

Л. П. Падалко, канд. техн. наук,
А. И. Баранников, Н. Н. Никольская

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ
МЕЖДУ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ ПРИ ТЕКУЩЕМ
ПЛАНИРОВАНИИ ОСНОВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В настоящее время в ряде энергосистем большое внимание уделяется разработке автоматизированной системы технико-экономического планирования. Главной задачей этой системы является распределение производства энергии между электростанциями системы. Несмотря на практическую актуальность этой задачи, она на сегодняшний день не имеет удовлетворительного решения. Это объясняется, с одной стороны, сложностью рассматриваемой задачи, а с другой – огромной трудоемкостью расчетов при использовании традиционного подхода на основе множественных расчетов режимов работы энергосистемы для характерных суточных периодов года. В этой связи возникает необходимость применения такого подхода к решению данной задачи, который был бы адекватен используемой исходной информации и практически приемлем для принятия плановых решений.

Общая постановка задачи выглядит следующим образом. Предполагается заданным суммарное производство электроэнергии (или отпуск с шин) на электростанциях системы Э, размеры отпуска тепловой энергии от каждой ТЭЦ за рассматриваемый плановый период. Требуется определить оптимальное распределение производства электроэнергии между электростанциями и на основе этого величину полного и удельного расходов топлива по каждой станции и в целом по системе.

Схема решения задачи включает два этапа. На первом этапе определяется выработка электроэнергии на каждой ТЭЦ по теплофикационному режиму ΣT_i . Возможны два подхода к решению этой задачи. Первый подход – это оптимизационный. При этом рассматривается задача оптимального распределения отпуска тепла между агрегатами ТЭЦ, формулируемая в самом общем виде как

$$\max \sum_{i=1}^m \varphi_i(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{тф}}); \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^{\text{п}} + Q_{\text{РОУ}}^{\text{п}} = Q_0^{\text{п}}; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^{\text{тф}} + Q_{\text{ПК}}^{\text{тф}} = Q_0^{\text{тф}}; \quad (3)$$

$$Q_{i \min}^{\text{п}} \leq Q_i^{\text{п}} \leq Q_{i \max}^{\text{п}}; \quad (4)$$

$$Q_{i \min}^{\text{тф}} \leq Q_i^{\text{тф}} \leq Q_{i \max}^{\text{тф}}. \quad (5)$$

Здесь $\varphi_i(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{тф}})$ - зависимость теплофикационной электрической энергии по i -му агрегату ТЭЦ от размеров отпуска тепловой энергии на производственные ($Q_i^{\text{п}}$) и теплофикационные ($Q_i^{\text{тф}}$) нужды; $Q_{\text{РОУ}}^{\text{п}}$ - отпуск тепла на производственные нужды через РОУ; $Q_{\text{ПК}}^{\text{тф}}$ - отпуск тепла на теплофикационные нужды от пиковых котлов; $Q_0^{\text{п}}$, $Q_0^{\text{тф}}$ - заданные размеры суммарного отпуска тепловой энергии на производственные и теплофикационные нужды.

Условия (4) и (5) означают ограничения на размеры отпуска тепла от агрегатов ТЭЦ.

Вследствие того, что в рассматриваемой задаче требуется не разработка технологического задания по режиму тепловой загрузки оборудования в течение рассматриваемого планового периода, а объективная оценка величины производства электроэнергии по теплофикационному режиму, это дает возможность использовать для решения задачи второй подход - статистический. Этот подход требует выявления тенденции изменения размера теплофикационной выработки и факторов, оказывающих влияние на этот показатель.

Задача, решаемая на втором этапе, формулируется в следующем виде:

$$\min \sum_{j=1}^n f_j(\Theta_j); \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \Theta_j = \Theta - \sum_{i=1}^m \Theta_i^r; \quad (7)$$

$$\min \Theta_j \leq \Theta_j \leq \max \Theta_j; \quad (8)$$

$$B_j^{\min} \leq f_j(\Theta_j) \leq B_j^{\max}. \quad (9)$$

Здесь функция $f_j(\Theta_j)$ выражает зависимость расхода топлива на j -й электростанции от величины производства электроэнергии на ней. Ограничения (7) характеризуют условие баланса, а неравенства (8) и (9) – ограничения соответственно по выработке энергии и расходу топлива.

