

УДК 621.316.728:62-52

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЫБОРОМ СОСТАВА ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПЕРИОД РЕМОНТНОЙ КАМПАНИИ

**Кандидаты техн. наук, доценты АЛЕКСАНДРОВ О. И., ДОМНИКОВ С. В.,
асп. БАКАНОВСКИЙ А. М.**

Белорусский национальный технический университет

Разработка эффективных методов повышения экономичности текущих режимов электроэнергетической системы (ЭЭС) приобретает актуальность в связи с повсеместно проводимой энергосберегающей политикой. Особенно важны при этом оптимизационные расчеты по определению режимов ЭЭС в период массовых отключений основного оборудования во время ремонта.

В данной статье приводятся постановка задачи и описание алгоритма оптимального планирования активных мощностей электростанций (ЭС) ЭЭС в период ремонтной кампании. В задаче учитывается динамика различных состояний основного оборудования ЭЭС при переходе от данного временного интервала к другому с соответствующим изменением состава работающих агрегатов.

Алгоритм решения задачи составлен с учетом должных ограничений на допустимые расходы топлива на отдельных ЭС и применением сочетания функциональной, временной и пространственной декомпозиций.

Оптимизация выполняется с помощью хорошо известного метода ветвей и границ [1], причем сам процесс нахождения оптимальных значений активных мощностей определяется на каждом уровне функциональной и режимной иерархии. Задача решается на двух уровнях иерархии: ЭС и ЭЭС – с использованием прогнозируемых величин активных и реактивных нагрузок узлов потребления, а также заданных значений предельно допустимых потоков мощности по межсистемным связям. Для эффективного решения комплексной задачи оптимизации применяется метод пространственной декомпозиции, который позволяет снизить размерность задачи и дает приемлемое решение в условиях недостаточно определенной исходной информации.

Метод дает возможность выполнять оперативную коррекцию оптимального режима ЭСС при введении внеплановых искусственных ограничений, в том числе при дефиците топлива на отдельных ЭС. В этом случае предусмотрена процедура перехода от жестких режимных ограничений к расплывчатым [2].

Критерий оптимизации – суммарный расход топлива на ЭС с учетом пусковых расходов. Целевая функция минимизируется в замкнутой области, определяемой системой режимно-технических ограничений, соответствующих разным требованиям. Различные состояния агрегатов ЭС в ЭСС характеризуются множеством кортежей с логическими переменными (0, 1 и 2), определяющими планируемые моменты включения, отключения и вывода оборудования в резерв (или ремонт). Состояния возможных переходов каждой ЭС описаны в виде графа, вершины которого суть составы оборудования, а ветви указывают на наличие самих переходов.

Функциональная декомпозиция задачи и согласование решений подзадач смежных уровней функциональной иерархии. В функциональном аспекте в данной задаче выделяются две подзадачи: выбор оптимального состава включенных в работу агрегатов на электростанциях (нижний уровень иерархии) и определение оптимальных суточных графиков активных нагрузок станций (верхний уровень).

Пусть $\theta^{(0)}, \theta^{(1)}, \dots, \theta^{(r)}, \dots, \theta^{(T)}$ – моменты времени планируемых суток, соответствующие различным дискретным состояниям ЭЭС, которые являются следствием принятой дискретизации суточных графиков нагрузок в узлах основной сети и заданных диспетчерской службой ЭЭС графиков изменения межсистемных перетоков активной мощности, а также сроков начала и конца ремонтов генерирующего и основного электросетевого оборудования, обусловленными решениями по ранее разрешенным оперативным заявкам. Тогда задачу выбора оптимальных составов генерирующего оборудования целесообразно сформулировать следующим образом [3]:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T [B_j(i_j(t), P_j(t)) + D_j(s_j(t-1), i_j(t))] \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$S(0) = \{s_j(0) | j = \overline{1, n}\}; \quad (2)$$

$$(i_j(t-1), i_j(t)) = (v, \mu), \quad v \in X_j, \quad (v, \mu) \in \Gamma_j^{(v)}; \quad (3)$$

$$y_{v\mu}(s_j(t-1), t) = 1, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T};$$

$$\sum_{j=1}^n P_j(t) - P(t) - \pi(t) = 0, \quad t = \overline{1, T}; \quad (4)$$

$$P_j^{\min}(i_j(t)) \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(i_j(t)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\min}(i_j(t)) \leq (1 - r_-)(P(t) + \pi(t)), \quad t = \overline{1, T}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\max}(i_j(t)) \geq (1 + r_+)(P(t) + \pi(t)), \quad t = \overline{1, T}. \quad (7)$$

