

λ_i — переменный по времени множитель;

P_{ii}, P_{ij} — соответственно нагрузки i -ой ($i = 1, 2, \dots, m$) тепло-станции и j -ой ($j = 1, 2, \dots, n$) гидростанции;

$P_{\Sigma}, \Delta P$ — соответственно нагрузка энергосистемы и потери в линиях электропередач;

$\vec{P}_i, \vec{V}_i, \vec{V}_e$ — соответственно векторы с компонентами $(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}), (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}), (V'_{e1}, V'_{e2}, \dots, V'_{en})$;

K_{ij}, Q_{ij} — соответственно притоки в водохранилище и расходы через турбины j -ой гидростанции системы;

V'_{ij} — используемый в течение цикла регулирования объем воды на j -ой ГЭС.

Кривые, реализующие экстремум рассматриваемого функционала, как известно, должны удовлетворять дифференциальным уравнениям Эйлера-Лагранжа, которые, применительно к рассматриваемой задаче, могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial B_i}{\partial P_{ii}} - \lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ii}} \right) = 0; \quad (5)$$

$$\lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ij}} \right) \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ij}} - \frac{d}{dt} \left[\lambda_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ij}} \right) \frac{\partial P_{ij}}{\partial V'_{ij}} \right] = 0.$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n.$$

Если систему уравнений (5) дополнить (3), то число полученных уравнений достаточно для определения $(m+n+1)$ неизвестных функций $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}$; $P_{\Sigma 1}, P_{\Sigma 2}, \dots, P_{\Sigma n}$; λ_i . А граничные условия для гидростанции дают возможность определить $2n$ произвольных постоянных в общем решении системы уравнений Эйлера-Лагранжа. Но так как моменты времени, в которых выполняются граничные условия для каждой ГЭС, приняты неизвестными, поскольку один и тот же объем воды в течение суток можно использовать при разных продолжительностях цикла регулирования, то данная задача относится к более широкому классу вариационных задач с подвижными границами.

В этом случае $2n$ недостающих условий для определения произвольных постоянных общего решения уравнений Эйлера-Лагранжа могут быть получены из условия трансверсальности, записываемого для j -ой ГЭС в следующем виде:

$$\left[\sum_{i=1}^m B_i + \lambda_j V'_{ij} H_j \right]_{t_k=t_j}^{t_k=t_j} - \lambda_j H_j \Big|_{t_k=t_j}^{t_k=t_j} = 0, \quad (6)$$

где

$$H_j = \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ij}} \right) \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_{ij}}$$

t, t_0 — переменные значения моментов времени, где выполняются граничные условия;

$q, \delta V_{ij}$ — соответственно вариации по t и V_{ij} .

В случае наличия конечного числа разрывов искомым функциям, что является вполне реальным и зависит от характеристик станций системы и конфигурации графика нагрузки, задача еще более усложняется, поскольку экстремали, реализующие экстремум рассматриваемого функционала в точках излома, должны удовлетворять также условию Вейерштрасса-Эрмана

$$\left(\lambda_t H_j \Big|_{t=0} - \lambda_t H_j \Big|_{t=0} \right) \delta V_{ij} + \left(\sum_{i=1}^m B_i + \lambda_t V_{ij} H_j \right) \Big|_{t=0} - \left(\sum_{i=1}^m B_i + \lambda_t V_{ij} H_j \right) \Big|_{t+\delta t} = 0. \quad (7)$$

Выражения (3), (5), (6), (7) образуют полную систему уравнений для решения поставленной задачи в случае, когда граничные точки являются подвижными и имеются разрывы. Аналитическое решение полученных уравнений вряд ли возможно, поскольку известно, что вообще в редких случаях для элементарных функций удается найти решение уравнений Эйлера-Лагранжа. В конкретном случае это положение еще более усугубляется условиями (6), (7) и наличием скачков и изломов в энергетических характеристиках станций, которые входят в приведенные математические выражения.

