

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Мокрый Г.В., Сердюк В.А.
Кафедра АСУ, ДонНТУ

Abstract

Mokry G.V., Serdyuk V.A. Definition of an optimum structure of working machinery TPS. In the given article analysis of methods of optimum control is made. The description of a method of dynamic programming for a problem of definition of an optimum structure of the working equipment TES is given.

Эффективная работа тепловой электростанции существенно зависит от диспетчерской службы, которая с помощью оперативного сбора существующей информации, своевременной её обработке осуществляет принятие оперативных решений по управлению энергетической нагрузкой ТЭС. Поэтому основной задачей оперативного управления является задача рациональной эксплуатации энергетических установок, заключающаяся в определении оптимальной загрузки работающего оборудования, проведения ремонтов в оптимальные сроки и оптимальном распределении нагрузки между работающими агрегатами ТЭС [1].

На каждые сутки диспетчерской службе ТЭС с центрального пункта энергосистемы задаётся график энергетической нагрузки. Учитывая обязательность выполнения данного графика, диспетчерская служба ТЭС с учётом текущего состояния энергетических установок формирует такие оперативные решения, чтобы суммарный расход топлива на производство электроэнергии был минимальным. Отсюда возникает задача определения оптимального состава работающего оборудования ТЭС.

Для данного типа задач эффективным является метод динамического программирования - это метод решения задач оптимального управления многошаговыми (многостадийными) процессами путем сведения сложной многомерной задачи к последовательности простых одномерных оптимизационных задач. Метод не выдвигает каких-либо требований к виду агрегатных характеристик и в этом смысле обладает универсальными возможностями. На практике характеристики агрегатов тепловой электростанции могут иметь любую форму: скачки, изломы, провалы.

Таким образом, в многостадийном процессе введём характерные признаки:

1. Весь процесс может быть представлен последовательностью более простых процессов, называемых шагами или стадиями. Стадией может быть неделя, месяц, сутки и т. д. При оптимальном распределении нагрузки между агрегатами для одного момента времени процесс разбивается в пространстве, и стадии процесса соответствует один агрегат.

2. Для каждой стадии процесса (рис. 1) определяются следующие параметры, характеризующие «состояние» системы (объекта):

а) вход x_n ; б) выход y_n ; в) решение, принимаемое на шаге d_n ; г) «доход» на данном шаге R_n . «Доход» здесь употребляется в переносном смысле, так как под «доходом» может подразумеваться убыток (с целью его минимизации) или величина совсем другой размерности (вес, время, количество энергии и вещества и т. д.).

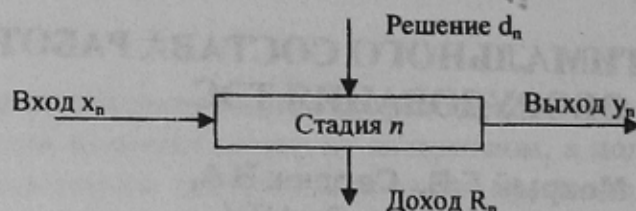


Рис. 1 – Одна из стадий многостадийного процесса

В общем случае:
$$y_n = \varphi_n(x_n, d_n) \tag{1}$$

Весь процесс представляется в виде цепочки таких стадий, причем выход n – й стадии является входом $(n - 1)$ – й, так как стадии нумеруются справа налево.

В общем случае «доход» на стадии n выразим функцией:

$$R_n = \varphi_n(x_n, y_n, d_n) \tag{2}$$

3. Значение целевой функции, по которой идет оптимизация всего процесса, должно быть равно алгебраической сумме доходов на каждой стадии. Это существенное требование к многостадийному процессу, которое характеризуется *аддитивностью* относительно целевой функции.

Анализ многостадийного процесса с помощью динамического программирования основан на использовании рекуррентных, соотношений:

$$Q_n(x_n, d_n) = \varphi_n(x_n, d_n, y_n) + f_{n-1}(x_{n-1}), \tag{4}$$

где
$$y_n = x_{n-1} = \varphi_n(x_n, d_n), \quad f_0(x_0) = 0, \tag{5}$$

а
$$f_n(x_n) = \max[Q_n(x_n, d_n)], \tag{6}$$

при $n = 1, \dots, N$ для всех допустимых значений входов x_n .