Здесь $S(t) = \{s_j(t) | j = \overline{1, n}\}$, $t = \overline{0, T}$, – состояния ЭЭС, т. е. множество кортежей, характеризующих состояния агрегатов станций к t -му моменту времени;

$$S_j(t) = \left((Z_j^{(1)}(t), \tau_j^{(1)}(t)), (Z_j^{(2)}(t), \tau_j^{(2)}(t)), \dots, (Z_j^{(n_j)}(t), \tau_j^{n_j}(t)) \right), \\ j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{0, T}; \quad (8)$$

$Z_j^{(k)}(t)$, $k = \overline{1, n_j}$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{0, T}$, – логическая переменная, значения которой определяются как

$$Z_j^k(t) = \begin{cases} 0, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени} \\ & \text{отключен в ремонт;} \\ 1, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени} \\ & \text{отключен в резерв;} \\ 2, & k\text{-й агрегат } j\text{-й станции к } t\text{-му моменту времени} \\ & \text{включен в работу,} \end{cases}$$

$\tau_j^{(k)}(t)$ – планируемый момент $\tau_j^{(k)} \geq \theta^{(t)}$ окончания ремонта при $Z_j^{(k)}(t) = 0$, либо момент отключения в резерв $\tau_j^{(k)} < \theta^{(t)}$ при $Z_j^{(k)}(t) = 1$, либо момент включения в работу $\tau_j^{(k)} < \theta^{(t)}$ при $Z_j^{(k)}(t) = 2$;

$$i_j(t) \in A = \{1, 2, \dots, m\}, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{0, T}, \quad m = \sum_{j=1}^n |x_j|,$$

– номер состава включенных в работу агрегатов на j -й станции к t -му моменту; (X_j, Γ_j) , $j = \overline{1, n}$, – граф переходов составов агрегатов на j -й станции, произвольный узел которого $v \in X_j$, $X_j \in A$, соответствует одному из возможных составов агрегатов, а ветвь $(v, \mu) \in \Gamma_j$ указывает на возможность непосредственного перехода в фиксированный момент времени из состава v в состав μ ; $\Gamma_j^{(v)} \subset \Gamma_j$, $v \in X_j$, $j = \overline{1, n}$, – множество ветвей графа (X_j, Γ_j) , выходящих из узла v ; $y_{v\mu}$, $v \in X_j$, $\mu \in X_j$, $(v, \mu) \in \Gamma_j$, $j = \overline{1, n}$, – логическая переменная, значения которой определяются как

$$y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t) = \begin{cases} 1, & \text{переход от состава } \nu \text{ к составу } \mu \text{ из} \\ & \text{состояния } s_j(t-1) \text{ в момент } t \text{ возможен;} \\ 0, & \text{переход от состава } \nu \text{ к составу } \mu \text{ из} \\ & \text{состояния } s_j(t-1) \text{ в момент } t \text{ невозможен, } t = \overline{1, T}, \end{cases}$$

$P_j(t)$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$ – мощность j -й станции на t -м интервале времени, т. е. интервале $[\theta^{(t-1)}, \theta^{(t)}]$; $P_j^{\min}(t)$, $P_j^{\max}(t)$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$, – технический минимум нагрузки и располагаемая мощность j -й станции при составе агрегатов $i_j(t)$; $P(t)$ – суммарная активная нагрузка ЭЭС с учетом перетоков по межсистемным связям; $\pi(t)$ – потери активной мощности в основной сети ЭЭС на t -м интервале; $D_j(s_j(t-1), i_j(t))$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$, – расход топлива на переход из состояния $s_j(t-1)$ к составу $i_j(t)$; $B_j(i_j(t), P_j(t))$, $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$, – расход топлива на t -м интервале при составе $i_j(t)$ и нагрузке $P_j(t)$ j -й станции, определяемый по соответствующей расходной характеристике $B_j(i_j, P_j)$ как

$$B_j(i_j(t), P_j(t)) = (\theta^t - \theta^{t-1}) B_j(i_j, P_j);$$

r_- , r_+ , $0 < r_- < 1$, $0 < r_+ < 1$ – заданные коэффициенты резерва соответственно по техническому минимуму и располагаемой мощности ЭЭС.