Поэтому при решении рассматриваемой задачи воспользуемся теми же приемами, которые приняты в энергетической практике при оптимизации режимов сложных энергосистем, но в сочетании с методом последовательных приближений для учета условий (6), (7). С этой целью из уравнений (5), приняв напоры на ГЭС постоянными, а граничные условия закрепленными, после несложных преобразований получим известное условие оптимального режима работы станций системы [2], записываемое в следующем виде:

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ii}}} = \lambda_j \frac{q_j}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{ij}}} \quad (8)$$

где $b_i = \frac{\partial B_i}{\partial P_{ii}}$; $q_j = \frac{\partial Q_j}{\partial P_{ij}}$ — соответственно относительные приросты i -ой теплостанции и j -ой гидростанции;

$\frac{\partial \Delta P}{\partial P}$ — относительные приросты потерь активной

мощности в линиях электропередачи;

λ_j — множители, постоянные в течение цикла регулирования.

Условие (8) совместно с (2), (3) дает возможность одновременно с назначением оптимального режима работы станций системы выбрать и оптимальный период регулирования ГЭС. При этом, условия (6), (7), выражающие изменение расхода топлива, обусловленное вариациями δt , δV в моменты времени t_0 , t_1 и в точках излома, заменяются проверкой условия изменения расхода топлива по системе и зависимости от продолжительности периода регулирования ГЭС. Последнее достигается выполнением условия (8) для ряда фиксированных периодов регулирования с последующим определением расхода топлива по системе и их сопоставлением.

В свете сказанного, вкратце рассмотрим алгоритм решения поставленной задачи в предположении, что изменениями потерь в сетях можно пренебречь и в энергосистеме, кроме тепловых станций, имеется только одна ГЭС, т. е. $j = 1$. Рассматриваемый алгоритм служит основой для более общего алгоритма, когда в энергосистеме имеются несколько регулирующих ГЭС.

1. Определяется предел изменения t ($t_{\min} < t < t_{\max}$).

2. Приняв какое-то значение t в указанном пределе, согласно условию (8) и с учетом принятых допущений, производится оптимальное распределение нагрузки между станциями системы. По полученному режиму работы гидростанции подсчитывается суточный объем неиспользуемой воды (V_1) и сопоставляется с заданным — V_2 . Если полученное значение V_1 больше или меньше заданного, то t нужно соответствующим образом скорректировать и весь расчет повторить снова. Расчет в такой последовательности производится несколько раз до получения необходимого соответствия между расчетным и заданным значениями суточного расхода воды на гидростанции. Полученный режим работы станций системы и продолжительность цикла регулирования ГЭС принимается за оптимальный в первом приближении.

3. Для этого режима, в зависимости от полученных часовых значений P_i ($i = 1, 2, \dots, 24$) по эквивалентной расходной характеристике тепловых станций, подсчитываются часовые (B^1) и суточные (B) расходы топлива.

4. Уменьшается продолжительность цикла регулирования ГЭС, полученная в первом приближении, на 1 час. Уменьшение производится в порядке возрастания нагрузки, т. е. от меньшего ее значения к большему. Для этого фиксированного периода времени работы ГЭС снова, согласно пунктам 2 и 3, производится расчет и определяется новое значение B^1 .

5. Полученное B^1 сопоставляется с B . Если $B^1 < B$, то опять уменьшаем продолжительность работы ГЭС на 1 час и расчеты по пунктам 2 и 3 производим заново. Расчет в такой последовательности продолжается до тех пор, пока последовательное уменьшение периода работы ГЭС не приведет к увеличению расхода топлива по системе.

Тот период работы ГЭС и соответствующий режим работы станций

системы, после которого наблюдается увеличение расхода топлива, и принимается за оптимальный.

При наличии в энергосистеме нескольких гидроэлектростанций задача решается с использованием метода циклической диспетчеризации в следующей последовательности.

3. По условию (8) определяются оптимальные режимы работы всех станций системы. При этом ограничения по объемам используемой воды на каждый ГЭС выполняются одновременно посредством варьирования множителей λ_j ($j = 1, 2, \dots, n$). Полученные режимы работы всех ГЭС, кроме одной, допустим n -ой, фиксируются.

6. Для n -ой гидроэлектростанции на основе вышеизложенного алгоритма (п.п. 5) определяется оптимальный режим ее работы, а затем — расход условного топлива по системе.