Преимущество динамического программирования перед другими методами является то, что объём необходимых вычислений возрастает не экспоненциально, а приблизительно линейно с числом ступеней процесса.

Рассмотрим задачу: “*Определение оптимального состава работающего оборудования ТЭС*”, которую будем решать методом динамического программирования [3,4].

Для решения данной задачи необходимы следующие данные:

- Суточный график нагрузки ТЭС $P_C(t)$;
- Расходные характеристики агрегатов $B_i(P_i)$;
- Пусковые характеристики агрегатов $B_m(\tau)$.

Требуется для каждого момента времени определить такой состав работающих агрегатов, при котором минимизируется суммарный расход топлива всей ТЭС за планируемый период.

Для решения задачи используется итерационный процесс, состоящий из трёх этапов:

1. Определение оптимального состава работающих агрегатов без учета пусковых расходов.
2. Определение моментов включения и отключения агрегатов с учетом пусковых расходов.

3. Учет влияния последующего режима нагрузки энергосистемы на выбор состава оборудования.

Этап 1.

Этот этап сводится к задаче распределения нагрузки между агрегатами и решается методом динамического программирования.

Допустим, что суммарная нагрузка станции P_C распределена оптимально между n агрегатами. Оптимальные нагрузки их обозначим P_i^* ($i=1, \dots, n$).

Выделим группу из m агрегатов, входящих в состав n агрегатов станции. Из принципа оптимальности Беллмана следует [2]: если полная нагрузка P_{nC} распределена оптимально между всеми n агрегатами, то и некоторая нагрузка P_{mC} , представляющая собой суммарную нагрузку m агрегатов, распределена между ними оптимально. Поэтому задачу можно решать следующим образом.

Перенумеруем произвольно агрегаты $1, \dots, n$. Агрегатом, эквивалентным агрегатам $1, 2, \dots, i$, назовем совокупность агрегатов $1, 2, \dots, i$ и обозначим его мощность через P^i .

В дальнейшем нижними индексами будем обозначать номера единичных агрегатов, а верхними — номера эквивалентных агрегатов; тогда нагрузка i -го агрегата будет P_i , а нагрузка эквивалентного агрегата $P^i = (P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_i)$.

Расходной характеристикой эквивалентного агрегата, называемой далее *эквивалентной характеристикой*, называется зависимость расхода топлива эквивалентным агрегатом от его нагрузки при оптимальном распределении ее между всеми агрегатами, составляющими эквивалентный. Ее можно представить как сумму расходных характеристик i -го агрегата и эквивалентного $(i-1)$ -го агрегата

$$B^i P^i = \min_{P_i} \{B_i(P_i) + B^{i-1}(P^{i-1})\}, \quad (7)$$

где $P^i = P_i + P^{i-1}$; B^i — расходная характеристика агрегата, эквивалентного агрегатам $1, 2, \dots, i$.

При определении $B^i(P^i)$ осуществляется минимизация суммарного расхода топлива при каждом значении нагрузки путем оптимального распределения ее между всеми i агрегатами, путем нахождения P_i .

Из рекуррентного уравнения, задаваясь различными значениями мощности эквивалентного агрегата P^i , получим значение расхода топлива.

Построение эквивалентных характеристик надо начинать со 2 -го эквивалентного агрегата P^2 . При всех допустимых значениях P^2 простым сравнением находим и запоминаем то значение P_2^* , при котором B^2 минимально. Таким образом, определяются два ряда зависимостей:

$B^i(P^i)$ — расход топлива i агрегатами как функция их общей мощности при оптимально распределенной нагрузке;

$P_i^*(P^i)$ — зависимость мощности i -го агрегата группы от ее общей мощности при оптимально распределенной нагрузке между агрегатами.

Для определения нагрузки каждого агрегата нужно найти эквивалентные характеристики всей станции $B^n(P^n)$ и $P_n^*(P^n)$. По заданной мощности P_C и по $P_n^*(P^n)$, положив $P^n = P_C$, находят мощность n -го агрегата и его расход топлива.

Затем по зависимости $P_{n-1}^*(P^{n-1})$ (т. е. по зависимостям оптимальной нагрузки $(n-1)$ -го агрегата от суммарной нагрузки P^{n-1} группы из $n-1$ агрегатов), положив $P^{n-1} = P_c - P_n^*$, находят P_{n-1}^* , и до тех пор, пока не определится P_1^* .