Из определения (8) компонентов $s_j(t)$ состояния $S(t)$ следует, что в случае, когда составы $i_j(t-1)$, $i_j(t)$ удовлетворяют ограничению (3), состояние $S(t)$ однозначно определяется состоянием $S(t-1)$ и составом $i_j(t)$, $j = \overline{1, n}$,

$$S(t) = f(S(t-1), I(t)),$$

где

$$I(t) = \{i_1(t), i_2(t), \dots, i_n(t)\}.$$

Составы $i_j(0)$ и множество $S(0)$ известны из решения соответствующей задачи на предшествующие сутки. Графы переходов (X_j, Γ_j) , расходные характеристики $B_j(i_j, P_j)$, зависимости расходов на пуск или останов агрегатов $D_j(s_j(t-1), i_j(t))$, логические функции $y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t)$, функции $P_j^{\min}(i_j)$, $P_j^{\max}(i_j)$ могут быть заблаговременно определены на нижнем уровне пространственной иерархии, т. е. решением ряда оптимизационных задач для каждой станции. Величины $P(t)$ находятся суммированием прогнозов активных нагрузок в узлах и заданных диспетчерской службой ЭЭС

перетоков активной мощности по межсистемным связям. Величины $\pi(t)$ при первоначальном решении задач определяются путем прогнозирования соответствующего временного ряда, а при согласовании решения данной задачи и задачи нижнего уровня функциональной иерархии – в результате решения последней. Коэффициенты r_+ , r_- являются заданными константами.

Состояния $S_j(t)$, составы $i_j(t)$ и мощности $P_j(t)$, $t = \overline{1, T}$, определяются путем решения задачи (1)–(7) методом ветвей и границ.

Подзадачи нижнего уровня функциональной иерархии формулируются следующим образом:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n B_{ij}(P_j^t) \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^t - \sum_{v=1}^l p_v^t - \pi^t(\mathbf{P}^t, \mathbf{p}^t) = 0, \quad t = \overline{1, T}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} -P_k^t \leq \sum_{v=1}^l (C_{Pp, kv}^t p_v^t + C_{Pq, kv}^t q_v^t) - \sum_{j=1}^n C_{PQ, kj}^t Q_j^t - \\ - \sum_{j=1}^n C_{Pp, kj}^t P_j^t \leq P_k^t, \quad k = \overline{1, m}, \quad t = \overline{1, T}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T B_{ij}(P_j^t) - B_j^\Sigma = 0, \quad j \in I; \quad (12)$$

$$P_{j \min}^t \leq P_j^t \leq P_{j \max}^t, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (13)$$

Здесь P_j^t , $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$, – искомые оптимальные активные мощности станций; Q_j^t , $j = \overline{1, n}$, $t = \overline{1, T}$, – известные (из решения задач верхнего уровня временной иерархии) реактивные мощности станций; p_v^t , q_v^t , $v = \overline{1, l}$, $t = \overline{1, T}$, – прогнозы активных и реактивных нагрузок в потребительских узлах основной сети (либо заданные перетоки по межсистемным связям); \mathbf{P}^t , \mathbf{p}^t , $t = \overline{1, T}$, – вектор активных мощностей соответственно станций потребительских узлов; $\pi^t(\mathbf{P}^t, \mathbf{p}^t)$, $t = \overline{1, T}$, – потери активной мощности в основной сети ЭЭС; $I \subset \{1, 2, \dots, n\}$ – множество станций, для которых заданы суточные расходы топлива B_j^Σ , $j \in I$; P_k^t , P_k^+ , $k = \overline{1, m}$, $t = \overline{1, T}$, – заданные предельно допустимые перетоки активной мощности по k -й слабой связи в отрицательном и положительном направ-

лениях; $C'_{Pp,kv}$, $C'_{Pq,kv}$, $v = \overline{1, l}$, $C'_{Pp,kj}$, $C'_{PQ,kj}$, $j = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, m}$, $t = \overline{1, T}$, – коэффициенты распределения,

$$B_{ij}(P'_j) = B_j(\bar{i}_j(t), P'_j), \quad P'_{j \min} = P_j^{\min}(\bar{i}_j(t));$$

$$P'_{j \max} = P_j^{\max}(\bar{i}_j(t)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}.$$

Алгоритм решения задачи (9)–(13) получается, если принять:

$$x'_j = P'_j, \quad f_{ij}(x'_j) = -B_{ij}(P'_j), \quad x^t = P^t;$$

$$h^t(x^t) = \sum_{v=1}^l p'_v - \pi^t(\mathbf{P}^t, \mathbf{p}^t), \quad x'_{j \min} = P'_{j \min};$$

$$x'_{j \max} = P'_k, \quad \Psi'_{k \max} = -\bar{P}'_k, \quad \Psi'_{k \max} = \bar{P}'_k;$$

$$\phi'_j(x'_j) = B_{ij}(P'_j), \quad d_j = B_j^Z, \quad t = \overline{1, T}, \quad j = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, m}.$$

