

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ.
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒԵՑԻՆ

Ադոնց Հ. Տ., Ալեքսեևսկի Վ. Վ., Գասպարյան Ա. Մ., Եղիազարյան Ի. Վ., Կասյան Մ. Վ., Նազարով Ա. Ի. (պատ. խմբագիր), Սիմոնով Մ. Ջ., Տեր-Ստեփանյան Ի. Ի., Փինաջյան Վ. Վ., Մանասյան Ա. Ս. (պատ. քարտուղար)։

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Адоныч Г. Т., Алексеевский В. В., Гаспарян А. М., Егiazаров И. В., Касьян М. В., Назаров А. И. (ответ. редактор), Пинаджян В. В., Симонов М. З., Тер-Степанян Г. И., Манасян А. С. (ответ. секретарь).

Ю. М. ШАХНАЗАРЯН

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕРКИ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Асинхронный ход в сложной электрической системе вызывает периодические возмущения на синхронно работающую часть системы.

Наиболее полно это отражается при ресинхронизации генератора после кратковременного асинхронного хода, вызывая взаимные колебания роторов остальных генераторов, оставшихся в синхронной работе. При этом частоты выпуждающих сил действующих на роторы синхронно работающих генераторов в процессе изменения скольжения асинхронно работающего генератора могут достичь, а затем и превзойти их собственные частоты. В этом случае наблюдается явление перехода роторов отдельных генераторов через состояние резонанса.

Эти колебания в некоторых случаях достигают опасных амплитуд, и происходит нарушение устойчивости синхронно-работающих генераторов электрической системы.

Задачей настоящей работы является выявление условий устойчивости электрической системы, при нестационарном асинхронном режиме другой, соседней электрически связанной с ней части системы. Схематически будем рассматривать электрическую систему, состоящую из трех соизмеримых по мощности генераторов (станций), из которых „Г—З“ после кратковременного асинхронного хода ресинхронизируется (рис. 1а).

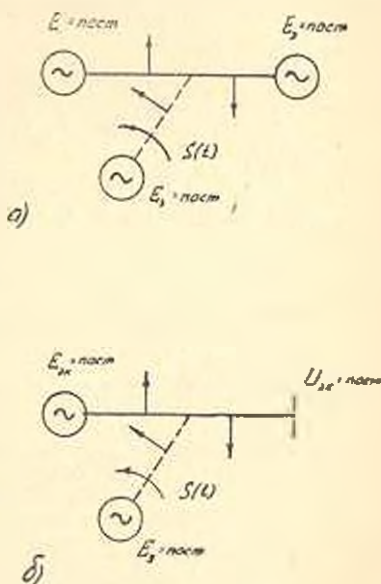


Рис. 1. Принципиальная схема системы из трех станций: а) основная схема; б) эквивалентная схема условной системы.

* Настоящая статья отражает материалы части работы выполняемой на кафедре электрических систем МЭИ под руководством проф. В. А. Веникова. При написании данной статьи автор использовал ценные советы А. В. Дабагяна.

При этом, оставшиеся в синхронизме генераторы „Г—1“ и „Г—2“* будут совершать малые колебания вокруг своих новых установившихся положений.

Возмущения, которые создает асинхронно работающий генератор „Г—3“, будем представлять, как действующую извне обобщенную силу, приложенную к колебательной системе роторов генераторов „Г—1“ и „Г—2“. Для получения дифференциального уравнения относительного движения роторов генераторов „Г—1“ и „Г—2“ будем пользоваться известным методом сведения уравнений движения двух генераторов к уравнению движения эквивалентного генератора работающего на шине неизменного напряжения (рис. 16).

При рассмотрении данной задачи сделаны следующие основные допущения:

1. Генераторы замещены переходными индуктивными сопротивлениями и приложенными за ними э. д. с.
2. Параметры генераторов, линий связи и нагрузок — линейны.
3. Скольжение ресинхронизируемого генератора происходит по линейному закону. Движение ротора этого генератора происходит при постоянном угловом ускорении.

Уравнение движения роторов двух генераторов „Г—1“ и „Г—2“:

$$T_{J1} \frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = P_{11} - P_{12} \sin (\delta_{12} - \psi). \quad (1)$$

При этом

$$\left. \begin{aligned} T_{12} &= \frac{T_{J1} T_{J2}}{T_{J1} + T_{J2}}, \\ P_{11} &= \frac{T_{J2}}{T_{J1} + T_{J2}} \left(P_{11} - \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} \right) - \frac{T_{J1}}{T_{J1} + T_{J2}} \left(P_{22} - \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} \right), \\ P_{12} &= \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{J1} + T_{J2}} \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2 T_{J1} T_{J2} \cos 2\alpha_{12}}, \\ \psi &= \arctg \left(\frac{T_{J2} - T_{J1}}{T_{J1} + T_{J2}} \operatorname{tg} \alpha_{12} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. генераторов;

T_{J1} и T_{J2} — постоянные инерции;

δ_{12} — относительный угол;

P_{11} и P_{12} — мощности первичных двигателей;

Z_{11} , Z_{22} , Z_{12} — собственные и взаимные полные сопротивления;

α_{11} , α_{22} , α_{12} — соответствующие дополнительные углы этих сопротивлений.

Подставляя уравнения (2) в уравнение движения эквивалентного генератора (1) и вводя члены, учитывающие возмущения асинхронно-

* Предполагается, что генераторы „Г—1“ и „Г—2“ имеют одинаковые параметры.