Таким образом, в памяти машины должны храниться заданные n расходных характеристик и $2(n-1)$ эквивалентных характеристик.

Для решения задачи используется следующий алгоритм:

1. блок начала цикла построения эквивалентной характеристики станции (прямой ход);
2. блок выбора нагрузки эквивалентного агрегата P^i . Здесь определяются минимальная и максимальная нагрузки эквивалентного агрегата и на каждом следующем цикле определяется следующее значение P^i ;
3. блок выбора нагрузки i -го агрегата — перебор значений нагрузок i -го агрегата от $P_{i_{\min}}$ до $P_{i_{\max}}$;
4. блок определения нагрузки $(i-1)$ -го эквивалентного агрегата по нагрузке i -го эквивалентного агрегата и i -го агрегата;
5. блок минимизации расхода топлива. Вычисляет расход топлива для нагрузок P_i и P^{i-1} и производит сравнение его со значением расхода топлива, полученным в предыдущем цикле. Если новое значение меньше старого, то оно запоминается (блок б), если нет, то осуществляется переход к следующему значению P_i ;
6. блок запоминания оптимальной нагрузки i -го агрегата P_i^* в зависимости от нагрузки P_i i -го эквивалентного агрегата;
7. блок перехода к следующему значению нагрузки P_i . Если все значения P_i испытаны, то осуществляется переход к следующему значению нагрузки i -го эквивалентного агрегата. Если же $P_i \leq P_{i_{\max}}$, то это значение нагрузки испытывается на оптимальность (блок 3);
8. блок перехода к следующему значению нагрузки P^i . Если все значения P^i испытаны, то осуществляется переход к следующему агрегату (построение эквивалентной характеристики $(i+1)$ -го эквивалентного агрегата). Если же не все P^i испытаны, то для этого значения P_i определяется оптимальное значение нагрузки P_i ;
9. блок перехода к следующему агрегату;
10. блок определения окончания построения эквивалентной характеристики станции. Если все агрегаты испытаны ($i+1 > n$), то эквивалентная характеристика построена, если нет - ($i+1 \leq n$), то эквивалентная характеристика достраивается (блок 2). Блоком 10 оканчивается «прямой ход» динамического программирования. В памяти хранится следующая информация: эквивалентная характеристика станции - зависимость $B^n(P^n)$ и $n-1$ зависимостей оптимальной нагрузки i -го агрегата от нагрузки i -го эквивалентного агрегата - $P_i^*(P^i)$;
11. блок ввода нагрузки станции P_c (нагрузка n -го эквивалентного агрегата);
12. блок начала цикла «обратного хода» динамического программирования;
13. блок определения нагрузки i -го агрегата;
14. блок определения нагрузки $(i-1)$ -го эквивалентного агрегата;
15. блок перехода к следующему агрегату;

16. блок определения окончания «обратного хода».

Этап 2.

При пуске агрегатов из холодного состояния пусковые расходы не зависят от длительности простоя и на этом этапе в расчет не вводятся.

Рассмотрим j -й интервал простоя $(t_{j_{\text{ост}}}, t_{j_{\text{вкл}}})$ i -го агрегата рис. 2.

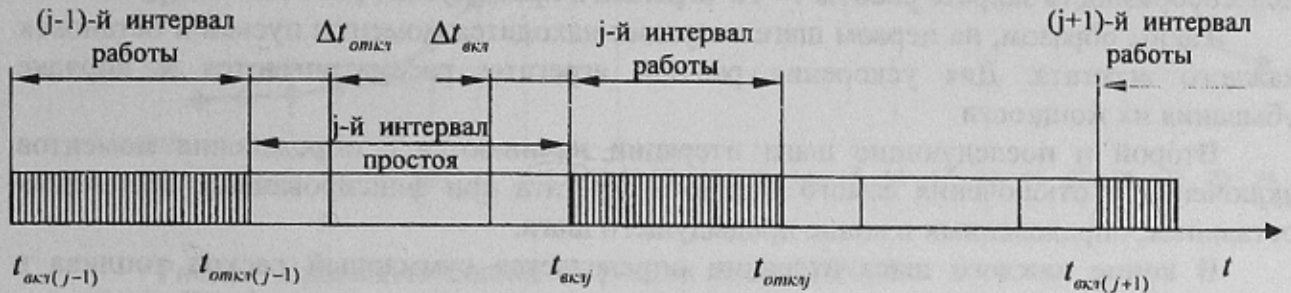


Рис. 2 – Интервалы работы и простоя агрегата.

