

Г. А. БУРНАЧЯН

К ВЫБОРУ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО РЕЖИМА РАБОТЫ
НАСОСНО-АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
(НА-ГЭС) В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Вопросы оптимального покрытия переменной зоны графиков нагрузок энергетических систем различными высокоманевренными электростанциями, к числу которых относятся и насосно-аккумулирующие гидроэлектростанции (НА-ГЭС), приобретают все большую актуальность ввиду тех значительных изменений, которые произойдут в структуре электропотребления и электропроизводства энергосистем.

В настоящей работе, в отличие от существующих методов установления режима работы НА-ГЭС в энергосистеме по среднему значению к.п.д. аккумулярования (сущность этих методов и недостатки указаны в [5]), предлагается более правильный подход для выбора оптимального режима работы НА-ГЭС исходя из ее энергетических характеристик, построение которых описано в [5]. Выбор оптимального режима работы НА-ГЭС производится по критерию минимума расхода топлива по системе и рассматривается как задача, решаемая отдельно для циклов заряда и разряда, т. е. для насосного и турбинного режимов.

Определение наиболее выгодного режима работы НА-ГЭС в насосном режиме осуществлено по принципу оптимальности динамического программирования, сущность которого заключается в следующем: «Оптимальная стратегия обладает тем свойством, что, каковы бы ни были изначальное состояние и принятое решение, последующие решения должны составлять оптимальную стратегию относительно состояния, возникшего в результате первоначального решения». В рассматриваемом случае задача заключается в таком распределении заданного количества воды (W_n), подаваемого насосами в верхний бассейн в течение цикла заряда, чтобы дополнительный расход топлива на тепловых станциях системы был бы минимальным, что равнозначно условию минимума расхода топлива за этот же период, так как расход топлива, обусловленный режимом работы тепловых станций по заданному графику нагрузки, остается постоянным. Имея расходную характеристику НА-ГЭС, в насосном режиме, т. е. зависимость подачи воды от подведенной мощности $Q = F(N_n)$ (рис. 1б) для разных зна-

чений Q определяем соответствующие им величины подведенной мощности— N_a .

(Величины N_a подсчитаны с учетом потерь во всех элементах установки при насосном цикле работы НА-ГЭС, т. е. в трансформаторе, двигатель-генераторе, насосе и трубопроводе [5]).

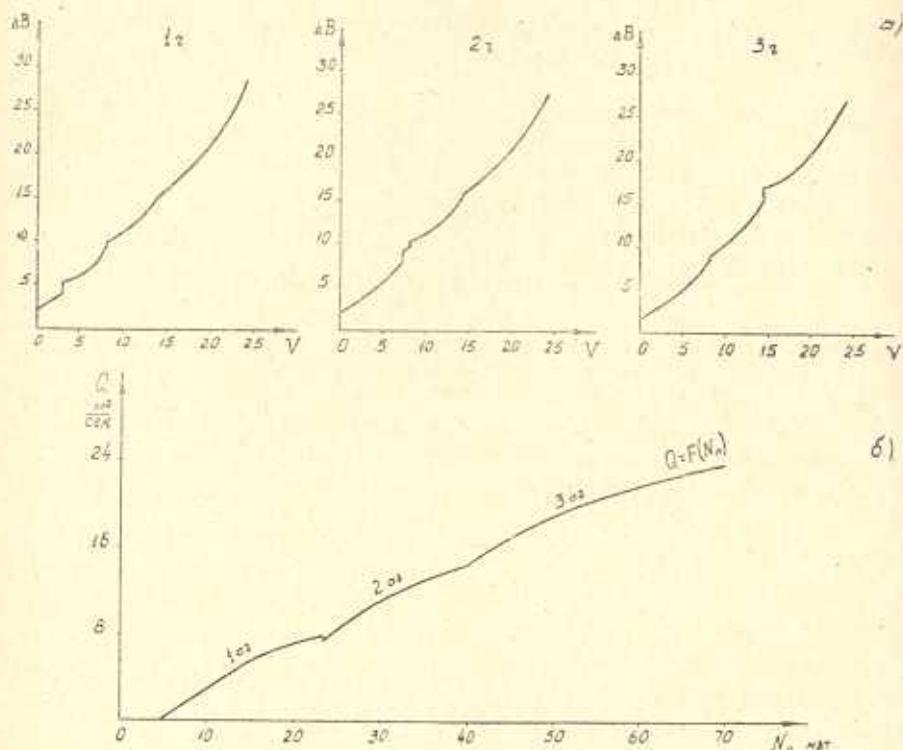


Рис. 1.