работающего генератора на колебательную систему роторов генераторов „Г—1“ и „Г—2“: линеаризуя в окрестностях нового установившегося положения^{*} δ_{120} и пренебрегая членами с производными высшего порядка, получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} = & \left[\frac{P_{11} - P_{11}}{T_{J1}} - \frac{P_{22} - P_{22}}{T_{J2}} \right] - \\ & - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2 T_{J1} T_{J2} \cos 2 \alpha_{12}} \times \\ & \times \sin \left[\delta_{120} - \arctg \frac{T_{J2} - T_{J1}}{T_{J1} + T_{J2}} \operatorname{tg} \alpha_{12} \right] + D \frac{d \Delta \delta_{12}}{dt} - \\ & - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \times \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2 T_{J1} T_{J2} \cos 2 \alpha_{12} \cos \left[\delta_{120} - \right. \\ & \left. \arctg \frac{T_{J2} - T_{J1}}{T_{J1} + T_{J2}} \operatorname{tg} \alpha_{12} \right] \Delta \delta_{12} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \frac{1}{T_{J1}} \sin (\delta_1(t) - \alpha_{13}) + \\ & + \frac{E_2 E_1}{Z_{23}} \frac{1}{T_{J2}} \sin (\delta_2(t) - \delta_{120} + \alpha_{23}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{11} = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11}$; $P_{22} = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22}$.

Последние два члена представляют собою возмущения асинхронно работающего генератора на колебательную систему роторов генераторов „Г—1“ и „Г—2“.

В уравнении (3) член зависящий от скорости изменения угла определяет рассеивание энергии в данной колебательной системе. Это рассеивание связано с успокоительными моментами, возникающими при малых колебаниях генераторов „Г—1“ и „Г—2“, а также с наличием успокоительного момента, возникающего на валу эквивалентного генератора при асинхронном ходе генератора „Г—3“.

Рассеивание энергии от активных потерь можно учесть достаточно точно, пользуясь функцией рассеивания по Релею [1].

Успокоительные моменты, возникающие при колебаниях роторов генераторов, подсчитываются по известной формуле Жданова [2] (с учетом успокоительного момента и от обмотки возбуждения) в предположении, что генераторы „Г—1“ и „Г—2“ работают на приемные шины постоянного напряжения противоположного конца передачи.

При этом

$$D_{12} = D_1 \frac{T_{J2}}{T_{J1}} + D_2 \frac{T_{J1}}{T_{J2}},$$

где D_1 и D_2 — коэффициенты успокоения для случая работы генера-

^{*} Новое установившееся состояние наступит после сброса части активной мощности асинхронно работающим генератором и набором этой мощности на оставшуюся в синхронизме часть системы.

торов на приемные шины постоянного напряжения противоположного конца передачи.

$D_{э.к}$ — коэффициент успокоения эквивалентного генератора.

Успокоительный момент на валу эквивалентного генератора из-за асинхронного хода генератора „Г—3“ можно учесть обычным уравнением [3], однако ввиду того, что скольжение этого генератора изменяется, момент этот будет переменным и коэффициент стоящий перед производным угла в уравнении (3) будет меняться во времени. Однако изменение коэффициента не может быть значительным ($s \leq 0,2$) и поэтому величина этого момента принималась постоянной и равной его максимальному значению.

Основные особенности процесса будут определяться возмущениями, которые отражены в последних членах уравнения (3).

Принимая обычно принятые обозначения [4] и опуская постоянные члены не зависящие от времени, выражение (3) запишем:

$$\frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + 2k \frac{d \Delta \delta_{12}}{dt} + \omega^2 \Delta \delta_{12} = P \sin (\delta(t) + \lambda), \quad (4)$$

где

$$P = \sqrt{\left(\frac{E_1 E_3}{T_{J1} Z_{13}}\right)^2 + \left(\frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}}\right)^2 - 2 \left(\frac{E_1 E_3}{T_{J1} Z_{13}}\right) \left(\frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}}\right) \cos (\delta_{120} - \alpha_{23} + \alpha_{13})};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cdot \frac{1}{T_{J1} T_{J2}} \sqrt{T_{J1}^2 + T_{J2}^2 + 2 T_{J1} T_{J2} \cos [\delta_{120} - K]}}$$

$$K = \arctg \frac{T_{J1} - T_{J2}}{T_{J1} + T_{J2}} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{12}$$

$$\lambda = \arctg \frac{\frac{E_1 E_3}{T_{J1} Z_{13}} \sin \alpha_{13} - \frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}} \sin (\delta_{120} - \alpha_{23})}{\frac{E_1 E_3}{T_{J1} Z_{13}} \cos \alpha_{13} + \frac{E_2 E_3}{T_{J2} Z_{23}} \cos (\delta_{120} - \alpha_{23})};$$

$2k$ — коэффициент затухания;

ω — угловая частота свободных колебаний генераторов работающих синхронно.

При $T_{J2} = \infty$ из (5) легко получить угловую частоту свободных колебаний генератора при работе его на шины бесконечной мощности.

