ТЕОРІЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ

УДК 519.8

Н.Г. ЖУРБЕНКО, Ф.А. ШАРИФОВ

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫБОРА РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Рассматривается задача загрузки энергоблоков на среднесрочный период планирования. Предложен алгоритм, основанный на итеративной процедуре решения серии задач распределительного типа.

Рассматриваемая задача среднесрочного планирования загрузки энергоблоков региональной энергосистемы состоит в следующем. Планируемый период (например, сутки, неделя, месяц) состоит из T интервалов малых относительно планированного периода длительностей (например, час). Эти интервалы будем называть атомарными. Для каждого атомарного интервала t определена прогнозируемая потребность в генерируемой мощности $p^r(t)$.

Энергосистема состоит из n генерирующих энергоблоков. Каждый энергоблок j может находиться в активном (включенным) или пассивном (отключенным) состоянии. В активном состоянии энергоблок j может генерировать мощность в диапазоне $[\underline{p}_j, \overline{p}_j]$ (в дальнейшем, для компактности изложения, будем предполагать, что $\underline{p}_j = 0$). Перевод блока из пассивного в активное состояние требует некоторого времени и связан с определенными затратами. Удельные затраты на выработку блоком j единицы электроэнергии определяется заданной функцией $f_j(p)$ в зависимости от мощности, при которой работал этот блок. Таким образом, если энергоблок работает при мощности p время τ, то затрата на выработку электроэнергии $p\tau$ равна $f(p)p\tau$. Предполагается, что функция $f_j(p)$ выпукла, достигающая минимума при некоторой номинальной для данного блока мощности p_j^* (при этой мощности кпд блока максимально). Заметим, что реальная функция удельных затрат может быть более сложной, но для решения рассматриваемой задачи среднесрочного планирования можно удовлетвориться ее аппроксимацией функцией с указанными свойствами.

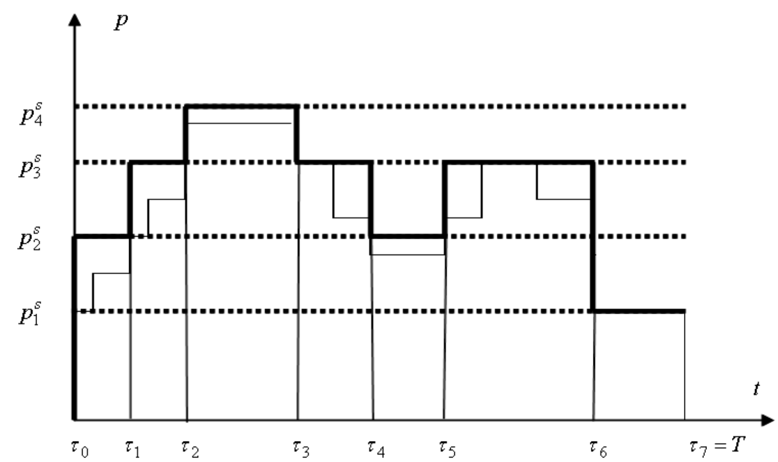
На содержательном уровне задача выбора режимов энергосистемы состоит в определении для каждого интервала планируемого периода: состояния энергоблоков; генерируемую мощность для работающих в данном интервале энергоблоков. При этом для каждого интервала t общая генерируемая мощность должна быть не менее требуемой $p^r(t)$. Целевая установка задачи состоит в минимизации общих затрат за плановый период и минимизации переключений состояний блоков. Кроме того, требуется определенная регулярность (цикличность) режимов работы энергоблоков. Это связано со следующими факторами. Динамика требуемой выходной мощности во времени характеризуется определенной цикличностью (например, по рабочим дням недели). Естественно чтобы режимы работы энергоблоков также обладали такими же характеристиками цикличности. Указанные обстоятельства (а также многие другие) показывают наличие трудно формализуемых факторов рассматриваемой задачи (это характерно для любой реальной задачи планирования управлением сложных технических систем). Адекватное отражение таких факторов формальной моделью задачи математического программирования практически невозможно. Но даже если такая модель (заведомо дискретного типа) построена, то трудности ее численной реализации неизбежно приведет к приближенному алгоритму эвристического характера. Наша цель – построение алгоритма, который по нашему мнению обеспечивает приемлемое решение задачи с учетом указанных необходимых его характеристик. На этом завершаем «философское» отступление, и переходим к изложению алгоритма. Отметим, что используемый в алгоритме принцип ограничения множества искомых решений был предложен В.А. Трубиным.

