

Г.А. БУРНАЧЯН, А.Г. СТЕПАНЯН

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГАЭС С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ ВЕРХНЕГО БАССЕЙНА

Предлагается метод выбора оптимальных режимов работы ГАЭС суточного цикла регулирования с переменным напором. Результаты исследований показали необходимость учета колебаний напора при оптимизации режимов работы ГАЭС, поскольку в этом случае более обоснованно может быть определен расход топлива по системе.

Ключевые слова: энергосистема, график нагрузки, циклы заряда и разряда, бьеф, режимы.

Целью настоящей работы является выбор режима работы ГАЭС суточного цикла регулирования с учетом изменения уровня воды верхнего бассейна. Данный вопрос является существенным для ГАЭС "чистого типа" с напорами порядка 150...200 м, когда колебания уровня воды верхнего бассейна значительны (10...15 м). Если изменение напора на ГАЭС более 5%, то его влияние на экономичность работы ГАЭС требует соответствующего учета при выборе ее оптимальных режимов.

Учет изменения напора на ГАЭС может быть реализован лишь при наличии заранее для определенных значений напора построенных энергетических характеристик - расходной характеристики и характеристики относительного прироста.

Постановка задачи. Выбор оптимального суточного режима работы ГАЭС с переменным напором в тепловой энергосистеме, состоящей из конденсационных станций, исходя из критерия минимума расхода условного топлива, сводится к обычной вариационной задаче на безусловный экстремум [1, 2], где отыскивается минимум некоторого функционала

$$J = \int_{t_0}^{t_k} \left(\sum_{i=1}^m B_i + \lambda_t \varphi_t \right) dt \quad (1)$$

с граничными условиями

$$V_{\Gamma}^{\pm}(t_0) = 0, \quad V_{\Gamma}^{\pm}(t_k) = V_{\Gamma}^3, \quad (2)$$

где

$$\varphi_t = \sum_{i=1}^m P_{Ti} \pm P_{\Gamma}(V_{\Gamma}, V'_{\Gamma}) - P_C - \Delta P = 0, \quad (3)$$

$$V'_{\Gamma} = \frac{dV_{\Gamma}}{dt} = Q_{\Gamma}. \quad (4)$$

Здесь B_i - часовой расход условного топлива на i -й станции; λ_t - переменный по времени множитель; P_{Ti} - нагрузка i -й конденсационной станции ($i=1,2,\dots,m$); P_r - нагрузка ГАЭС (знак “плюс” соответствует циклу разряда, а “минус” - заряда); $P_c, \Delta P$ - соответственно нагрузка энергосистемы и потери в линиях энергопередач; V_r^3 - используемый в течение цикла регулирования ($t_k - t_0$) объем воды на ГАЭС.

Кривые, реализующие экстремум функционала (1), как известно, должны удовлетворять дифференциальным уравнениям Эйлера-Лагранжа, которые применительно к рассматриваемой задаче с учетом циклов заряда и разряда могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_i}{\partial P_{Ti}} + \lambda_t \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right) - \frac{d}{dt} \frac{\partial B_i}{\partial P_{Ti}} &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ \lambda_t \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right) \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} - \frac{d}{dt} \left[\lambda_t \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right) \frac{\partial P_T}{\partial Q_T} \right] &= 0, \\ -\lambda_t \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right) \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} - \frac{d}{dt} \left[\lambda_t \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right) \frac{\partial P_H}{\partial Q_H} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая последний член первого равенства системы уравнений (5) равным нулю, т.е. пренебрегая переходными процессами на тепловых станциях, определим величину λ_t :

$$\lambda_t = - \frac{b_i}{1 - \partial \Delta P / \partial P_{Ti}},$$

где $b_i = \partial B_i / \partial P_{Ti}$ - относительный прирост расхода топлива на i -й тепловой станции.

Подставив выражение λ_t в (2) и (3), получим

$$\begin{aligned} - \frac{b_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right)}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} + \frac{d}{dt} \left[\frac{b_i \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right)}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_T}{\partial Q_T} \right] &= 0, \\ - \frac{b_i \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right)}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} - \frac{d}{dt} \left[\frac{b_i \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right)}{\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_H}{\partial Q_H} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначив отношения

$$\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}\right) / \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}\right) \quad \text{и} \quad \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H}\right) / \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}\right)$$

через σ_T и σ_H , а также проинтегрировав (6), получим

$$\begin{aligned} -\int \sigma_T b_i \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} + \sigma_T b_i \frac{\partial P_T}{\partial Q_T} &= C_T, \\ \int \sigma_H b_i \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} + \sigma_H b_i \frac{\partial P_H}{\partial Q_H} &= C_H. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что $\frac{\partial P_T}{\partial Q_T} = q_T$, $\frac{\partial P_H}{\partial Q_H} = q_H$ - соответственно относительные приросты