Подзадачи (1)–(7) и (9)–(13) взаимно параметризуют допустимое множество решений подзадачи смежного уровня. Подзадача (1)–(7) осуществляет эту параметризацию путем задания подзадаче (9)–(13) наборов оптимальных составов включенных в работу агрегатов $\bar{I}(t) = \{\bar{i}_1(t), \bar{i}_2(t), \dots, \bar{i}_n(t)\}$, $t = \overline{1, T}$, а подзадача (9)–(13) – путем задания подзадаче (1)–(7) величины потерь

$$\pi(t) = \pi^t(\mathbf{P}^t, \mathbf{p}^t), \quad t = \overline{1, T}.$$

Общая процедура согласования решений подзадач смежных уровней функциональной иерархии рассмотрена в прил. 1.

Временная декомпозиция задачи и согласование решений задач смежных уровней временной иерархии. Опуская ради простоты ограничения (12) по заданным суточным расходам топлива на электростанциях и ограничения (11) на перетоки активной мощности по слабым связям основной сети ЭЭС, перепишем задачу краткосрочного планирования активных мощностей в виде:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n B_{ij}(P'_j) \rightarrow \min;$$

$$\sum_{j=1}^n P'_j - \sum_{v=1}^l p'_v - \pi^t(\mathbf{P}^t, \mathbf{p}^t) = 0, \quad t = \overline{1, T};$$

$$P_{j \min}^t \leq P_j^t \leq P_{j \max}^t, \quad t = \overline{1, T}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Сформулированная задача распадается на независимо решаемые подзадачи нижнего уровня временной иерархии:

$$\sum_{j=1}^n B_{ij}(P_j^t) \rightarrow \min; \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^t - \sum_{v=1}^l p_v^t - \pi^t(\mathbf{P}^t, \mathbf{p}^t) = 0; \quad (15)$$

$$P_{j \min}^t \leq P_j^t \leq P_{j \max}^t, \quad j = \overline{1, n}. \quad (16)$$

Аналогичная ситуация имеет место и при учете опущенных ограничений (11), (12), если надлежащим образом использовать неопределенные множители Лагранжа.

Проблема согласования решений смежных уровней временной иерархии состоит в том, чтобы максимально использовать информацию, накопленную при решении подзадач (14)–(16) на этапе краткосрочного планирования, в цикле оперативного управления, когда те же задачи приходится решать при изменении тех или иных компонентов исходной информации:

- нагрузок в потребительских узлах p_v^t , $v = \overline{1, l}$, по сравнению с их прогнозированными значениями (или перетоков по межсистемным связям по сравнению с заданными);
- расходных характеристик $B_{ij}(P_j^t)$, $j = \overline{1, n}$, электростанций (и соответственно ограничений (15) вследствие аварийных отключений агрегатов);
- потерь $\pi^t(\mathbf{P}^t, \mathbf{p}^t)$ из-за аварийных отключений элементов основного электросетевого оборудования;
- а также при возникновении дефицита топлива на отдельных электростанциях в результате изменений их режимов либо несвоевременной доставки топлива.

Основой для построения алгоритмов, обеспечивающих эффективное согласование решений на смежных временных уровнях, являются:

- способ быстрого пересчета таблиц методом динамического программирования (МДП) [3] при частичном изменении целевых функций и ограничений в подзадачах (14)–(16);
- распространение МДП в случае несепарабельных функций в ограничениях-равенствах типа (15).

Пространственная декомпозиция задачи и согласование решений подзадач смежных уровней пространственной иерархии. Пространственная декомпозиция задачи принятия решений по управлению режимами ЭЭС может иметь следующие цели:

1. Уменьшить количество информации, поступающей на верхний уровень управления, сокращая загрузку каналов связи и сетевого сервера.

2. Снизить размерность оптимизационных задач, решаемых на верхнем уровне, повышая тем самым вычислительную эффективность алгоритмов оптимизации.

3. Обеспечить гарантированное нахождение удовлетворительных решений на верхнем уровне в условиях непреднамеренного или сознательного искажения осведомительной информации с нижних уровней.