По значениям N_{aj} для каждого часа цикла заряда j , определяют величины суммарной нагрузки теплостанций N_{bj} и дополнительно расхода топлива ΔB_j

$$N_{bj} = N_{cj} + N_{aj}, \quad (1)$$

$$\Delta B_j = B(N_{bj}) - B(N_{cj}), \quad (2)$$

где $0 \leq N_{aj} \leq N_{\text{max}}$; $j = 1, 2, \dots, k$.

N_{max} — максимальная подведенная мощность к НА-ГЭС в течение цикла заряда,

k — число часов работы НА-ГЭС в цикле заряда;

$B(N_{bj})$ — расход топлива на тепловых станциях системы в j час, соответствующая суммарной нагрузке;

$B(N_{cj})$ — расход топлива на тепловых станциях системы в j час, соответствующая погребной нагрузке.

Значения $B(N_{bj})$ и $B(N_{cj})$ определяются по суммарной расходной характеристике группы теплостанций $B = f(\Sigma N_i)$ (рис. 4) [5].

По полученным значениям ΔB и соответствующим им $V = Q \cdot 3600$ для i -ого часа строится кривая зависимости $\Delta B_j = f(V)$ (рис. 1а). Та-

кие зависимости должны быть построены для всех часов цикла заряда $j = 1, 2, \dots, k$.

Используя эти зависимости, задаче можно дать следующую математическую формулировку.

$$\sum_{j=1}^k \Delta B_j = \sum_{j=1}^k f(V_j) = \min \quad (3)$$

при условиях

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^k V_j &= W_n, \\ 0 &\leq V_j \leq V_{\max}, \end{aligned}$$

где ΔB_j — дополнительный расход топлива на теплостанциях системы при подаче насосами определенного количества воды (V_j) в j час;

W_n — заданный объем воды, перекачиваемый насосами в верхний бассейн в течение всего цикла заряда.

V_{\max} — максимальная подача воды насосами.

Оптимальные значения V_j ($j = 1, 2, \dots, k$), которые удовлетворяют уравнению (3), определяются методом динамического программирования. Введя новые функции $F_2(A)$, $F_3(A)$, \dots , $F_k(A)$, которые выражают минимальный расход топлива для выработки дополнительной энергии, идущей на заряд НА-ГЭС в течение двух, трех, \dots , k часов и используя принцип оптимальности динамического программирования, решения уравнения (3) получается в виде следующих рекуррентных соотношений.

$$\begin{aligned} F_2(A) &= \min [f_2(V_2) + F_1(A - V_2)] \\ &0 \leq V_2 \leq V_{\max} \\ &V_2 \leq A, \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} F_3(A) &= \min [f_3(V_3) + F_2(A - V_3)] \\ &0 \leq V_3 \leq V_{\max} \\ &V_3 \leq A \end{aligned} \quad (4б)$$

.....

$$\begin{aligned} F_k(A) &= \min [f_k(V_k) + F_{k-1}(A - V_k)] \\ &0 \leq V_k \leq V_{\max} \\ &V_k \leq A \end{aligned} \quad (4к)$$

Сущность решения этих соотношений (4) заключается в последовательном определении $F_2(A)$, $F_3(A)$, \dots , $F_k(A)$ при различных значениях A [$0 \leq A \leq W_n$].

По величине минимального расхода дополнительного топлива в конце цикла заряда $F_k(A)$ при $A = W_n$ определяется количество воды, подаваемое насосами в этот час — (V_k) и за все предшествующие

$(k-1)$ часы. По минимуму расхода дополнительного топлива за $(k-1)$ часы определяется количество подаваемой воды в $(k-1)$ час — (V_{k-1}) и за все предшествующие $(k-2)$ часы. И так последовательно для каждого часа цикла заряда находят значения V_j и соответственно им Q_j , где $Q_j = \frac{V_j}{3600}$.

Используя расходную характеристику НА-ГЭС в насосном режиме [рис. 16] и равенство (1), по значению Q_j определяют величины подведенной мощности (N_{pi}) и суммарной нагрузки (N_{bj}) на теплостанциях системы в j -ый час.

Определив N_{bj} для всех часов цикла заряда НА-ГЭС, получим новый режим работы группы теплостанций за данный период, выбранный, исходя из критерия минимума расхода топлива по системе, с соблюдением условия — $\sum_{j=1}^k V_j - W_{ii} = 0$.

