения их характеристик приведены в табл. 2. Суммарные (распределенные) нагрузки составляют: $Q_p = 300$ Гкал/ч; $Q_T = 100$ Гкал/ч; $N = 220$ МВт. В первом варианте решения энергетические характеристики турбоагрегатов одинаковые; во втором – незначительно различные, в третьем – существенно различные. При одинаковых энергетических характеристиках оптимальная загрузка получается одинаковой для всех турбин. Если турбины имеют разные энергетические характеристики, то оптимальные нагрузки турбин соответственно различаются.

Таблица 2. Варианты оптимального распределения нагрузки между четырьмя турбинами ПТ-65/75-130/13

Анализируемые варианты	Оптимальное распределение нагрузки между четырьмя турбинами общей нагрузки: $N = 220$ МВт; $Q_T = 100$ Гкал/ч; $Q_p = 300$ Гкал/ч;			
	ТГ ₁	ТГ ₂	ТГ ₃	ТГ ₄
1. Одинаковые характеристики турбин с одинаковыми энергетическими характеристиками	N 55	55	55	55
	Q_T 25	25	25	25
	Q_p 75	75	75	75
2. Незначительно различные характеристики турбин	N 56,7	55,6	54,4	53,3
	Q_T 24,3	24,7	25,2	25,8
	Q_p 83,7	77,9	72,1	66,3
3. Существенно различные характеристики турбин	N 71,9	60,5	49,3	38,3
	Q_T 17,4	22,6	27,5	32,5
	Q_p 162,1	103,3	45,6	-11,0
4. Решение с учетом ограничений на область допустимых значений согласно (7) (исходные данные соответствуют варианту 3)	N 70,0	61,2	49,9	38,9
	Q_T 17,4	22,6	27,5	32,5
	Q_p 140,0	108,9	51,1	0

Анализ расчетных результатов показывает, что найденное решение (5) не учитывает технологических ограничений на область допустимых значений оптимизируемых параметров. В частности, для третьего варианта решения нагрузка четвертого турбоагрегата (Q_n) принимает даже отрицательное значение.

Для устранения этого противоречия была сформулирована и решена оптимизационная

задача с учетом технологических ограничений на допустимые нагрузки турбоагрегатов. Для каждой турбины и для каждого вида нагрузки вводятся ограничения на максимальное и минимальное допустимые значения в виде матриц минимальных X_{\min} и максимальных X_{\max} возможных нагрузок:

$$X_{\min} = \begin{bmatrix} Q_{n1}^{\min} & Q_{n2}^{\min} & \dots & Q_{nn}^{\min} \\ Q_{m1}^{\min} & Q_{m2}^{\min} & \dots & Q_{mn}^{\min} \\ N_1^{\min} & N_2^{\min} & \dots & N_n^{\min} \end{bmatrix};$$

$$X_{\max} = \begin{bmatrix} Q_{n1}^{\max} & Q_{n2}^{\max} & \dots & Q_{nn}^{\max} \\ Q_{m1}^{\max} & Q_{m2}^{\max} & \dots & Q_{mn}^{\max} \\ N_1^{\max} & N_2^{\max} & \dots & N_n^{\max} \end{bmatrix}.$$

Дополнительно вводится матрица признаков K , значения элементов которой равно 1, если нагрузка находится в допустимом диапазоне, и 0, если нагрузка выходит из указанного диапазона:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \in [x_{ij}^{\min}, x_{ij}^{\max}], \\ 0, & x_{ij} \notin [x_{ij}^{\min}, x_{ij}^{\max}]. \end{cases}$$

При значении параметра, выходящего из диапазона допустимых значений, ему присваивается предельное допустимое значение: если искомое значение получается меньше минимального, то – минимальное; если больше максимального, то – максимальное. Целевая функция (4) с учетом указанных ограничений записывается в виде

$$F^* = F_u - \lambda_1(Q_n - \sum_i k_{1i} Q_{ni}) - \lambda_2(Q_m - \sum_i k_{2i} Q_{mi}) - \lambda_3(N - \sum_i k_{3i} N_i) \longrightarrow \min_{Q_{ni}, Q_{mi}, N_i} \quad (6)$$

Найденное методом множителей Лагранжа решение задачи (6) с учетом ограничений нагрузок для каждого агрегата записывается в следующем виде:

Барочкин Евгений Витальевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций,
телефон (4932) 41-60-56.

Жуков Владимир Павлович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45,
E-mail: zhukov@ispu.ru

Борисов Антон Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры прикладной математики,
телефон (4932) 26-97-45.

$$\begin{aligned} Q_{ni} &= k_{1i} \frac{\lambda_1 - c_{2i}}{2c_{5i}}; & Q_{mi} &= k_{2i} \frac{\lambda_2 - c_{3i}}{2c_{6i}}; \\ N_i &= k_{3i} \frac{\lambda_3 - c_{4i}}{2c_{7i}}; & \lambda_1 &= \frac{2Q_n + \sum \frac{k_{1i} c_{2i}}{c_{5i}}}{\sum \frac{k_{1i}}{c_{5i}}}; \\ \lambda_2 &= \frac{2Q_m + \sum \frac{k_{2i} c_{3i}}{c_{6i}}}{\sum \frac{k_{2i}}{c_{6i}}}; & \lambda_3 &= \frac{2N + \sum \frac{k_{3i} c_{4i}}{c_{7i}}}{\sum \frac{k_{3i}}{c_{7i}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты решения оптимизационной задачи (7) приводятся в табл. 2 в качестве четвертого варианта решения. Анализ результатов показывает, что найденные оптимальные нагрузки находятся в допустимой области значений нагрузок для каждого агрегата. Следует отметить, что предложенный аналитический метод решения многомерной оптимизационной задачи, по сравнению с численными методами, существенно снижает временные затраты на получение решения, что особенно актуально при большом числе оптимизируемых параметров.

Решение сформулированной задачи позволяет в оперативном режиме определять оптимальные нагрузки энергетического оборудования и обеспечивать реализацию энергосберегающих технологий в энергетической отрасли.

Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009.
2. Качан А.Д. Оптимизация режимов и повышение эффективности работы паротурбинных установок ТЭС. – Минск: Высш. шк., 1985.
3. РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. – М.: СПО ОРГРЭС, 1993.
4. Вильсон Д. Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978.