Полагаем, что скольжение ресинхронизируемого генератора изменяется по линейному закону (рис. 2)

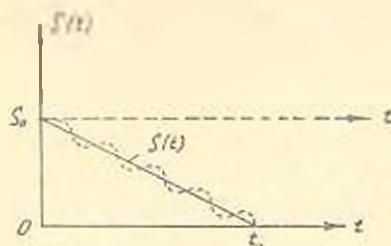


Рис. 2. Упрощенное представление движения ресинхронизируемого генератора.

$$s(t) = s_0 \left(1 - \frac{t}{t_0}\right). \quad (6)$$

Изменение взаимных углов этого генератора относительно синхронно работающих генераторов, в предположении, что угол между двумя синхронно работающими генераторами закреплён, определяется из уравнения:

$$\delta(t) = \int_0^t s(t) dt + \delta_0 = S_0 \left(t - \frac{t^2}{2t_0} \right) + \delta_0.$$

Уравнение определяющее характер колебаний угла $\Delta\delta_{12}$ запишется

$$\frac{d^2 \Delta\delta_{12}}{dt^2} + 2k \frac{d \Delta\delta_{12}}{dt} + \omega^2 \Delta\delta_{12} = P \sin \left[S_0 \left(t - \frac{t^2}{2t_0} \right) + \varepsilon \right]. \quad (7)$$

С целью получения более удобных выражений для интегрирования, уравнение (7) напишем в новых координатах (рис. 2):

$$\frac{d^2 \Delta\delta_{12}}{dt^2} + 2k \frac{d \Delta\delta_{12}}{dt} + \omega^2 \Delta\delta_{12} = P \cos \left[- \left(\frac{\alpha t^2}{2} + \varepsilon \right) \right], \quad (8)$$

где α — среднее значение углового ускорения.

Интегрирование дифференциального уравнения (8) ведется в комплексной области [5–12].

Рассматривая комплексную переменную $Z(t)$, уравнение (8) при начальных условиях $Z(t) = \dot{Z}(t) = 0$, при $t = -\infty^*$ сводится к виду

$$Z(t) = \frac{1}{n} \int_{-i}^0 P e^{-k(t-\tau)} e^{-i\left(\frac{\alpha \tau^2}{2} + \varepsilon\right)} \cos [n(t-\tau) + \varphi] d\tau, \quad (9)$$

где $n^2 = \omega^2 - k^2$ и $z(t) = Re(\Delta\delta_{12})$.

Если перейти к показательным функциям и ввести переменные

$$u = -\frac{i-1}{2\sqrt{\alpha}} (\alpha \tau - n + ik),$$

$$v = \frac{i-1}{2\sqrt{\alpha}} (\alpha \tau + n + ik),$$

которые при $\tau = t$ принимают значения u_1, v_1 и при $\tau = 0$ — u_0, v_0 из (9) получим значение

$$z(t) = \frac{P(1+i)}{2n\sqrt{\alpha}} \left[e^{-u_1^2 - i\varphi} \int_{u_0}^{u_1} e^{u^2} du - e^{-v_1^2 + i\varphi} \int_{v_0}^{v_1} e^{v^2} dv \right] e^{-i\left(\frac{\alpha t^2}{2} + \varepsilon\right)}. \quad (10)$$

Интегралы, входящие в уравнение (10) определяются через интегралы Френеля. Для вычисления этих интегралов воспользуемся табулированными функциями интеграла вероятности от комплексного аргумента [10].

$$w(z) = e^{-z^2} \left[1 + \frac{2i}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \right], \quad (11)$$

* При решении задач, где частота возмущения возрастает во времени, начальные условия следовало бы брать

$$Z(t) = \dot{Z}(t) = 0 \text{ при } t = 0$$

где $z = x + iy$.

При этом $w(z) = u(x, y) + i v(x, y)$.

Значения $u(x, y)$ и $v(x, y)$ для $y > 0$ приведены в этих таблицах.

Выражение (10) нетрудно привести к виду:

$$z(t) = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left\{ e^{i\frac{\pi}{2}} w(v_1) - e^{-i\frac{\pi}{2}} w(v_1) - \right. \\ \left. - e^{i\frac{\pi}{2} + \frac{\pi^2}{2} - u_1^2} w(v_0) + e^{-i\frac{\pi}{2} + \frac{\pi^2}{2} - u_1^2} w(u_0) \right\} e^{-i\left(\frac{\pi^2}{2} + u_1^2\right)}. \quad (12)$$

Последние два члена в выражении (12) представляют свободные колебания*, возникающие в результате переходного процесса. Для учета этих членов необходимо u_0 и v_0 соответственно заменить на u_∞ и v_∞ , т. е. на значения u и v при $t = -\infty$. После преобразования уравнение (12) приводится к виду:

$$z(t) = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left\{ e^{i\frac{\pi}{2}} w(v_1) - e^{-i\frac{\pi}{2}} w(u_1) - \right. \\ \left. - 2e^{i\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\pi^2}{2}} \right\} e^{-i\left(\frac{\pi^2}{2} + u_1^2\right)}. \quad (13)$$

Учитывая равенство

$$w(-z) = 2e^{-i\frac{\pi}{2}} - w(z), \quad (14)$$

получим:

$$z(t) = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \left\{ -e^{i\frac{\pi}{2}} w(-v_1) - e^{-i\frac{\pi}{2}} w(u_1) \right\} e^{-i\left(\frac{\pi^2}{2} + u_1^2\right)} = \\ = \frac{P(i-1)}{4n} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot T \cdot e^{-i\left(\frac{\pi^2}{2} + u_1^2\right)}, \quad (15)$$