Разность величин $N_{bj} - N_{ei}$ соответствует невыгоднейшему режиму работы НА-ГЭС в насосном цикле в течение каждого часа j , а $\sum_{j=1}^k (N_{bj} - N_{ei})$ — энергии заряда (\mathcal{E}_3).

Установив невыгоднейший режим работы тепловых станций в часы заряда-НА ГЭС, вся рассматриваемая задача может быть сведена к определению невыгоднейшего режима работы НА-ГЭС в турбинном режиме и решена методом относительных приростов как для ГЭС в энергетических системах, так как работа НА-ГЭС в турбинном режиме принципиально ничем не отличается от работы обычных гидростанций.

Поэтому сущность метода относительных приростов и способы расчета невыгоднейших режимов ГЭС в энергетических системах, подробно описанные в [1], в настоящей статье не излагаются. Отметим лишь, что при наличии в системе m тепловых станций, n гидростанций и НА-ГЭС, условие невыгоднейшего режима работы всех электростанций системы без учета потерь в линиях передачи может быть представлено в виде

$$b_{ij} = \lambda_a q_{aj} = \lambda_u q_{uj}, \quad (5)$$

где b_{ij} , q_{aj} , q_{uj} — соответственно, относительные приросты i -ой теплостанции, a -ой гидростанции и НА-ГЭС в j -ый час;
 λ_a , λ_u — множители Лагранжа.

$$j = 1, 2, 3, \dots, 24; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad a = 1, 2, \dots, n.$$

Для определения невыгоднейшего режима работы НА-ГЭС рассмотрим некоторую энергетическую систему, график нагрузки которой приведен на рис. 2. Состав станций, участвующих в покрытии графика нагрузки принят из НА-ГЭС, гидростанция и группы тепловых станций оборудованных агрегатами ПВК-150, ВК-100, АК-50.

Объем воды на НА-ГЭС, перекачиваемый из нижнего бассейна в верхний и наоборот, принят равным $W_n = 410000 \text{ м}^3$. На основании расходных характеристик НА-ГЭС (рис. 1б) и группы теплостанций

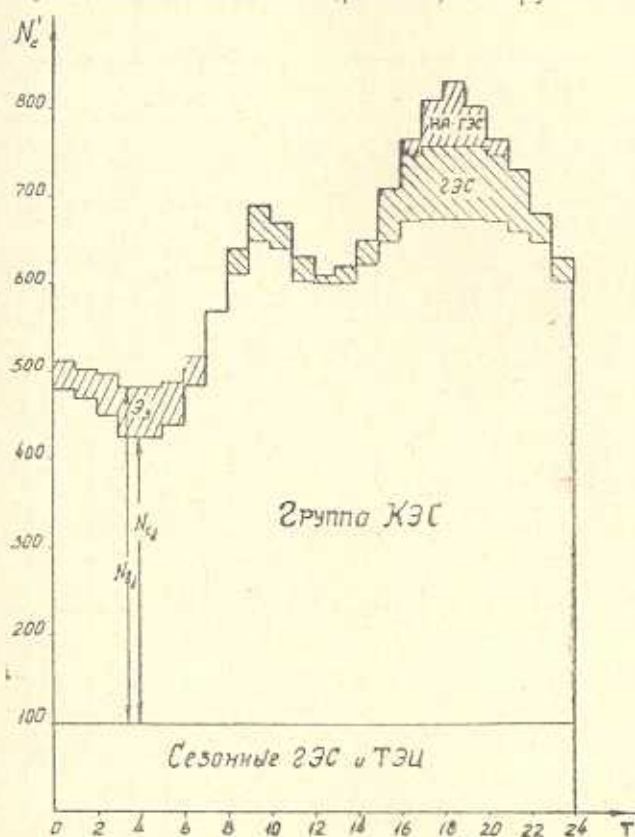


Рис. 2.

(рис. 4) [5] способом, описанным выше, строятся кривые зависимости $\Delta B_j = f(V)$ для всех часов цикла заряда $j = 1, 2, \dots, 7$ при $0 \leq V \leq \leq V_{\max} = 24 \cdot 3600 \text{ м}^3$ (для первых трех часов цикла заряда эти кривые приведены на рис. 1а). Расчеты по последовательному определению значений $F_1(A), F_2(A), F_3(A), \dots, F_k(A)$ и соответствующих им $V_1, V_2, V_3, \dots, V_7$ по уравнениям (4) целесообразно и легко выполнить в табличной форме.