В задаче оптимизации активных мощностей электростанций ЭЭС примером подзадачи, в которой пространственная декомпозиция выполняется для достижения двух первых целей, является задача оптимального краткосрочного планирования составов генерирующего оборудования. Исходная информация для соответствующей математической модели включает в себя компоненты, которые должны быть определены на нижнем уровне, т. е. путем решения ряда оптимизационных задач на электростанциях ЭЭС: расходные характеристики $B_j(i_j, P_j)$, $j = \overline{1, n}$, для различных составов включенных в работу агрегатов на j -й станции; характеристики расхода топлива на переходы от различных состояний $s_j(t-1)$, включающих эксплуатационное состояние каждого агрегата j -й станции в момент $(t-1)$, к составам $i_j(t)$ включенных в работу агрегатов в момент t ; графы (X_j, Γ_j) , $j = \overline{1, n}$, одномоментно возможных переходов от одного состава агрегатов к другому на j -й станции и логические функции $y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t)$, определяющие условия реализации возможного перехода от состава $\nu \in X_j$ в момент $t-1$ к составу $\mu \in X_j$ в момент t в зависимости от состояния в момент $t-1$. На рис. 1 показан пример графа одномоментно возможных переходов для j -й станции (в скобках указаны номера агрегатов, образующих составы, которые соответствуют вершинам графа). Функции $y_{\nu\mu}(s_j(t-1), t)$, соответствующие петлям графа, являются константами

$$y_{11} = y_{22} = y_{33} = y_{44} = y_{55} = y_{66} = y_{77} = 1.$$

Примеры областей истинности логических функций, адекватных пуску или останову одного агрегата, приведены ниже:

$$(Z_j^{(2)}(t-1) = 1) \wedge \left[(\theta^{(t-1)} - \tau_j^{(2)}(t-1) \leq \bar{\theta}_j^{(2)}) \vee \left(\theta^{(t-1)} - \tau_j^{(2)}(t-1) \geq \theta_j^{(2)} \right) \right] \rightarrow \\ \rightarrow y_{14}(s_j(t-1), t) = 1;$$

$$(Z_j^{(2)}(t-1) = 2) \wedge (\theta^{(t-1)} - \tau_j^{(2)}(t-1) \geq \theta_j^{(2)}) \rightarrow y_{41}(s_j(t-1), t) = 1,$$

где $\bar{\theta}_j^{(k)}$, $\theta_j^{(k)}$ – соответственно длительность перехода k -го агрегата после отключения в холодный резерв, длительность его перевода из холодного резерва в горячий, минимально допустимая длительность несения нагрузки.

Например, пространственная декомпозиция задачи оптимизации активных мощностей электростанций ЭЭС позволяет получить удовлетворительное решение при недостоверной исходной информации. Это происходит в случае непредвиденного дефицита топлива на отдельных станциях.