Для наглядности изложение алгоритма иллюстрируется на рисунке, на котором требуемая по интервалам планового периода мощность энергосистемы представлена графиком кусочно-постоянной функцией p_t^r (тонкие линии). Заметим, что общий требуемый объем электроэнергии за плановый период определяется площадью ограниченной графиком этой функции и осью t (подграфиком функции).

Будем считать, что задан набор «стандартных» уровней мощностей, которые обеспечивает энергосистема: $p_k^s, k = 1,\ldots,K$ (точнее только эти уровни и будут учитываться при решении задачи). Стандартные уровни мощностей упорядочены по возрастанию: $p_{k+1}^s > p_k^s$.

Определим кусочно-постоянную функцию $\tilde{p}^r(t)$, которая принимает значения из набора стандартных уровней $\{p_k^s\}$, аппроксимирует функцию $p^r(t)$

сверху (т. е. $\tilde{p}^r(t) \geq p^r(t)$) и имеет наименьшую площадь подграфика. Алгоритм определения этой функции достаточно прост и понятен из рисунка. График функции $\tilde{p}^r(t)$ представлен жирной линией. На рисунке представлены четыре стандартные уровни выходной мощности энергосистемы помечены пунктирными линиями. Функция $\tilde{p}^r(t)$ имеет семь временных интервалов $[\tau_i, \tau_{i+1}], i = 0, \ldots 6$, где функция принимает постоянное значение (например, на интервале $[\tau_0, \tau_1]$ $\tilde{p}^r(t) = p_2^s$).



РИСУНОК

Остановимся на задаче выбора «стандартных» уровней мощностей, которая является отдельной (сравнительно несложной) задачей, имеющей ясную физическую интерпретацию. Не останавливаясь на возможных вариантах ее решения, отметим основные требования к выбору «стандартных» уровней. Во-первых, алгоритм будет использовать функцию $\tilde{p}^r(t)$ в качестве требований по выходной мощности энергосистемы (взамен функции $p^r(t)$). Поэтому функция $\tilde{p}^r(t)$ должна обеспечивать приемлемую аппроксимацию функции спроса $p^r(t)$. Во-вторых, определяемые графиком $\tilde{p}^r(t)$ времена $\tau_i (i = 1, \ldots, I)$ будут являться моментами возможного включения/выключения энергоблоков. Отсюда следует, что длительности интервалов $[\tau_i, \tau_{i+1}]$ должны быть достаточны для включения (любого) энергоблока, находящегося в этом интервале в пассивном состоянии (разумеется, апостеори, это требование существенно лишь для энергоблоков, включаемых в следующем интервале $[\tau_{i+1}, \tau_{i+2}]$).

Переходим к изложению алгоритма решения.

Выходная мощность энергосистемы на минимальном «стандартном» уровне p_1^s будет обеспечиваться на интервале $[\tau_6, \tau_7]$. Пусть x_{j1} – (пока неизвестные) мощности энергоблоков, в сумме обеспечивающие этот уровень: $\sum_{j=1}^{n} x_{j1} = \Delta p_1 = p_1^s$ В предлагаемом алгоритме решения постулируется, что все энергоблоки j, для которых $x_{j1} > 0$, будут работать и на всем интервале $[\tau_0, \tau_7]$ с мощностью больше или равной x_{j1}. Таким образом, величину x_{j1} можно интерпретировать как долю мощности станции j, расходуемой на обеспечение генерацию $p_1^s \Delta t_1$, количества электроэнергии, где $\Delta t_1 = \tau_7$. Заметим, что этот объем электроэнергии равен площади множества S_1, являющегося пересечением подграфика функции $\tilde{p}^r(t)$ и полосы $\{0 \le p \le p_1^s\}$ (в данном случае это прямоугольник).

Пояснив первый уровень «стандартной» мощности, переходим к общему случаю уровня $k, k = 2, \ldots K$. Пусть Π_k – пересечение подграфика функции $\tilde{p}^r(t)$ и полосы $\{p_{k-1}^s \le p \le p_k^s\} (k = 2, \ldots K)$. В общем случае, Π_k – набор прямоугольников (два прямоугольника на рисунке для $k = 3$). Δt_k – общая длина проекции Π_k на временную ось (на рисунке $\Delta t_3 = (\tau_4 - \tau_1) + (\tau_6 - \tau_5)$). Пусть $\Delta p_k = p_k^s - p_{k-1}^s$, x_{jk} – (неизвестные) мощности энергоблоков, в сумме обеспечивающие мощность Δp_k : $\sum_{j=1}^{n} x_{jk} = \Delta p_k$. В предлагаемом алгоритме решения задачи постулируется, что эта доля одинакова для всех времен, принадлежащих проекции Π_k на временную ось. Такой принцип направлен на минимизацию числа включения/выключения энергоблоков и получения в определенном смысле регулярного решения. Заметим, что именно этот принцип ограничения множества допустимых решений x_{jk} был предложен В.А. Трубиным.