Для определения оптимальных значений $V_1 = Q_1 \cdot 3600 \text{ м}^3$ и $V_2 = Q_2 \cdot 3600 \text{ м}^3$ подаваемых насосами в течение двух часов, при всех значениях A [$0 \leq A \leq 48 \cdot 3600$] с интервалом $\Delta V = 3 \cdot 3600 \text{ м}^3$ рассмотрим табл. 1.

В верхних двух строках таблицы заносятся значения Q_1 и ΔB_1 за 1-ый час цикла заряда, а в первых двух столбцах слева — Q_2 и ΔB_2 за 2-ой час (рис. 1а).

В отдельных клетках таблицы приведены суммарные расходы топлива при различных значениях V_1 и V_2 .

Как видно из таблицы, суммарное количество воды $A = V_1 + V_2 = 3600 (Q_1 + Q_2)$ подаваемое насосами в течение двух часов вдоль каждой диагонали, остается постоянным. Следовательно, при каждом

Таблица 1

3600	Q_1	0	3	6	9	12	15	18	21	24
Q_2	ΔB_2	2.1	4.15	6.65	10.45	12.65	16.25	19.05	22.55	28.65
0	2.0	4.1*	6.15	8.65	12.45	14.65	18.25	21.05	24.55	30.65
3	4.0	6.1*	8.15	10.65	14.45	16.65	20.25	23.05	26.55	32.65
6	6.45	8.55	10.6*	13.10	16.9	19.1	22.7	25.5	29.0	35.1
9	10.65	12.75	14.8	17.3	21.1	23.3	26.9	29.7	33.2	39.3
12	12.65	14.75	16.8	19.3	23.1	25.3	28.9	31.7	35.2	41.3
15	16.45	18.55	20.6	23.1	26.9	29.1	32.7	35.5	39.0	45.1
18	19.05	21.15	23.2	25.7	29.5	31.7	35.3	38.1	41.6	47.7
21	22.55	24.65	26.7	29.2	33.0	35.2	38.8	41.6	45.1	51.2
24	27.55	29.65	31.7	34.2	38.0	40.2	43.8	46.6	50.1	56.2

значении суммарного количества воды можно определить ту комбинацию V_1 и V_2 , которой соответствует минимум расхода топлива, т. е. для каждого A можно определить $F_2(A)$. (Минимальные расходы топлива в таблице обозначены звездочкой).

Например, при $A = 21 \cdot 3600 \text{ м}^3$, $F_2(A) = 22.7$ т.у.т.; а V_1 и V_2 соответственно равны $15 \cdot 3600 \text{ м}^3$, $6 \cdot 3600 \text{ м}^3$. Таким образом, табл. 1 при разных значениях A дает решение уравнения вида (4а).

Теперь перейдем к следующему этапу (табл. 2), т. е. когда суммарное количество воды A [$0 \leq A \leq 72 \cdot 3600$], подаваемое насосами, распределяется в течение трех часов цикла заряда.

В верхней строке таблицы 2 приведены значения суммарного количества воды $(Q_1 + Q_2) \cdot 3600 \text{ м}^3$, подаваемой насосами в течение двух часов, а соответствующие им минимальные расходы топлива во второй строке, т. е. в первых двух строках переписаны значения A и $F_2(A)$ из табл. 1.

В первых же двух столбцах таблицы записаны значения Q_3 и ΔB_3 за 3-й час цикла заряда из рис. 1а.

В самих клетках таблицы 2 приведены суммарные расходы топлива при подачах воды V_3 и $(V_1 + V_2)$. Из величин, записанных вдоль какой-либо диагонали, с определенным значением A выбирается то сочетание V_3 и $(V_1 + V_2)$, которому соответствует минимум расхода топлива. Такие сочетания при разных A дают решение уравнения вида (4б).

Например, при $A = 48 \cdot 3600 \text{ м}^3$, $F_3(A) = 50.5$ т.у.т. $V_3 = 18 \cdot 3600 \text{ м}^3$, а $(V_1 + V_2) = 30 \cdot 3600 \text{ м}^3$.