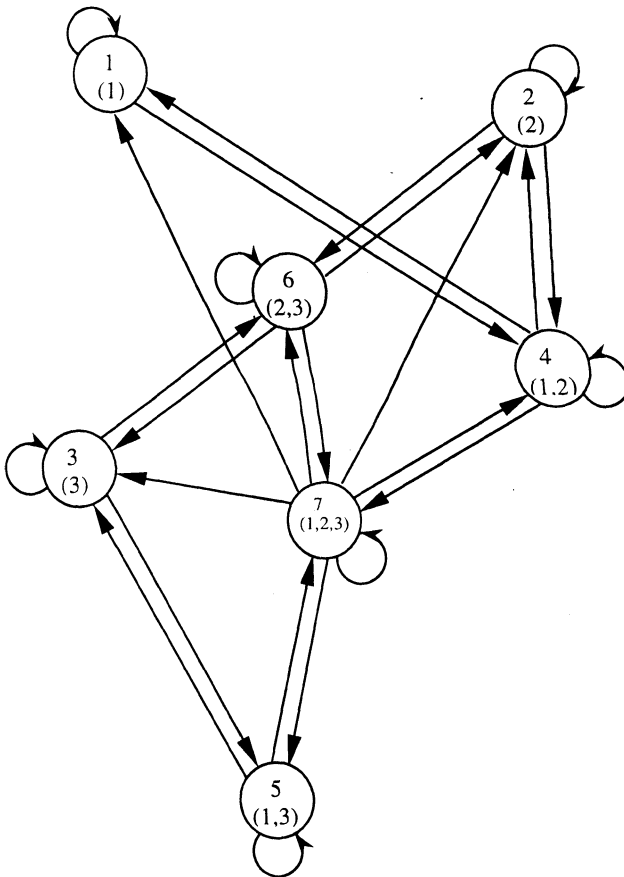


Рис. 1

Пусть в результате отклонений фактических режимов ЭЭС от запланированного суточного режима и несвоевременной доставки топлива на отдельные электростанции выявилось, что на них имеет место дефицит топлива. Тогда при коррекции режима на ближайший интервал нижнего временного уровня в диспетчерскую службу ЭЭС должны быть переданы получаемые экспертным путем или из решений соответствующих задач нижнего уровня пространственной иерархии оценки допустимых расходов топлива на дефицитных станциях в течение указанного интервала. Задачу верхнего уровня в таких условиях целесообразно сформулировать как задачу многоцелевой оптимизации:

$$\sum_{j=1}^n B_j(P_j) \rightarrow \min;$$

$$B_j(P_j) \rightarrow \min, \quad j = \overline{1, k};$$

$$\sum_{j=1}^n P_j - \sum_{v=1}^l p_v - \pi(\mathbf{P}', \mathbf{p}') = 0;$$

$$P_{j_{\min}} \leq P_j \leq P_{j_{\max}}, \quad j = \overline{1, n};$$

$$B_j(P_j) \leq B_{j_{\max}}, \quad j = \overline{k+1, n},$$

где $B_j(P_j)$, $j = \overline{1, n}$, – расходные характеристики электростанций; $\mathbf{P} = (P_j)$, $j = \overline{1, n}$, $\mathbf{p} = (p_v)$, $v = \overline{1, l}$, – векторы соответственно активных мощностей станций и нагрузок в узлах основной сети энергосистемы; $P_{j_{\min}}$, $P_{j_{\max}}$, $j = \overline{1, n}$, – соответственно технические минимумы нагрузки и располагаемые мощности электростанций; $B_{j_{\max}}$, $j = \overline{k+1, n}$, – допустимые расходы топлива на недефицитных по топливу станциях; $\pi(\mathbf{P}', \mathbf{p}')$ – потери активной мощности в основной сети (реактивные мощности в генерирующих и потребляющих узлах основной сети, а также коэффициенты трансформации в звеньях этой сети предполагаются предварительно заданными).

Алгоритм решения этой задачи приведен в [3]. Если в результате решения задачи выясняется, что нагрузка энергосистемы не может быть покрыта при фактических ресурсах топлива на этих станциях, то необходимо наложить жесткие ограничения на допустимые расходы топлива на дефицитных станциях и обеспечить возможность выхода фактических расходов топлива на недефицитных станциях за ранее заданные пределы. Для этого необходимо перейти от жестких ограничений по допустимым расходам топлива на недефицитных станциях к расплывчатым ограничениям. Тогда при надлежащем выборе функций принадлежности расплывчатых множеств можно гарантированно получить приемлемое решение задачи.

ВЫВОД

Сочетание методов функциональной, временной и пространственной декомпозиций позволяет предложить гибкий и эффективный вычислительный алгоритм для решения актуальной задачи распределения активных мощностей в условиях дефицита топлива на отдельных электростанциях ЭЭС. Предлагаемый алгоритм позволяет согласовать процесс решения задачи планирования режима ЭЭС по активной мощности с задачей рассмотрения заявок на ремонт основного электросетевого оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современное состояние теории исследования операций / Под ред. Н. Н. Моисеева. – М.: Наука, 1979. – 464 с.
2. Беллман Р. Е., Заде Л. А. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.
3. Александров О. И., Домников С. В., Бабкевич Г. Г. Оптимизация суточного режима энергосистемы по активной мощности с учетом потерь в сети методом динамического программирования // Известия РАН. Энергетика. – 1993. – № 1. – С. 81–97.

**ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ НИЖНЕЙ ОЦЕНКИ
И ВЕКТОРА ТОЧЕЧНЫХ НИЖНИХ ОЦЕНОК
ДЛЯ ИСХОДНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ**

С целью вычисления нижней оценки для задач (1)–(7) рассматривается подзадача:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T B_j(i_j(t), P_j(t)) \rightarrow \min; \quad (\text{п. 1})$$

$$i_j(t) \in X_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (\text{п. 2})$$

$$\sum_{j=1}^n P_j(t) - P(t) - \pi(t) = 0, \quad t = \overline{1, T}; \quad (\text{п. 3})$$

$$P_j^{\min}(i_j(t)) \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(i_j(t)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (\text{п. 4})$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\min}(i_j(t)) \leq (1 - r_-)(P(t) + \pi(t)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}; \quad (\text{п. 5})$$