Если уменьшить этот интервал, т. е. сделать его равным $(t_{j_{\text{ост}}} + \Delta t_{j_{\text{ост}}}, t_{j_{\text{вкл}}} - \Delta t_{j_{\text{вкл}}})$ то пусковые расходы уменьшатся вследствие уменьшения простоя, а также несколько уменьшится расход топлива на выработку электроэнергии в системе (за счет уменьшения относительных приростов расхода топлива (ОПРТ) в часы работы агрегата), но увеличится расход топлива на холостой ход за счет работы агрегата в интервалах $(t_{j_{\text{ост}}}, t_{j_{\text{ост}}} + \Delta t_{j_{\text{ост}}})$ и $(t_{j_{\text{вкл}}} - \Delta t_{j_{\text{вкл}}}, t_{j_{\text{вкл}}})$.

Общее изменение расхода топлива:

$$\Delta B_{ij} = B_{in}(t_{j_{\text{вкл}}} - t_{j_{\text{ост}}}) - B_{in}[(t_{j_{\text{вкл}}} - \Delta t_{j_{\text{вкл}}}) - (t_{j_{\text{ост}}} + \Delta t_{j_{\text{ост}}})] - \Delta B_{j_{\text{выр}}}(t_{j_{\text{ост}}}) - \Delta B_{j_{\text{выр}}}(t_{j_{\text{вкл}}}), \quad (8)$$

где два последних слагаемых — изменение расхода топлива работающих агрегатов. Оптимальными будут такие границы интервала простоя, при которых снижение общего расхода топлива максимально;

$$\text{макс} \Delta B_{ij} = \min_{t_{j_{\text{ост}}}, t_{j_{\text{вкл}}}} \{ \Delta B_{in}[(t_{j_{\text{вкл}}} - \Delta t_{j_{\text{вкл}}}) - (t_{j_{\text{ост}}} + \Delta t_{j_{\text{ост}}})] + \Delta B_{j_{\text{выр}}}(t_{j_{\text{ост}}}) + \Delta B_{j_{\text{выр}}}(t_{j_{\text{вкл}}}) \}, \quad (9)$$

Если обозначить $\Delta t_{j_{\text{вкл}}} + \Delta t_{j_{\text{ост}}} = t_{ij}$, то при его фиксированном значении нахождение максимума функции ΔB_{ij} равносильно определению минимума функции одной переменной $\Delta t_{j_{\text{ост}}}$:

$$\Delta B_{ij} = \Delta B_{ij}(\Delta t_{j_{\text{ост}}}) + \Delta B_{ij}(\Delta t_{j_{\text{вкл}}}) = \Delta B_{ij}(\Delta t_{j_{\text{ост}}}) + \Delta B_{ij}(\Delta t_{ij} - \Delta t_{j_{\text{ост}}}), \quad (10)$$

Поиск экстремума также производится методом динамического программирования.

Этап 3.

После того, как определены оптимальные моменты отключения и включения агрегатов $(t_{j_{\text{ост}}}, t_{j_{\text{вкл}}})$, нужно проверить целесообразность работы каждого из них на каждом интервале времени. Поэтому для каждого рабочего интервала $(t_{j_{\text{вкл}}}, t_{j+1_{\text{ост}}})$ необходимо проверить:

- а) выгодно ли не включать i -й агрегат в данном интервале $(t_{j_{\text{вкл}}}, t_{j+1_{\text{ост}}})$, оставляя при этом остальной состав агрегатов неизменным;

б) выгодно ли заменить i -й агрегат в данном интервале $(t_{j_{\text{ост}}}, t_{j+1_{\text{акт}}})$ какими-либо другими агрегатами.

Если в результате таких проверок оказалось выгодным запретить работу i -го агрегата в j -м интервале, то, возвращаясь к этапу 2 решения задачи, следует уточнить границы нового интервала простоя $(t_{j_{\text{ост}}}, t_{j+1_{\text{акт}}})$ и повторно рассмотреть целесообразность запрета работы i -го агрегата в предыдущем рабочем интервале.

Таким образом, на первом шаге итерации находятся моменты пусков и остановок каждого агрегата. Для ускорения расчета агрегаты рассматриваются в порядке убывания их мощности.