Таблица 2

3600	$Q_1 + Q_2$	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
	$Q_3 + Q_4$	4.1	6.1	8.15	10.6	13.10	15.55	19.1	22.7	25.3	28.9	31.7	35.2	38.1	41.6	45.1	50.1	56.2
0	1.8	5.9	7.9	9.95	12.4	14.9	18.45	20.9	24.5	27.1	30.7	33.5	37.0	39.9	43.4	46.9	51.9	58.0
3	3.5	7.6	9.6	11.65	14.1	16.6	20.15	22.6	26.2	28.8	32.4	35.2	38.7	41.6	45.1	48.6	53.6	59.7
6	6.1	10.2	12.2	14.25	16.7	19.2	22.75	25.2	28.8	31.4	35.0	37.8	41.3	44.2	47.7	51.2	56.2	62.3
9	9.6	13.7	15.7	17.75	20.2	22.7	26.25	28.7	32.3	34.9	38.5	41.3	44.8	47.7	51.2	54.7	59.7	65.8
12	12.5	16.6	18.6	20.65	23.1	25.6	29.15	31.6	35.2	37.8	41.4	44.2	47.7	50.6	54.1	57.6	62.6	68.7
15	17.0	21.1	23.1	25.15	27.6	30.1	33.65	36.1	39.7	42.3	45.9	48.7	52.2	55.1	58.6	62.1	67.1	73.2
18	18.8	22.9	24.9	26.95	29.4	31.9	35.45	37.9	41.5	44.1	47.7	50.5	54.0	56.9	60.4	63.9	68.9	75.0
21	22.3	26.4	28.4	30.45	32.9	35.4	38.95	41.4	45.0	47.6	51.2	54.0	57.5	60.4	63.9	67.4	72.4	78.5
24	27.35	31.45	33.45	35.5	37.95	40.45	44.0	46.45	50.05	52.65	56.25	59.05	62.55	65.45	68.95	72.45	77.45	83.55

Аналогично перейдя к следующим этапам,—таблицы 3, 4, 5 и 6 [в статье не приведены]—получим решения уравнений (4) для всех остальных часов цикла заряда.

Из последней 6-ой таблицы по диагонали, при $A = W_n = 114 \cdot 3600 \text{ м}^3$ находим то сочетание V_7 и $\sum_{j=1}^6 V_j$, которому соответствует минимум расхода дополнительного топлива в течение 7 часов цикла заряда $HA\text{-ГЭС} - V_7 = 12 \cdot 3600 \text{ м}^3$, $\sum_{j=1}^6 V_j = 102 \cdot 3600 \text{ м}^3$. Из пятой

таблицы при $A = \sum_{j=1}^6 V_j$ находим то сочетание V_6 и $\sum_{j=1}^5 V_j$, которому соответствует минимум расхода дополнительного топлива в течение 6 часов цикла заряда— $V_6 = 18 \cdot 3600 \text{ м}^3$, $\sum_{j=1}^5 V_j = 84 \cdot 3600 \text{ м}^3$.

Точно таким же образом из таблиц 4, 3, 2 и 1 находим:

$$V_5 = 21 \cdot 3600 \text{ м}^3, \sum_{j=1}^4 V_j = 63 \cdot 3600 \text{ м}^3; V_4 = 21 \cdot 3600 \text{ м}^3, \sum_{j=1}^3 V_j = 42 \cdot 3600 \text{ м}^3, \\ V_3 = 18 \cdot 3600 \text{ м}^3, V_1 + V_2 = 24 \cdot 3600 \text{ м}^3; V_2 = 12 \cdot 3600 \text{ м}^3, V_1 = 12 \cdot 3600 \text{ м}^3$$

Имея значения $Q_1, Q_2 \dots Q_n$, легко можно определить величины подведенной мощности (N_n) и суммарной нагрузки (N_b).

Наивыгоднейший режим работы группы теплостанций и $HA\text{-ГЭС}$ в цикле заряда, при заданном значении W_n , приведен в табл. 7.

Таблица 7

Часы	1	2	3	4	5	6	7
$N_c \text{ мвт}$	380	370	350	325	325	340	385
$N_n \text{ мвт}$	32	32	48	57	57	48	32
$N_b \text{ мвт}$	412	402	398	382	382	388	417
$B \text{ т. у. т.}$	155,0	151,0	149,0	142,0	142,0	145,0	156,0

$N_c = N'_c - 100$

$\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^n B_{ij} = 1040, \text{ т. у. т.}$

По характеристикам относительных приростов группы теплостанций, $HA\text{-ГЭС}$ в турбинном режиме и $ГЭС$, приведенных соответственно на рис. 4, 1 [5], соблюдая условие (5) [$\lambda_\sigma = 0,58$, $\lambda_n = 1,25$], устанавливается наивыгоднейший режим работы всех станций системы. Наивыгоднейший режим работы $HA\text{-ГЭС}$ в обоих режимах приведен на рис. 2.