Расчетная формула может быть представлена:

$$|Z(t)| = \frac{P\sqrt{\pi}}{2n\sqrt{2\alpha}} \Phi(t) e^{-i\left(\frac{\pi^2}{2} + u_1^2\right)}, \quad (16)$$

где

$$\Phi(t) = \sqrt{(ReT)^2 + (ImT)^2},$$

$$\varepsilon_0 = \arctg \frac{ImT}{ReT}.$$

В таблицах [10] значения $u(x, y)$ и $v(x, y)$ приведены для точек первого квадранта, лежащих в области

* В случае возрастания частоты возмущающей «силы» эти члены затухающие, и ими обычно пренебрегают.

$$0 \leq x \leq 5; 0 \leq y \leq 5.$$

Для определения значений функций в остальных точках плоскости $\omega(z)$ существует ряд простых формул [5].

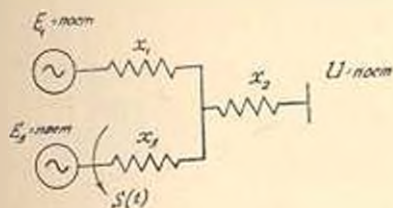


Рис. 3. Расчетная схема системы из трех станций, одна из которых представлена шиной бесконечной мощности. Параметры генераторов одинаковые: $x_d = 0,544$, $x_d' = 0,264$,

$$x_q = 0,420, x_q' = 0,204, x_q'' = 0,200.$$

$$T_d = 5,5 \text{ сек}, T_J = 15,5 \text{ сек}, x_1 = 0,71, x_2 = 0,11, x_3 = 1,07. \text{ Сопротивления отнесены к напряжению } 360 \text{ вольт.}$$

На рис. 4 приведены амплитудные кривые при прохождении через резонанс для электрической системы представленной на рис. 3, где генератор „Г-3“, находясь в асинхронном режиме, ресинхронизируется. Кривые получены по изложенной методике расчета. На этом же рисунке представлены опытные кривые, полученные из осциллограмм для исследуемой схемы.

На рис. 5 представлена осциллограмма прохождения через резонанс для данной схемы. Включение регулятора возбуждения сильного действия на генератор „Г-1“ значительно уменьшает амплитуду колебаний взаимного угла.

ного действия на генератор „Г-1“ значительно уменьшает амплитуду колебаний взаимного угла.

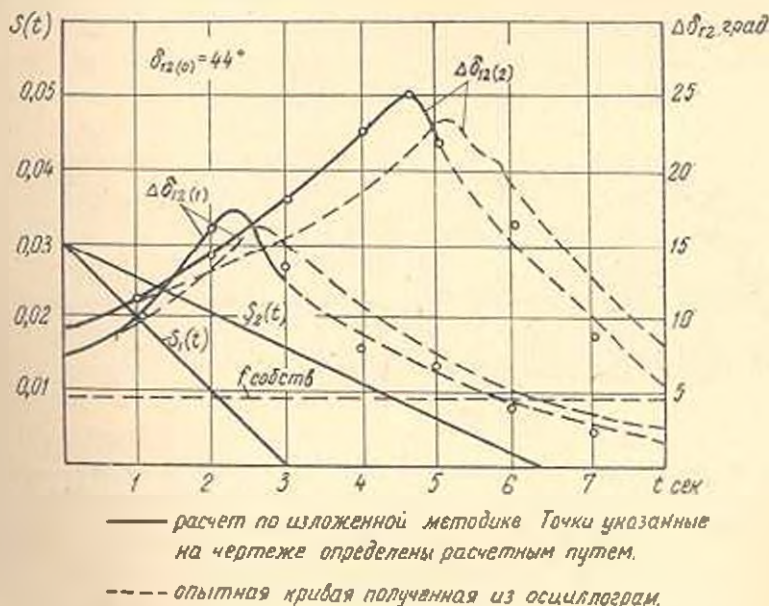


Рис. 4. Амплитудные кривые взаимного угла при прохождении через резонанс.

Из кривых рис. 4 видно, что максимум амплитуды имеет место не в момент совпадения частоты возмущающей „силы“ (скольжения) с собственной частотой системы станций находящихся в синхронизме.

а позже. При этом смещение тем больше, чем быстрее изменяется частота возмущающей „силы“. При больших амплитудах колебания взаимного угла, что может иметь место при прохождении через резонанс применение линеаризованных уравнений неправомерно³.

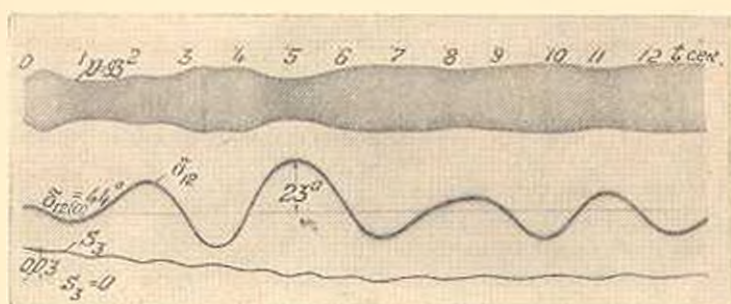


Рис. 5. Осциллограмма прохождения через резонанс, при асинхронном ходе генератора „Г—3“ схемы показанной на рис. 3.