Второй и последующие шаги итерации начинаются с определения моментов включения и отключения самого мощного агрегата при фиксированных состояниях остальных, определенных в конце предыдущего шага.

В конце каждого шага итерации определяется суммарный расход топлива в системе. Процесс прекращается, когда расходы топлива на s -м и $(s-1)$ -м шагах итерации мало отличаются, т. е.

$$|B_s - B_{s-1}| \leq \varepsilon_B. \quad (11)$$

Блоки выполняют следующие операции:

1. ввод исходной информации: расходные $B_i(P_i)$ и пусковые $B_m(\tau)$ характеристики агрегатов, суточный график нагрузки $P_C(t)$ и допустимые интервалы изменения нагрузок агрегатов $P_{i_{\text{мин}}}$ и $P_{i_{\text{макс}}}$; распределение нагрузки и выбор состава агрегатов для каждого часа без учета пусковых характеристик;
2. выбор очередного агрегата в порядке убывания их номинальной мощности;
3. выявление интервалов работы и простоя агрегатов (конец первого этапа расчетов);
4. выделение очередного j -го интервала простоя i -го агрегата;
5. вычисление $\max \Delta B_j$ и соответствующих ему $\Delta t_{j_{\text{ост}}}$ и $\Delta t_{j_{\text{акт}}}$;
6. изменение состава агрегатов в соответствии с найденными $\Delta t_{j_{\text{ост}}}$ и $\Delta t_{j_{\text{акт}}}$;
7. проверка просмотра всех интервалов простоя i -го агрегата (этим оканчивается второй этап расчета);
8. выделение очередного j -го интервала работы i -го агрегата;
9. проверка возможности исключения i -го агрегата из работы в данном интервале по балансу мощности. Если можно исключить, то осуществляется переход к блоку 11, если нет, то переход к следующему интервалу работы (блок 15).
10. исключение агрегата из состава работающих и поиск нового оптимального состава агрегатов (из оставшихся после исключения i -го агрегата);
11. вычисление изменения расхода топлива ΔB_j при работе данного состава;
12. проверка условия $\Delta B_j > 0$
13. запоминание рассмотренного состава;
14. проверка просмотра всех интервалов работы i -го агрегата;
15. проверка просмотра всех агрегатов;
16. вычисление расхода топлива B_s на s -м шаге итерации
17. проверка условия $|B_s - B_{s-1}| \leq \varepsilon_B$;

Рассмотрим задачу определения оптимального состава работающего оборудования на примере Кураховской ТЭС.

Исходным является суточный график нагрузки, прогнозируемый на 21.11.2001г. (рис.3). В 1-й час 21.11.2001г. ожидается активная нагрузка $P_c = 540$ МВт.

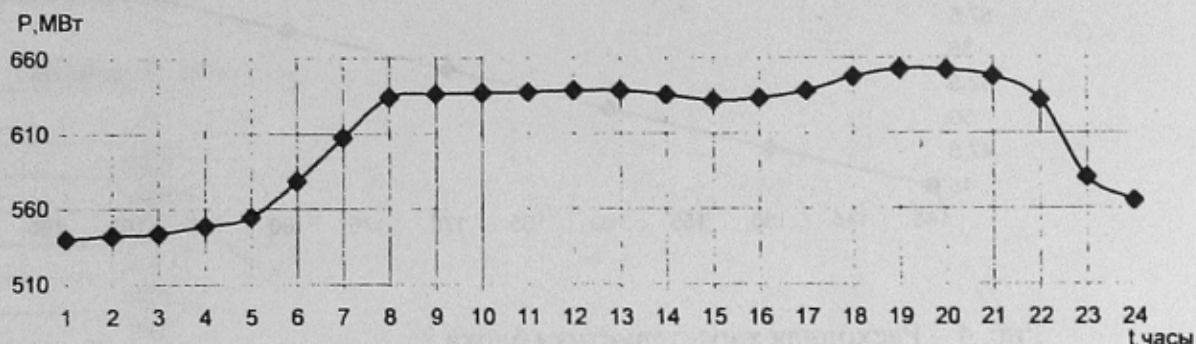


Рис. 3 – Прогноз активной мощности на 21.11.2001г.

Необходимо принять решение как оптимально распределить нагрузку $P_c = 540$ МВт между 3-мя блоками мощностью по 200 МВт, расходные характеристики которых заданы в табл.1. в тоннах условного топлива в час (т.у.т./ч).