ГАЭС в турбинном и насосном циклах, а $b_i/q_T = \lambda_T(t)$ и $b_i/q_H = \lambda_H(t)$, систему (7) можно записать в следующем виде:

$$\sigma_T \lambda_T(t) - \Delta \lambda_T(t) = C_T, \quad \sigma_H \lambda_H(t) + \Delta \lambda_H(t) = C_H, \quad (8)$$

где

$$\Delta \lambda_T(t) = \int b_i \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} dt, \quad \Delta \lambda_H(t) = \int b_i \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} dt.$$

Из (8) видно, что значения λ_T и λ_H в течение цикла заряда и разряда при изменении напора являются переменными и меняются в каждый момент времени. Если взамен членов, стоящих под знаком интеграла, подставить их размерности, то получим, что величина $\Delta \lambda_H$ выражается в тоннах у.т. на 1 м^3 поднятой воды, т.е. характеризует меру дополнительного расхода топлива, получаемого в результате наполнения верхнего водохранилища. Таким образом, если величина $(\lambda_H + \Delta \lambda_H)$ в целом представляет собой меру перерасхода топлива при подаче 1 м^3 воды ГАЭС, то $(\lambda_T - \Delta \lambda_T)$, наоборот, выражает меру эффективности использования воды на ГАЭС в турбинном цикле с учетом последствий в период сработки водохранилища.

Из выражения (8) после некоторых преобразований получим условие оптимального режима работы ГАЭС в энергосистеме:

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}} = (C_T + \Delta \lambda_T) \frac{q_T}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}} = (C_H - \Delta \lambda_H) \frac{q_H}{1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H}}, \quad (9)$$

где

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}} = (C_T + \Delta \lambda_T) \frac{q_T}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}} - \quad \text{для цикла разряда,}$$

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}} = (C_H - \Delta \lambda_H) \frac{Q_H}{1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H}} \quad - \text{ для цикла заряда.}$$

Алгоритм задачи. Для решения поставленной задачи необходима следующая исходная информация:

1. Графики нагрузки энергосистемы.
2. Энергетические характеристики тепловых станций: расходная характеристика и характеристика относительных приростов.
3. Энергетические характеристики ГАЭС в турбинном цикле (рис.1).
4. Объем воды, используемой на ГАЭС ($2,3(10^6 \text{ м}^3)$).
5. Кривая связи уровня и объема воды верхнего водохранилища ГАЭС и зависимость dH/dV от V (рис.2).

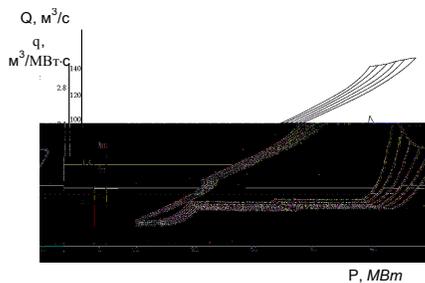


Рис.1

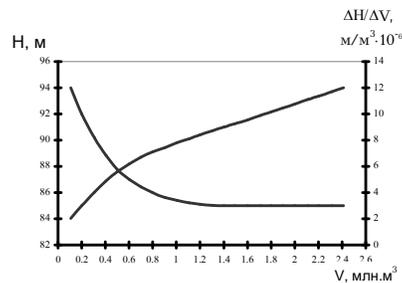


Рис.2

При решении задачи приняты следующие допущения:

1. Уровень нижнего бьефа остается неизменным.
2. Относительные приросты потерь в сетях приняты равными нулю, что справедливо для концентрированной энергосистемы.

Водоохранилище ГАЭС к моменту работы в турбинном режиме должно быть заполнено до наибольшего допустимого уровня $H = 94 \text{ м}$.

Используя формулу $\mathcal{E} = \eta_T \cdot H_T \cdot V / 367$, методом вливания энергии определим область работы ГАЭС в турбинном режиме ($t \dots t + \tau$). Принимая за начальный момент времени t , определим область изменения λ_t при максимальном значении напора:

$$b_{\min} / q_{\max} \leq \lambda_t < b_{\max} / q_{\min} .$$

Из этой области выбирается произвольное значение λ_t , при котором производится оптимальное распределение нагрузки для данного часа и находятся b , q , Q , P_T , P_G .

Имея расход воды ГАЭС в t -м часе, определим изменение объема воды в водохранилище по следующей зависимости:

$$\Delta V = \Delta t (Q_{\text{пр.}} - Q),$$

где $Q_{пр.}$ - приток воды к водохранилищу ($Q_{пр.} = 0$); Q - расход воды через турбины ГАЭС;

$\Delta t = 3600$ с. (Знак “минус” означает сработку водохранилища).

Следовательно, объем воды в водохранилище к началу следующего часа составит $V_{t+1} = V_t - \Delta V$, а напор - H_{t+1} по зависимости $H=f(V)$.