Ввиду аддитивности целевой функции для решения задачи может быть использован метод динамического программирования. Рекуррентное соотношение Беллмана представляется в виде

$$h_k(\Theta) = \min \left\{ h_{k-1}(\Theta - \Theta_k) + f_k(\Theta_k) \right\}.$$

Укрупненная математическая модель (6) – (9) сформулирована при ряде упрощающих предположений. В частности, не учитывается влияние потерь энергии в сетях на результат распределения мощности и энергии между электростанциями. Этот фактор особенно может быть существенным в режиме повышенных нагрузок системы, когда относительные приросты отдельных станций с учетом потерь, определяемые по формуле

$$\varepsilon_i^l = \frac{\varepsilon_i(P_i)}{1 - \sigma_i(P_1, \dots, P_i, \dots, P_n)},$$

достигают своих максимальных значений. Это обстоятельство требует корректировки расходных характеристик отдельных станций, особенно в зоне максимальных значений выработки энергии Θ_j с тем, чтобы ограничить уровень загрузки этих станций. Необходимость корректировки указанных характеристик может оказаться необходимой также из-за наличия ограничений по пропускной способности электрической сети.

Весьма важен учет в модели реального режима работы отдельных электростанций. Например, режим работы высокоэкономичных КЭС, найденный на основе решения задачи (6)–(9), может оказаться близким к базовому, хотя, как известно, в настоящее время мощность КЭС используется для покрытия не только базовой, но и частично полупиковой и пиковой частей суточного графика электрических нагрузок. Для исключения такого решения следует в алгоритм расчета включить контроль допустимого режима работы отдельных электростанций. Для этого следует на основе анализа статистики работы КЭС за интересующий период времени выявить число часов использования h_y ее располагаемой мощности. Зная среднюю располагаемую мощность станции за рассчитываемый плановый период $N_{расп}$, определяемую по выражению

$$N_{расп} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i^{ед} t_i^p}{t_{кал}},$$

можно исключить из расчета те значения выработки станции Θ , которые не удовлетворяют условию $\Theta \leq N_{расп} (h_y + \epsilon)$. Здесь $N_i^{ед}$ – единичная мощность i -го агрегата; t_i^p – время нахождения i -го агрегата в работе и резерве; $t_{кал}$ – календарное время; ϵ – малая величина.

Наряду с оптимизационным подходом в решению задачи может быть использован также статистический подход. Производство электроэнергии в системе за какой-либо период можно представить в виде многомерного вектора Θ_t , компонентами которого являются значения производства электроэнергии на отдельных электростанциях $\Theta_t = (\Theta_{1t}, \Theta_{2t}, \dots, \Theta_{nt})$. Зная значения вектора Θ_t для времени t , предшествующего плановому периоду ($t = 1, 2, \dots, \tau$), можно поставить задачу прогнозирования многомерного временного ряда. Вследствие коррелированности значений Θ_{it} для решения рассматриваемой задачи целесообразно использование факторного анализа. По данным Θ_t , для ряда лет строится корреляционная матрица R размером $n \times n$, где n – число электростанций. Далее по матрице R строится матрица факторных нагрузок A , которая связывает векторы Θ с векторами F некоррелированных факторов

$$\Theta^* = A F. \quad (10)$$

Параметры Θ_{it}^* предварительно нормируются по формуле

$$\Theta_{it}^* = \frac{\Theta_{it} - m_{\Theta_i}}{\sigma_{\Theta_i}}, \quad (11)$$

где m_{Θ_i} , σ_{Θ_i} - оценки соответственно математического ожидания и среднеквадратического отклонения параметра Θ_i .

Если для определения некоррелированных факторов вектора F используется метод главных компонент, то число факторов равно числу элементов вектора Θ и факторы определяются из выражения

$$F = A^{-1} \Theta^*. \quad (12)$$

При использовании метода главных факторов размерность вектора F оказывается меньше размерности вектора Θ_t и для определения главных факторов применяются соответствующие методы факторного анализа

$$F = B \Theta^*,$$

где B - матрица обратного факторного отображения.

Так как главные факторы некоррелированы, их можно прогнозировать независимо друг от друга. В результате прогноз $\Theta_{\zeta+1}^*$ вычисляется как

$$\Theta_{\zeta+1}^* = B F_{\zeta+1},$$

а из выражения (11) определяется прогноз $\Theta_{\zeta+1}$.