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\max}(i_j(t)) \geq (1 + r_+)(P(t) + \pi(t)), \quad j = \overline{1, n}, \quad t = \overline{1, T}. \quad (\text{п. 6})$$

Эта подзадача распадается на независимо решаемые подзадачи

$$\sum_{j=1}^n B_j(i_j(t), P_j(t)) \rightarrow \min \quad (\text{п. 7})$$

при ограничениях (п. 2)–(п. 6) с фиксированным t , каждая из которых может быть решена с помощью метода динамического программирования. Для наших целей достаточно определить оптимальные значения $F_{\min}(t)$, $t = 1, T$, целевых функций (п. 7).

Прямой ход МДП. Определяются и запоминаются значения функции

$$F(y, 1) = \min_{i_1 \in X_1} B_1(i_1, y);$$

где

$$\min_{i_1 \in X_1} P_1^{\min}(i_1) \leq y \leq \max_{i_1 \in X_1} P_1^{\max}(i_1),$$

а также функции $\bar{i}_1(y)$, где $\bar{i}_1(y)$ удовлетворяет условию

$$B_1(\bar{i}_1(y), y) = F(y, 1)$$

и функции

$$\bar{P}_1(y) = y.$$

При $\tau = \overline{2, n}$ для значений y из интервала

$$\sum_{j=1}^{\tau} \min_{i_j \in X_j} P_j^{\min}(i_j) \leq y \leq \sum_{j=1}^{\tau} \max_{i_j \in X_j} P_j^{\max}(i_j) \quad (\text{п. 8})$$

решается следующая задача оптимизации по двум переменным i_τ и P_τ :

$$B_\tau(i_\tau, P_\tau) + F(y - P_\tau, \tau - 1) \rightarrow \min; \quad (\text{п. 9})$$

$$i_\tau \in X_\tau; \quad (\text{п. 10})$$

$$\begin{aligned} \max(P_\tau^{\min}(i_\tau), y - \sum_{j=1}^{\tau-1} P_j^{\max}(\bar{i}_j(y_j))) \leq P_\tau \leq \\ \leq \min(P_\tau^{\max}(i_\tau), y - \sum_{j=1}^{\tau-1} P_j^{\min}(\bar{i}_j(y_j))); \end{aligned} \quad (\text{п. 11})$$

$$P_\tau^{\min}(i_\tau) + \sum_{j=1}^{\tau-1} P_j^{\min}(\bar{i}_j(y_j)) \leq (1 - r_-) y; \quad (\text{п. 12})$$

$$P_\tau^{\max}(i_\tau) + \sum_{j=1}^{\tau-1} P_j^{\max}(\bar{i}_j(y_j)) \geq (1 + r_+) y, \quad (\text{п. 13})$$

где

$$\begin{aligned} y_j = y_{j+1} - \bar{P}_{j+1}(y_{j+1}), \quad j = \overline{1, \tau - 2}; \\ y_{\tau-1} = y - P_\tau. \end{aligned} \quad (\text{п. 14})$$

В результате решения семейства подзадач (п. 9)–(п. 13), (п. 8) определяются функции $F(y, \tau)$, $\bar{i}(y)$, $\bar{P}_\tau(y)$, где $\bar{i}(y)$, $\bar{P}_\tau(y)$ – компоненты решения подзадач (п. 9)–(п. 13); $F(y, \tau)$ – соответствующее значение целевой функции (п. 9).

Как видно из приведенного описания, результаты однократно выполненного прямого хода МДП справедливы для всех подзадач (п. 14), (п. 2) – (п. 6). Кроме того, при каждом $\tau = \overline{2, n}$ нет необходимости помнить значение функции $F(y, j)$ для всех $j = \overline{1, \tau - 1}$. Достаточно хранить лишь $F(y, \tau - 1)$.

Обратный ход МДП. Для данной подзадачи (п. 7), (п. 2)–(п. 6) при фиксированном t определяется значение

$$F_{\min}(t) = F(P(t) + \pi(t), n).$$

Для подзадачи (п. 1)–(п. 6), которую обозначим R_0 , запоминается следующая информация:

1. Вектор точечных нижних оценок

$$\mathbf{F}_0 = (F_0(1), F_0(2), \dots, F_0(T)), \quad (\text{п. 15})$$

где

$$F_0(t) = F_{\min}(t), \quad t = \overline{1, T}. \quad (\text{п. 16})$$

2. Интегральная нижняя оценка

$$f_0 = \sum_{t=1}^T F_0(t). \quad (\text{п. 17})$$

3. Момент T_0 , соответствующий последнему окончательно известному состоянию для данной подзадачи:

$$T_0 = 0. \quad (\text{п. 18})$$

4. Последовательность окончательно известных состояний для данной подзадачи, соответствующая единственному состоянию:

$$S_0(T_0) = S(0).$$

Приложение 2

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

Первый шаг алгоритма. Определяются параметры (п. 15), (п. 17), (п. 18), характеризующие исходную подзадачу (п. 1)–(п. 6).