При более полном рассмотрении данной задачи необходимо пользоваться уравнениями Горевы Парка. Однако и при этом аналитические решения практически невозможны. Естественным здесь является использование решающих устройств и, в частности, математических машин непрерывного действия. На рис. 5 представлена осциллограмма перехода через резонанс при втягивании в синхронизм асинхронно работающего генератора. Осциллограммы получены на математической модели типа МН—7. Мощность ресинхронизируемого ге-

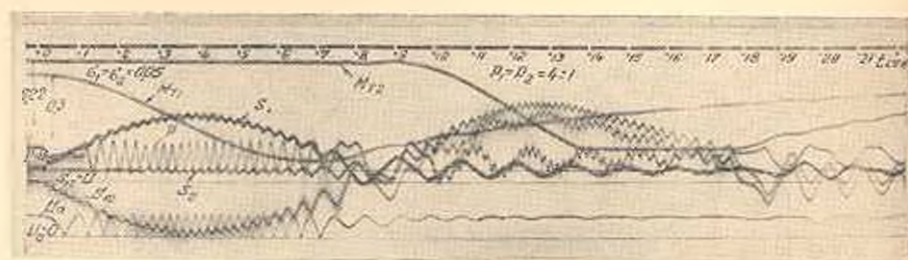


Рис. 6. Осциллограмма прохождения через резонанс для схемы: два генератора, работающие из линии бесконечной мощности через общий участок, полученная на математической модели. Соотношение мощностей генераторов $P_1 : P_2 = 4 : 1$. Параметры схемы $x_1 = 0,4$, $x_2 = 1,5$, $x_3 = 0,7$, $T_{11} = 16$ сек., $T_{12} = 4$ сек. Генераторы представлены переходными сопротивлениями.

нератора в четыре раза больше мощности генератора, находящегося в синхронизме. После перехода через резонанс генератор малой мощности теряет устойчивость. При обратном переходе через резонанс, при ресинхронизации генератора малой мощности, выпадение из синхронизма мощного генератора не последовало.

* Пределы применимости линеаризованных уравнений определены в [14].

З а к л ю ч е н и е

Оценку результирующей устойчивости дальней электропередачи следует производить с учетом возможных нестационарных колебаний взаимных углов, при ресинхронизации отдельных генераторов и станций.

По методике изложенной в статье вынужденные колебания синхронно работающих генераторов, из-за периодического изменения взаимной синхронной мощности обусловленной асинхронно работающим генератором, могут вызывать переход роторов отдельных генераторов через состояние резонанса. Возможность ресинхронизации определяется соотношением мощностей станций.

Московский энергетический институт

Поступило 4.V 1961

ՅՈՒ. Մ. ՇԱՀԱԶԱՐՅԱՆ

ՐԱՐԴ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ԴՈՒՄԱՐԱՅԻՆ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ
ՍՏՈՒԳՄԱՆ ԱՌԱՆՁԱԼԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. լ. մ

Հոգիաժուժ բերվում է բարդ էլեկտրական սխեմաներում աշխատող կալանի ասինխրոն քալի ազդեցութիւնը սխեմայի մնացած սինխրոն աշխատող մասի վրա: Ճուշը է արված. որ ասինխրոն աշխատող գեներատորի ռեախինխրոնիզացիայի դեպքում այդ ազդեցութիւնն առաջացնում է սինխրոնիզմում դտնվող մնացած գեներատորների ռոտորների փոխադարձ տատանումներ: Այս դեպքում ասինխրոն աշխատող գեներատորների սահման փոփոխման պրոցեսում, սինխրոն աշխատող գեներատորների ռոտորների վրա դործող ստիպող ուժի հաճախականութիւնները կարող են հասնել իսկ այնուհետեւ գերազանցել իրենց սեփական հաճախականութիւնները:

Դիտվում է առանձին գեներատորների ռոտորների ռեգոնանսի դրութիւնով անցման երևույթը:

Այս տատանումները որոշ դեպքում հասնում են վտանգալոր ամպլիտուդայի, և տեղի է ունենում էլեկտրական սխեմայի սինխրոն աշխատող մասի կայունութեան խախտում:

Աշխատանքում հաշտարեւրված է էլեկտրական սխեմայի կայունութեան պայմանը սխեմայի մյուս էլեկտրականորեն միացած մասի ոչ ստացվողնար ասինխրոն ռեմիմի դեպքում:

Նաշված է սխեմատիկ սխեմայ լադկացած 3 կայաններից, որից մեկը դտնվում է ասինխրոն քալում և ռեախինխրոնիզացվում է: Այս դեպքում ենթադրվում է, որ մյուս 2 կայանները ունեն նույն պարամետրերը:

Աշխատանքում տրվում է կայանութեան հաշվման մեթոդիկան տվյալ խնդրի համար: Յուշը է տրված, որ առաանվող սխեմայի ստացվիլի դիֆերենցիալ հալասարումը, երբ թուլտորվում է, որ գրգոման ուժի հաճախականութիւնը փոխվի գծային օրենքով հաստատուն ամպլիտուդայով, բերում է քրեննիլի ինտեգրալներին:

Սրանց որոշումը բերում է հալանականություն ինտեգրալի աղյուսակացված (տարուլայված) ֆունկցիալի կոմպլեքս արգումենտին (10):

Շարադրված մեթոդով ստացված և ֆիզիկական մոդելի վրա կատարված փորձերի արդյունքները սալիս են լավ համընկում:

Աշխատանքը հնարավորություն է տալիս զննատել հեռավոր էլեկտրահաղորդման գումարալին կալունությունը, հարվի առնելով առանձին դեներատորների և կալանների ռետինխրոնիզացիալի զեպրում փոխադարձ անկյունների հնարավոր, ոչ ստացիոնար առատանությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Релей. Теория звука. Том 1, ГИТТЛ, М.—Л., 1955.
2. Жданов П. С. Устойчивость электрических систем, Госэнергоиздат, М.—Л., 1948.
3. Виликов В. А. Электромеханические переходные процессы в электрических системах, Госэнергоиздат, М.—Л., 1958.
4. Бабаков Н. М. Теория колебаний ГИТТЛ, М.—Л., 1958.
5. Дабазин А. В. Труды ВНИИ—электромеханики, том 1, вып. 2 М., 1960.
6. Казолский Е. Я. Переходные процессы при включении напряжения с изменяющейся частотой. Журн. „Электричество“, № 11, 1949.
7. Кац А. М. Вынужденные колебания при прохождении через резонанс. „Инженерный сборник института механики“, Изд. АН СССР, т. III, вып. 2, 1947.
8. Мамиконянц Л. Г. Гоки и моменты асинхронных машин при изменении скорости их вращения. Журн. „Электричество“, № 8, 1958.
9. Голоскоков Е. Г. и Филиппов А. П., К вопросу о переходе через резонанс упругих систем. Тр. ХПИ. Серия инженерно-физическая, Т. XIV, вып. 2, Харьков, 1958.
10. Фадеева В. И. и Терентьев Н. М. Таблицы значений интеграла вероятности от комплексного аргумента. ГИТТЛ, М., 1954.
11. Lewis F. M. Vibration During Acceleration through a critical speed Transactions of the A. S. M. E. vol. 54, No 23 (p. 2531), 1932.
12. Weldenhammer F. Das anlaufen eines ungedämpften schwingers mit massenkräfterregung. ZAMM. Akademie-verlagsgmbh. Berlin, 1958. band 38 s. 253—336.
13. Савалов С. А. и Соколов Н. Н. Влияние нарушения режима приемной энергосистемы на устойчивость дальних электропередач. Тр. ВНИИЭ IX, Госэнергоиздат, М.—Л., 1959.
14. Урусов Н. Д. Липейная теория колебаний синхронной машины. Изд. АН СССР, М.—Л., 1960.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В. С. ХАЧАТРЯН

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ
 ЭНЕРГОСИСТЕМЫ*

1. Методика расчета потерь и производных от потерь

Расчеты потерь мощности в высоковольтных сетях энергосистем и связанные с ними задачи по определению сетевых коэффициентов приобретают большое практическое значение для построения наилучших режимов современных сложных энергосистем. Сетевые коэффициенты входят в общезвестные выражения относительного прироста суммарных потерь активной мощности, имеющие следующий вид:

$$\frac{\partial \pi}{\partial P_m} = 2 \sum_{n=1}^{\Gamma} B_{mn} P_n, \quad (1)$$

где π — сумма потерь активной мощности в сетях энергосистемы;

P_m — активная мощность m -ой станции энергосистемы;

B_{mn} — сетевые коэффициенты, определяемые видом электрической связи между m -ой и n -ой станциями энергосистемы.

Выражение (1) получается дифференцированием «формулы потерь» (2), выведенной в приложении:

$$\pi = \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m B_{mn} P_n, \quad (2)$$

где m, n — индексы станций системы.

Здесь двойное суммирование по m и n распространяется на все генерирующие станции. Коэффициент B_{mn} , используемый в этой формуле, называется также коэффициентом формулы потерь. Количество сетевых коэффициентов, входящих в формулу (2), равно

$$\mu = \frac{\Gamma(\Gamma+1)}{2}, \quad (3)$$

где Γ — число генерирующих станций энергосистемы.

Целью настоящей статьи является разработка методики определения потерь в сетях энергосистемы и сетевых коэффициентов B_{mn}

* Работа проводилась в Институте энергетики АН Армянской ССР под руководством проф. Г. Т. Адосяна.

для заданной конфигурации энергосистемы, предусматривающей использование для этой цели модели сетей переменного тока.

II. Методика расчета сетевых коэффициентов

Ниже указана последовательность вычисления сетевых коэффициентов.

Собственные и взаимные сопротивления. В формулу сетевых коэффициентов входят собственные и взаимные активные сопротивления, которые являются постоянными параметрами пассивного многополюсника (рис. 1). До определения собственных и взаимных сопротивлений необходимо разомкнуть все генераторы, нагрузки, синхронные компенсаторы и емкости линии и затем выбрать базисный узел, в качестве которого можно принять шину одной из мощных электростанций. Для большей точности рекомендуется вычислить собственные и взаимные сопротивления аналитическим путем. После этого составляются матрицы сопротивлений отдельно для генераторных узлов (R_{m-n}) и

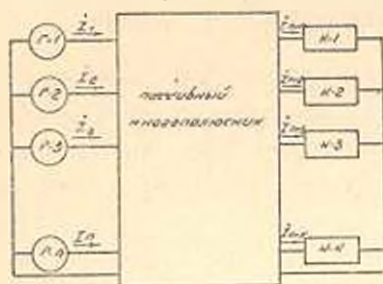


Рис. 1. Изображение энергосистемы в виде многополюсника.

отдельно для узлов между генераторами и нагрузками (R_{m-k}).