Для этого часа, имея величину напора, нагрузку и λ , производится новое распределение нагрузки и находятся q , b , Q , P_T , P_T для $t+1$, а также $\Delta\lambda_{t+1}$ по формуле

$$\Delta\lambda_{t+1} = \Delta\tau dH/dV bQ10^{-2}.$$

Следовательно, к моменту времени $t+1$ величина λ_{t+1} составит

$$\lambda_{t+1} = \lambda_t - \Delta\lambda_{t+1}.$$

Расчет в такой последовательности производится до полного опорожнения водохранилища. Затем методом вливания энергии в провал графика нагрузки определяется режим заряда ГАЭС с тем, чтобы к началу цикла заряда водохранилище было бы заполнено, т.е. в обоих циклах работы должно выполняться условие (2). Если эти условия нарушаются, то определяется новое значение λ_t , и весь расчет в вышеизложенной последовательности повторяется. Окончательные результаты расчетов в обоих циклах работы ГАЭС приведены в таблице, где столбцы 1,9,10 показывают часы и соответствующие им режимы работы гидроаккумулирующей станции с тепловыми станциями системы.

Таблица

Цикл разряда или турбинный режим									
Часы	$P_c, MВт$	$\lambda(\tau)$	$\Delta\lambda(\tau)$	C	$Q, м^3/с$	$\Delta V 10^3, м^3$	$H, м$	$P_T, MВт$	$P_T, MВт$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	665	0,243	—	0,243	125	450	94	568	97
18	700	0,2467	0,0044	0,2423	123	442,8	92,7	606	94
19	742	0,148	—	0,148	149	536,4	91,3	635	107
20	725	0,2485	0,0052	0,2433	121	436,5	89,7	635	90
21	690	0,2487	0,0055	0,2432	85	306	87,9	628	62
22	625	0,2478	0,0044	0,2434	38	136,8	85,3	597	28
Цикл заряда или насосный режим									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	490	—	—	—	51	283,6	85,9	490	55
2	455	—	—	—	73	262,8	88	455	80
3	425	—	—	—	82	295,2	89,2	425	95
4	400	—	—	—	85	306	90,2	400	100
5	400	—	—	—	85	306	91,2	400	100
6	430	—	—	—	81	291,6	92,1	430	95
7	520	—	—	—	21	75,6	92,3	520	25
12	505	—	—	—	26	93,6	92,5	505	35
13	475	—	—	—	58	208,8	93,2	475	70
14	475	—	—	—	63	226,8	93,7	475	75
15	535	—	—	—	9	32,4	93,8	535	15
24	520	—	—	—	15	54	94	520	20

Для обоснования целесообразности учета влияния колебаний напора по сравнению с принятым на практике расчетным напором определим H_h для цикла заряда по зависимости

$$H_h = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta t_i \sqrt{H_{oi}}}{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta t_i} \right)^2$$

и для этого случая по методике [1] найдем оптимальный режим работы ГАЭС при тех же принятых исходных данных. Условный расход топлива по системе в случае переменного напора получился (от общего расхода топлива по системе) на 1,0% меньше, чем при $H_h = 90$, 1м, что подтверждает целесообразность расчетов с учетом колебаний напора с целью правильного обоснования величины расхода топлива по системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурначян Г.А.** Топливный эффект ГАЭС при оптимальном режиме работы. – М.: Наука, 1968. –С. 123-130.
2. **Бурначян Г.А.** Оптимизация режимов работы сложных энергосистем с ГАЭС // Изв. АН АрмССР. –1971.– С. 28-33.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.03.2001.

Հ.Ա. ԲՈՒՆԱՉՅԱՆ, Ա.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ

ՀԱԷԿ-Ի ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՌԵՃԻՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒԹՅՈՒՆԸ՝ ՎԵՐԻՆ

ԱՎԱԶԱՆԻ ՏՍՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ

Առաջարկված է փոփոխական էջքով ՀԱԷԿ-ի օրական կարգավորման օպտիմալ աշխատանքային ռեժիմների ընտրությունը: Հետազոտության արդյունքները ցույց են տվել, որ անհրաժեշտ է հաշվի առնել էջքի տատանումները ՀԱԷԿ-ի աշխատանքային ռեժիմների լավարկման դեպքում, ինչն ավելի կհիմնավորի համակարգի վառելիքի ծախսի դրոշումը:

H.A.BOURNACHYAN, A.G.STEPANYAN

OPTIMUM WORKING REGIME OF HAEP IN VIEW OF UPPER RESERVOIR WATER-LEVEL FLUCTUATION

A methodic of optimum working regime selection of HAEP for a daily regulation with variable head is proposed. The result of investigation revealed the necessity of talking into account the head fluctuation in case of HAEP working regime optimization as in this case the consumption of the fuel according to the sistem can be justified.