Текущий шаг алгоритма. Известно множество R , порожденных на предшествующих шагах подзадач, где каждая подзадача $R_k \in R$ характеризуется параметрами (п. 15)–(п. 18). Требуется выбрать очередную порождающую подзадачу $R_i \in R$.

Пусть

$$R = R^{(1)} \cup R^{(2)}, R^{(1)} \cap R^{(2)} = \emptyset,$$

где

$$R^{(1)} = \{R_k \mid R_k \in R, T_k < T\};$$

$$R^{(2)} = \{R_k \mid R_k \in R, T_k = T\}$$

(последнее будем называть множеством окончательно разрешенных подзадач). Пусть $R_q \in R$ – подзадачи, удовлетворяющие условию

$$f_q = \min_{R_k \in R} f_k.$$

Тогда если $R_q \notin R^{(2)}$, то она принимается в качестве порождающей

$$R_l := R_q.$$

Вычисление параметров, характеризующих подзадачи R_k , порождаемые подзадачей R_l , описано в прил. 1.

Последний шаг алгоритма. Если на очередном шаге метода ветвей и границ для подзадачи R_q , удовлетворяющей условиям (п. 14)–(п. 16), справедливо

$$R_q \in R^{(k)},$$

то решение этой подзадачи является решением исходной задачи (1)–(7) выбора оптимальных составов генерирующего оборудования на электростанциях ЭЭС.

Последнее состояние $S_q(T)$ для подзадачи и номер R_l порождающей ее задачи позволяют восстановить оптимальные составы

$$\bar{I}(t) = \left\{ \bar{i}_1(t), \bar{i}_2(t), \dots, \bar{i}_n(t) \right\}, \quad t = \overline{1, T},$$

для всех дискретных интервалов планируемых суток.

Структура алгоритма иллюстрируется на рис. 2, где показаны предпоследний и последний шаги алгоритма (заштрихованные кружки соответствуют окончательно разрешенным подзадачам, условно принято $T = 3$).

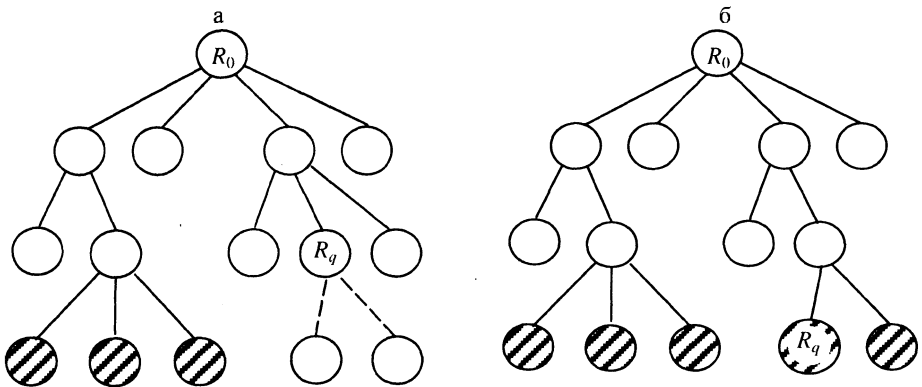


Рис. 2. Порождение подзадач в алгоритме оптимизации составов генерирующего оборудования: а – предпоследний шаг алгоритма; б – последний шаг алгоритма

Получение субоптимальных решений. Если необходимо с целью обеспечения многовариантности получаемых решений задачи (1)–(7) находить ее субоптимальные решения, то достаточно продолжить описанный выше процесс порождения подзадач и вычисления нижних оценок после того, как оптимальное решение уже найдено, отбирая среди получаемых окончательно решенных подзадач $R_k \in R^{(2)}$ те, решения которых наиболее близки к оптимальному решению по величине целевой функции, которая совпадает с соответствующей интегральной оценкой f_k .

Представлена кафедрой
электротехники и электроники

Поступила 30.05.2002