Определение R_m

Величина R_m определяется по формуле

$$R_m = \frac{\sum_{k=1}^n P_k R_{m-k}}{\sum_{k=1}^n P_k} \quad (4)$$

где P_k — мощности нагрузок в Mвт ;

R_{m-k} — активные взаимные сопротивления между узлами генераторов (индекс m) и нагрузок (индекс k).

Здесь приняты следующие индексы:

$m = 1, 2, 3 \dots \Gamma$ — индекс генераторного узла схемы;

Γ — число генераторных станций;

$k = 1, 2, 3 \dots H$ — индекс нагрузочного узла схемы;

H — число нагрузок.

Коэффициент K_{mn}

Коэффициент K_{mn} вычисляется по формуле

$$K_{mn} = [(1 + \operatorname{tg} \varphi_m \cdot \operatorname{tg} \varphi_n) \cos \theta_{mn} + (\operatorname{tg} \varphi_m - \operatorname{tg} \varphi_n) \sin \theta_{mn}] \cdot \frac{1}{U_n U_m} \quad (5)$$

где U_m, U_n — напряжения на генераторных шинах m и n ;
 $\Theta_{mn} = \psi_{um} - \psi_{un}$ — фазовый сдвиг между напряжениями шин m и n ;
 $tg\varphi_m = Q_m/P_m$ — отношения реактивных и активных мощностей генерирующих станций.

K_{mn} , а следовательно и сетевой коэффициент B_{mn} очень чувствительны в отношении величины $tg\varphi_m$.

Коэффициент A_{mn}

Величина A_{mn} , входящая в формулу сетевых коэффициентов, определяется по выражению

$$A_{mn} = (R_{m-n} - R_m - R_n) K_{mn}, \quad (6)$$

где R_{m-n} — активные собственные и взаимные сопротивления между генераторными узлами.

Коэффициент R

Величина R определяется посредством эквивалентирования потерь, определяемых по формуле (2) и посредством суммирования потерь $I_i^2 R_i$ отдельных линий электропередач. Ток I_i , протекающий по отдельным линиям, измеряется при установлении соответствующего режима на модели сетей переменного тока.

Условие эквивалентирования потерь можно выразить с помощью уравнения

$$\sum_{i=1}^b I_i^2 R_i = \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m B_{mn} P_n, \quad (7)$$

где b — число ветвей энергосистемы.

Преобразование уравнения (7) дает:

$$\sum_{i=1}^b I_i^2 R_i = \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m A_{mn} P_n + R \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m K_{mn} P_n, \quad (8)$$

откуда

$$R = \frac{\sum_{i=1}^b I_i^2 R_i - \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m A_{mn} P_n}{\sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m K_{mn} P_n}. \quad (9)$$

Определение сетевых коэффициентов

Сетевой коэффициент или коэффициент формулы потерь в общем виде определяется следующим образом:

$$B_{mn} = \frac{R_{mn}}{U_m U_n} [(1 + tg\varphi_m \cdot tg\varphi_n) \cos \Theta_{mn} + (tg\varphi_m - tg\varphi_n) \sin \Theta_{mn}], \quad (10)$$

где $R_{mn} = (R_m + R_n - R_m - R_n + R)$. (11)

Из выражения (10) видно, что сетевой коэффициент является функцией четырех переменных величин, определенных на модели сетей переменного тока:

$$B_{mn} = B_{mn}(P, Q, U, \varphi_n). \quad (12)$$

В зарубежной литературе сетевые коэффициенты B_{mn} принимаются строго постоянными при любых режимах работы данной энергосистемы. Это облегчает исследование энергосистемы за счет точности расчета. Как показано в (12), эти коэффициенты являются функциями P, Q, U и φ_n . Аргументы P, Q, U, φ_n изменяются при изменении режима работы энергосистемы. Следовательно, должны измениться и сетевые коэффициенты.

III. Пример расчета сетевых коэффициентов

Описания методика расчета иллюстрирована на примере одной энергосистемы, схема замещения которой показана на рис. 3. Она состоит из 6 генераторных и 9 нагрузочных узлов. Схема замещения приведена к базисному напряжению 230 кВ; построение ее осуществлено общеизвестным приемом и не требует дополнительных пояснений. Здесь преследуется цель сравнить сетевые коэффициенты при различных режимах и выявить пределы изменения этих коэффициентов.

В данном случае, для рассматриваемой энергосистемы, устанавливается три режима и измеренные результаты вносятся в таблицу 1. Для каждого режима приведены также полные потери, определенные посредством суммирования потерь отдельных ЛЭП

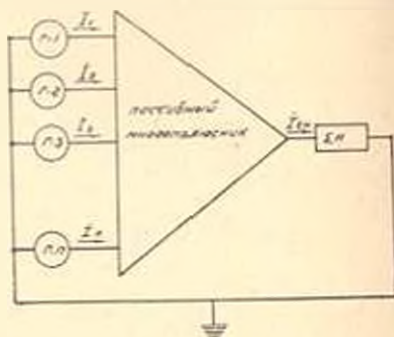


Рис. 2. Изображение энергосистемы с одной суммарной нагрузкой.

$$\left(\sum_{i=1}^n R_i^2 R_i \right).$$

В таблице 1 активная мощность (P) в мвт, реактивная — (Q) в мвар, напряжения шин (U) в кВ, угол напряжения (φ_n) в°. Теперь рассмотрим детальное решение первого режима (табл. 1).