Предположим, что все величины x_{jk} определены. Тогда из определения x_{jk} справедливы следующие утверждения. На любом отрезке $\Delta\tau_i = [\tau_i, \tau_{i+1}]$ мощности всех энергоблоков постоянны. Отсюда следует, что включение/отключение станций возможны лишь в моменты τ_i. Если $k(i)$ – индекс уровня графика $\tilde{p}^r(t)$ на $\Delta\tau_i$, то мощность $p_j(t)$ энергоблока j для $t \in \Delta\tau_i$

определяется формулой: $p_j(t) = \sum_{k=1}^{k(i)} x_{jk}$. Очевидным образом определяется общее количество вырабатываемой энергоблоком j электроэнергии и (используя функцию удельных затрат $f_j(p)$) общие затраты, а, следовательно, и среднее значение удельных затрат энергоблока $c_j(x_{jk})$ (соответствующее решению x_{jk}). Таким образом, решение задачи сводится к определению x_{jk}.

Пусть средние значения удельных затрат энергоблоков c_j заданы. Тогда для определения x_{jk} используем следующую задачу:

$$\min \sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{K} c_j \Delta t_k x_{jk} \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jk} = p_k^s, k = 1, \ldots, K, \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_{jk} \le \overline{p}_j, j = 1, \ldots, n, \tag{3}$$

$$x_{jk} \ge 0, j = 1, \ldots, n, k = 1, \ldots, K. \tag{4}$$

В задаче (1)–(4) требует пояснения лишь целевая функция. Но легко видеть, что значение целевой функции равно суммарному значению затрат на выработку электроэнергии за плановый период.

Переходим к описанию итеративной процедуры определения x_{jk}. На первом шаге в качестве средних значений удельных затрат энергоблоков c_j выбираем некоторые их оценки $\tilde{c}_j^1$ (например, минимальные значения удельных затрат $\tilde{c}_j^1 = f_j(p_j^*)$). Решая задачу (1)–(4), получаем значения x_{jk}^1, соответствующие этим значениям c_j. На основании x_{jk}^1, как вышеуказано, легко определяются соответствующие этому решению средние значения удельных затрат $\hat{c}_j^1$. Если фактические значения удельных затрат $\hat{c}_j^1$ приемлемо близки к их оценочным значениям $\tilde{c}_j^1$, то решение получено. В противном случае, полагаем $\tilde{c}_j^2 = (\tilde{c}_j^1 + \hat{c}_j^1)/2$ – оценочные значений на второй итерации процедуры. Вторая и последующие итерации аналогичны описанному первому шагу.

Опыт использования такого рода процедур при решении реальных задач (например, [1]) показывает достаточно высокую их эффективность (для получения решения с приемлемой точностью достаточно порядка 10 итераций). По нашему мнению, эффективность процедуры для рассматриваемой задачи обеспечивается выпуклостью функций $f_j(p_j)$. Отметим, что задача (1)–(4) – это классическая транспортная задача, для которой имеются эффективные алгоритмы решения.

В настоящее время разрабатывается программная реализация описанного алгоритма с дополнительными средствами минимизации общего числа изменения состояния энергоблоков и учета степени маневренности энергоблоков по изменению выходной мощности.

Разумеется, при решении задачи выбора режимов энергосистемы на краткосрочный период (в которой состояния энергоблоков фиксированы) загрузка энергоблоков будет уточняться с более детальным учетом динамики требуемой выходной мощности по временным интервалам (например, [2]).

Н.Г. Журбенко, Ф.А. Шаріфов

ПРО ОДИН АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ ВИБОРУ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Розглядається задача завантаження енергоблоків на середньостроковий період планування. Запропоновано алгоритм, який базується на ітеративній процедурі розв'язку серії задач розподільного типу.

N.G. Zhurbenko, F.A. Sharifov

ON ONE ALGORITHM FOR SOLVING PROBLEM OF CHOICE OF ENERGY SYSTEM MODES

The problem of load of power units for the medium term planning is considered. The proposed algorithm is based on an iterative procedure for solving a series of problems of distribution type.

1. *Журбенко Н.Г., Чумаков Б.М.* Метод модельных теплообменников в расчетах тепловых схем // Теорія оптимальних рішень. – Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2009. – № 8. – С. 142–147.
2. *Шарифов Ф.А.* Методы решения задачи выбора режимов объединенной энергосистемы по активной мощности // Теорія оптимальних рішень. – Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2009. – № 8. – С. 9–16.

Получено 18.05.2010