Таблица 1 Расходные характеристики блоков

Нагрузка P	Расход топлива				
	B1 (блок 3)	B2 (блок 4)	B3 (блок 5)	B4 (блок 6)	B5 (блок 7)
МВт	т.у.т./ч	т.у.т./ч	т.у.т./ч	т.у.т./ч	т.у.т./ч
140	45,1	47,2	48,4	47,4	49
150	48	50,2	51,5	50,3	52,1
160	51	53,3	54,6	52	55
170	54	56,3	57,8	54	58
180	57	59,4	61	60	61
190	60	62,7	64,4	62,4	64,7
200	63,3	66,4	67,7	66	68,8

Строим последовательно эквивалентную характеристику станции (прямой ход). Начинаем построение с блока №1 (блок 3), расходная характеристика рис 4. Эквивалентной характеристикой его B^1 будет сама расходная характеристика (колонки 1 и 2 табл. 1). Строим эквивалентную характеристику группы, состоящей из блоков №1 и №2, используя уравнение:

$$B^2 P^2 = \min_{P_2} \{B_2(P_2) + B^1(P^1)\}, \tag{12}$$

решение которого для каждого конкретного значения P^2 . Заметим, что P^2 лежит в интервале:

$$P_{1_{\text{мин}}}^1 + P_{2_{\text{мин}}} \leq P^2 \leq P_{1_{\text{макс}}}^1 + P_{2_{\text{макс}}} \tag{13}$$

или

$$280 \leq P^2 \leq 400 \tag{14}$$

Рассмотрим, например, как построена строка, в которой $P^2 = 360$ МВт.

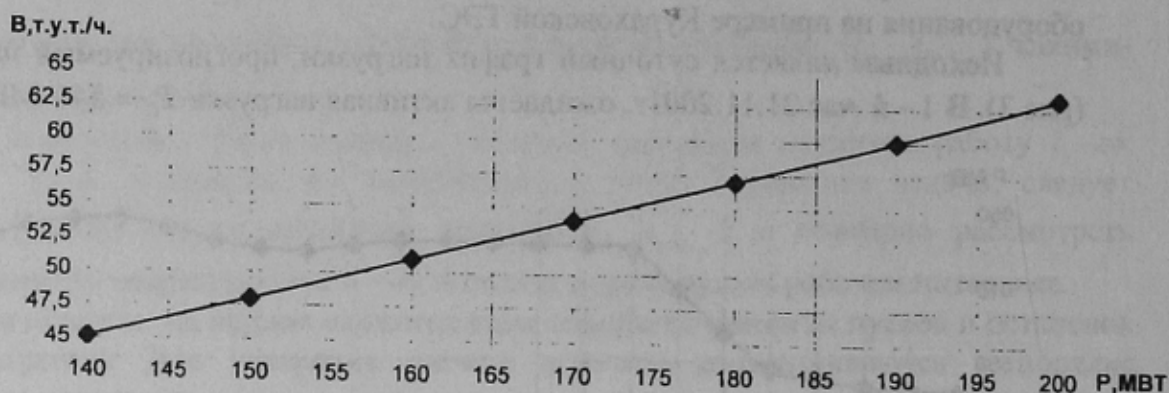


Рис. 4 – Расходная характеристика блока 3.

Таблица 2. Выбор оптимального значения P_2 при $P^2 = 360$ МВт

P^1	МВт	160	170	180	190	200
P_2	МВт	200	190	180	170	160
B_1	т.у.т./ч	51,0	54,0	57,0	60,0	63,3
B_2	т.у.т./ч	66,4	62,7	59,4	56,3	53,3
B_3	т.у.т./ч	117,4	116,7	116,4	116,3	116,6

В табл. 2 в верхних двух строках записаны всевозможные сочетания нагрузок P^1 и P_2 таких, что $P^1 + P_2 = 360$. В третьей и четвертой строках записаны расходы топлива, взятые из табл. 1. В последней строке просуммированы расходы топлива двух агрегатов при соответствующих нагрузках. Выберем ту колонку, у которой суммарный расход топлива наименьший, т. е. 116,3 т. у. т./ч. Ему соответствует $P_2 = 170$. Эти результаты вносим в строку табл. 4, соответствующую $P_2 = 360$ МВт.