Расход топлива для выбранного режима работы $HA\text{-ГЭС}$ в цикле заряда, подсчитанный по расходной характеристике группы теплостанций (рис. 4), [5] приведен в таблице 7 и равен—1040,0 т.у.т., а расход топлива при отсутствии $HA\text{-ГЭС}$ за тот же интервал времени будет—921 т.у.т.

Следовательно, дополнительный расход топлива, используемый для заряда НА-ГЭС составит—119 т.у.т.

Если режим работы НА-ГЭС в цикле заряда принять согласно существующим методам, т. е. выравнивая соответствующую зону графика нагрузки прямой линией, но так, чтобы за этот период была бы обеспечена насосами подача заданного количества воды (W_n), то получим, что в течение всего цикла заряда $N_b = 400$ мвт. В этом случае расход топлива на тепловых станциях системы составит ~ 1049 т.у.т. Разность расхода топлива по предлагаемой и существующей методикам равен 9 т.у.т., что составляет ~ 7,5% от дополнительного расхода топлива идущий на выработку энергии для заряда НА-ГЭС.

Результаты полученные в настоящей работе, в частности для цикла заряда, хорошо сходятся с [5], что говорит о возможности применения обеих методов для решения подобных задач. Однако необходимо отметить, что неклассический метод решения, приведенный в настоящей работе, позволяет сравнительно легко (по таблицам) определить второе граничное условие, т. е. конец цикла заряда, тогда как при использовании классического метода [5] определение этого условия намного сложнее.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 5.III 1964.

Հ. Ա. ՔՈՒՌԱՉԱՆ

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՍԻՍՏԵՄՈՒՄ ՊՈՄՊԱ-ԿՈՒՏԱԿԻԶ ՀԻՐՐՈՎԱՅԱՆԻ ԱՄԵՆԱԶԻՌՏՈՒ ԲԵԺԻՄԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՄՐԱԳՐՄԱՆ ԵՎԱՆԱԿՈՎ

Ա մ փ ո փ ու մ

Տվյալ հոդվածում պոմպա-կուտակիչ հիդրոէլեկտրակայանի (ՊԿ—ՀԷԿ) աշխատանքի ամենաձեռնարկը սեփմի բնտրման համար օգտագործված է դինամիկ ծրագրման օպտիմիզացիոն սկզբունքը: Ելնելով սխառմում աշխատող էլեկտրակայանների ու ՊԿ—ՀԷԿ-ի էներգետիկական բնութագրից, նաև էներգոսխառմի բեռի պրոֆիլից (նկ. 2), դինամիկական ծրագրման եղանակով լուծելով (4ա, 4б 4կ) հավասարումները (4ա և 4б լուծումները բերված է 1, 2 աղյուսակներում), որոշվում է ՊԿ—ՀԷԿ-ի ամենաձեռնարկը հզորությունները (N_n) լիցքավորման ցիկլի յուրաքանչյուր ժամի համար՝ նախօրոք կատարելով $\Delta B, = f(V)$ կապը: ՊԿ—ՀԷԿ-ի աշխատանքի սեփմը աուրբիանյին ցիկլում որոշվում է հարաբերական աճի հավասարեցման մեթոդով:

Հորվածում լուծված է մի օրինակ և ցույց է տրված, որ աշխատանքում բերված մեթոդը գոյություն ունեցող մեթոդների համեմատությամբ տալիս է վառելիքի 9,0 ա. տնտեսում, որը կազմում է ՊԿ—ՀԷԿ-ի լիցքավորման համար անհրաժեշտ վառելիքի — 7,5% -ը:

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Горштейн, Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. Госэнергоиздат, 1959.
2. Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс, Некоторые вопросы математической теории процессов управления. Изд. ин. литературы, 1962.
3. А. Вазоньи, Научное программирование в промышленности и торговле. Из-во ин. литературы, 1963.
4. Методы покрытия пиков электрической нагрузки, М., 1963.
5. Г. А. Бурнация, М. С. Саркисян, Выбор оптимального режима работы насосно-аккумулирующей гидроэлектростанции в энергетической системе. Изв. АН Армянской ССР, (серия ТН) № 4, 1964.