7. Далее переходим к $(n-1)$ -ой гидроэлектростанции, фиксируя полученный режим n -ой и других оставшихся ГЭС.

В этом случае также определяются оптимальный режим работы данной ГЭС и расход условного топлива по системе (п.п. 5).

Расчеты в такой последовательности продолжаются до тех пор, пока не будут охвачены все гидроэлектростанции системы. Завершая таким образом один цикл, снова возвращаются к n -ой гидроэлектростанции, и в вышеизложенной последовательности производятся расчеты во втором цикле, и так несколько раз.

Расчет заканчивается, когда разница расхода условного топлива по системе в двух последних циклах не превышает наперед заданной погрешности.

Использование метода циклической диспетчеризации при решении подобных задач, которые можно отнести к комбинаторным задачам, позволяет значительно сократить объем вычислительных операций, поскольку на каждом шаге оптимизируется режим работы только одной ГЭС.

Действительно, чтобы найти оптимальное решение с учетом перерывов работы каждой ГЭС, нужно проанализировать полное число возможных решений, равное $\prod_{j=1}^n (t+1)_j$, где t — число часов, на которое сокращается продолжительность работы j -ой ГЭС.

Хотя подобный анализ в принципе и возможен, но практически не осуществим даже при применении быстродействующих вычислительных машин.

При циклической же диспетчеризации полное число возможных решений равно $k \sum_{j=1}^n (t-1)_j$ (где k — число циклов), что намного меньше, чем в первом случае. Например, при наличии в энергосистеме 4 ГЭС использование метода циклической диспетчеризации позволяет число возможных решений сократить в 15–20 раз.

На основе изложенного алгоритма составлена программа для реализации на ЭВМ «Раздан-2». Указанная программа была использо-

вана для оптимизации суточных режимов работы гидротепловой энергосистемы при наличии в ней одной, двух и четырех гидроэлектростанций.

Некоторые результаты расчетов при наличии в системе двух ГЭС приведены в табл. 1. В столбцах 3, 4, 5 таблицы приведены соответственно нагрузки эквивалентной тепловой станции и первой, второй ГЭС, полученные в результате оптимального распределения часовых нагрузок

Таблица 1

Часы	P_c мвт	$P_{г1}$ мвт	$P_{г2}$ мвт	P_1 мвт	$P_{г1}$ мвт	$P_{г2}$ мвт	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1050	949.5	64.1	36.4	971.0	0	79.0
2	1000	909.7	61.7	28.6	943.1	0	56.9
3	940	857.1	55.3	27.6	910.0	0	0
4	900	821.8	51.4	26.8	900.0	0	0
5	900	821.8	51.4	26.8	900.0	0	0
6	970	881.4	60.2	28.4	970.0	0	0
7	1060	953.3	64.5	42.2	976.5	0	0
8	1170	1009.7	70.4	89.9	998.2	81.6	90.2
9	1270	1088.0	85.6	96.4	1027.0	149.5	93.5
10	1350	1111.7	141.1	97.2	1036.4	219.1	91.5
11	1300	1097.7	105.6	96.7	1030.6	175.5	93.9
12	1210	1036.5	79.6	93.9	1016.8	100.6	92.6
13	1140	984.0	67.5	88.5	1044.5	0	95.5
14	1160	1001.1	69.4	89.5	1063.9	0	96.1
15	1200	1029.3	77.6	93.1	1015.1	92.4	92.5
16	1290	1095.0	98.4	96.6	1029.5	166.7	93.8
17	1390	1122.5	170.0	97.5	1041.8	252.9	95.3
18	1490	1145.0	246.7	98.3	1110.7	281.7	97.6
19	1600	1174.0	320.0	106.0	1174.0	320.0	106.0
20	1540	1151.4	287.3	101.3	1149.0	289.7	101.3
21	1170	1142.1	229.8	98.1	1093.1	279.5	97.1
22	1380	1119.9	162.7	97.4	1040.3	244.6	95.1
23	1280	1092.2	91.3	96.5	1028.4	158.0	93.6
24	1140	984.0	67.5	88.5	1044.5	0	95.5