В табл. 2. прямоугольниками обведены оптимальное значение мощности блока № 2 и расход топлива эквивалентным агрегатом B^2 .

Таблица 3. Эквивалентная характеристика двух блоков

P^1	B_2	P_2
МВт	т.у.т./ч	МВт
280	92,3	140
290	95,2	140
300	98,2	140 (150)
310	101,2	140 (150)
320	104,2	140 (150)
330	107,2	140 (150)
340	110,2	150
350	113,3	160
360	116,3	170
370	119,4	180
380	122,7	180
390	126,0	190
400	129,7	200

Аналогично, используя выражение:

$$B^3 P^3 = \min_{P_3} \{B_3(P_3) + B^2(P^2)\}, \quad (15)$$

получим эквивалентную характеристику станции (табл. 4.) $B^3 P^3$, где P^3 - нагрузка станции.

Таблица 4. Эквивалентная характеристика станции

P^3	B_3	P_3
МВт	т.у.т./ч	МВт
420	140,7	140
430	143,6	140
440	146,6	140
450	149,6	140
460	152,6	140
470	155,6	140
480	158,6	140
490	161,7	140 (150)
500	164,7	140
510	167,8	140 (150)
520	170,9	150 (160)
530	174,0	160
540	177,2	170
...
600	197,4	200

По эквивалентным характеристикам очень легко распределить нагрузку между блоками (обратный ход).

Оптимальное распределение нагрузки между i -м агрегатом и эквивалентным $(i-1)$ -м агрегатом является реализацией принципа оптимальности в смысле определения наивыгоднейшего режима на i -й стадии (для i -го агрегата) с учетом влияния этого решения на последующие стадии, т. е. на режим $(i-1)$ -го агрегата.

Пусть $P_C = 540$. По первой и третьей колонкам табл. 4 находим: $P_3^* = 170$ МВт. Значит $P_2 = P^3 - P_3^* = 540 - 170 = 370$ МВт. По первой и третьей колонкам табл. 4. находим $P_2^* = 180$ МВт. Тогда $P_1^* = 370 - 180 = 190$ МВт. Итак, наивыгоднейшие нагрузки блоков: $P_1 = 190$ МВт, $P_2 = 180$ МВт, $P_3 = 170$ МВт.

С помощью табл. 1 находятся относительные приросты для наивыгоднейших нагрузок блоков, а по табл. 4 - относительный прирост станции при заданной нагрузке по формуле:

$$b_i = \frac{B_{i+1} - B_{i-1}}{P_{i+1} - P_{i-1}} \frac{т.у.т}{МВт * ч} \quad (16)$$

Расчет показывает, что равенство относительных приростов выполняется с достаточной точностью.

Предложенный в данной работе метод динамического программирования позволяет решать задачи с функциями $f_i(x_i)$ любого вида. Вид функции (выпуклость, вогнутость, наличие экстремумов) не вызывают затруднений.

Дополнительные условия в форме ограничений на переменные не усложняют, а, напротив, упрощают решение задачи, так как сокращается число анализируемых вариантов.

Таблица 5 Относительные приросты блоков b_1 и станции b_c

Относительные приросты блоков b_1 и станции b_c	$\frac{m.y.m}{MВт * ч}$
b_1	0,315
b_2	0,32
b_3	0,32
b_c	0,32

Аппарат динамического программирования применим к решению задач в случае непрерывного изменения переменных. Только, решение оказывается приближенным вследствие дискретизации переменных и необходимости интерполяции функции между двумя соседними дискретными значениями переменных. Однако может быть достигнута требуемая точность путём дискретизации переменных с более мелким шагом.

Литература

1. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: Учеб. для вузов В.А. Веников, В.Г. Журавлёв, Т.А. Филипова.-2-е изд., переработ. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 1990.-335 с.
2. Оптимизация режимов энергетических систем. Синьков В.М., Богословский А.В., Григоренко В.Г., Калиновский Я.А., Огородников А.А. Издательское объединение «Вища школа», 1976, 308 с.
3. Математические методы оптимального планирования развития и эксплуатации энергосистем. Мн."Вышейш. школа", 1972.
4. Электроэнергетический комплекс. Экономический анализ и оптимальные решения. П.П. Долгов, И.Е. Нелидов, И.М. Савин. Издательское объединение «Вища школа», 1985.

Поступила в редакційну колегію 01.02.2002 р.