$V_{г1}$ млн м ³ в т.сут	$V_{г1} = 10.78; V_{г2} = 9.01$ 8693	$V_{г1} = 10.8; V_{г2} = 8.9$ 8639
--	---	---------------------------------------

зок энергосистемы P_c между ними при заданных $V_{г1}^* = 10.8 \cdot 10^6$ м³ и $V_{г2}^* = 9.0 \cdot 10^6$ м³. В столбцах 6, 7, 8 приведены значения нагрузок указанных станций при тех же $V_{г1}^*$ и $V_{г2}^*$, но с учетом продолжительности работы каждой ГЭС. Внизу, в последних двух строках таблицы, для этих режимов соответственно приведены полученные значения объемов воды и расходов топлива.

Проведенные исследования показали, что учет оптимальных периодов работы каждой ГЭС, начиная с $V_{гj}^* > 1.2V_{гj}^*_{(max)}$, приводит к уменьшению значений, гидроэлектростанции за рассматриваемый период работают почти вается, доходя до некоторого максимального значения при объемах используемой воды на каждой ГЭС, близких к средним, а затем повышается, и при $V_{гj}^* \approx 0.75V_{гj}^*_{(max)}$ становится равным нулю.

Такой характер изменения расхода топлива по системе объясняется тем, что при $V'_{гг}$, близких к своим минимальным или максимальным значениям, гидростанции за рассматриваемый период работают почти вынужденным режимом.

В целом, для средних условий при доле ГЭС примерно 20-25% от общей мощности энергосистемы, снижение расхода топлива по системе в связи с учетом оптимальных периодов работы гидростанций может составить порядка 0,3-0,5%. В этом случае к известному эффекту от краткосрочной оптимизации, оцениваемого экономией топлива в размере 1,2-1,5% [3], приплюсовывается эффект от учета оптимальной продолжительности периодов работы ГЭС. В итоге величина экономии составит порядка 1,5-2% от общего расхода топлива по системе.

Выводы. 1. Задача выбора оптимальных режимов работы ГЭС в энергосистеме, если нет заранее установленных физических ограничений по продолжительности их работы, должна в принципе рассматриваться как вариационная с подвижными границами и разрывными решениями.

2. Учет оптимальной продолжительности работы ГЭС при краткосрочной оптимизации режимов энергосистем позволяет повысить экономию топлива по системе.

Л. И. НИИЭ

Поступило 7.11.1972.

Հ. Ա. ՍՈՒՌՅԱՉՅԱՆ

Հիպոթեզախիբ Լեւրգամամկարգի աշխատանքի սեփմաների կարեւատե օպտիմալացման հարցի շուրջը

Ու մ փ ո փ ո ս մ

Դիտված է Լեւրգամամկարգի սեփմաների օպտիմալացման հարցը՝ հարցի առնելով նրա մեջ բնորոշված ՀԷԿ-երի աշխատանքի օպտիմալ տեղադրությունը: Յույց է սոված, որ այդ դեպքում խնդիրը պետք է դիտվի որպես վարիացիոն՝ շարժական սահմաններով: Եարադրված է խնդրի լուծման ալգորիթմը և բերված են որոշ արդյունքներ իր կապում երկու ՀԷԿ ստեղծող մամկարգի վերաբերյալ: Տված է էֆեկտի գնահատականը՝ կախված Լեւրգամամկարգում ՀԷԿ-երի օպտիմալ տեղադրության հաշվառումից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бурмачев Г. А. Топливный эффект НА-ГЭС при оптимальном режиме ее работы. В сб. «Выравнивание графиков нагрузки энергетических систем и выбор типа электростанций для покрытия пиковых нагрузок». Изд. «Наука», 1968.
2. Грохштейн В. М. Наиболее выгодные режимы работы гидростанций в энергетических системах. Госэнергоиздат, 1959.
3. Каргелишвили Н. А. Некоторые общие вопросы оптимизации режимов энергетических систем. Доклады к научно-техническому совещанию по оптимальным режимам работы гидроэлектростанций в энергосистемах, часть 1, М., 1956.