Собственные и взаимные сопротивления. Для схемы замещения энергосистемы, показанной на рис. 3, могут быть определены согласно методу узловых напряжений следующие числовые значения элементов матрицы активных сопротивлений (выбранный базисный узел показан на рис. 3).

Таблица 1

Режимы данной энергосистемы

№ реж.	Режим I				Режим II				Режим III			
	P	Q	U	δ	P	Q	U	δ	P	Q	U	δ
Г-1	54,4	37,5	250,0	81,5	54,7	38,5	250,0	82,0	57,6	32,0	219,0	13,9
Г-2	184,5	131,5	250,0	81,1	192,0	152,0	250,7	81,7	182,5	123,7	248,7	10,0
Г-3	21,9	21,2	247,9	80,7	23,0	25,0	250,5	81,5	17,7	9,5	235,5	11,0
Г-4	26,2	42,5	248,6	82,6	23,0	37,5	247,5	83,1	28,5	35,7	248,2	12,0
Г-5	19,8	-26,3	247,6	86,0	22,7	-21,2	246,0	86,1	24,4	8,5	250,7	14,1
Г-8	105,8	-12,5	247,6	95,0	106,5	-12,5	248,0	95,6	77,9	-25,9	246,7	21,0
$\sum R_i$	18,0272				21,0570				17,2380			

ПА-183

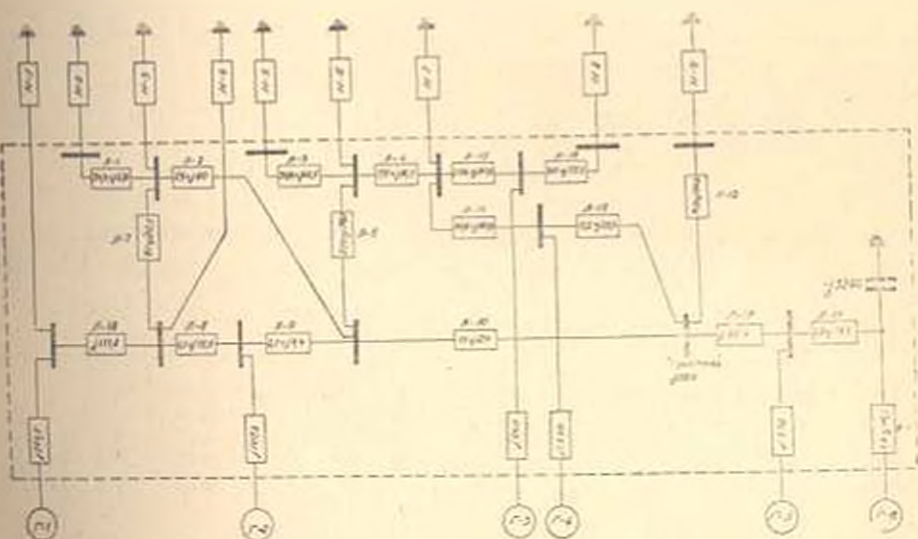


Рис. 3. Схема замещения данной энергосистемы.

Матрица R_{ii} — собственных и взаимных активных сопротивлений генераторных узлов схемы замещения

Узлы	1	2	3	4	5	6
1	18,1324	13,1194	6,9689	1,6375	0	0
2	13,1194	13,3442	6,9689	1,6375	0	0
3	6,9689	6,9689	55,3881	6,1639	0	0
4	1,6375	1,6375	6,1639	11,5050	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	5,6000



Матрица R_m — k взаимных активных сопротивлений генераторных (индекс m) и нагрузочных (индекс k) узлов схемы замещения

Узлы	1	2	3	4	5	6
1	18,1324	13,1191	6,9689	1,6375	0	0
2	16,5136	12,7069	6,9689	1,6375	0	0
3	16,5136	12,7069	6,9689	1,6375	0	0
4	18,1324	13,1194	6,9,89	1,6375	0	0
5	7,9616	7,9616	21,5840	5,1568	0	0
6	7,9616	7,9616	21,5840	5,1568	0	0
7	6,9689	6,9689	25,7880	6,1639	0	0
8	6,9689	6,9689	55,3881	6,1639	0	0
9	0	0	0	0	0	0

Числовые значения R_m

Полученные числовые значения представляются в виде следующей строчной матрицы.

1	2	3	4	5	6
13,2480	10,4373	13,2313	2,9690	0	0

Числовые значения K_{mn}

Соответствующая матрица K_{mn} имеет следующий вид:

	1	2	3	4	5	6
1	0,2361	0,2404	0,2681	0,3419	-0,0116	0,1135
2		0,2450	0,2747	0,3529	-0,0228	0,1101
3			0,3148	0,4203	-0,0807	0,0954
4				0,5830	-0,2119	0,0686
5					0,4492	0,2169
6						6,1653

Эта матрица симметричная.

Числовые значения A_{mn}

Матрица A_{mn} тоже симметрична и имеет следующий вид:

	1	2	3	4	5	6
1	-1,9746	-2,5401	-5,2315	-4,9847	0,1537	-1,5036
2		-1,8449	-4,5882	-4,1532	0,2380	-1,1491
3			9,1038	-4,2196	1,0680	-1,2625
4				3,2453	0,6291	-0,2037
5					0	0
6						0,9257

Коэффициент R

Вычислены следующие величины:

$$\sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 P_m K_{mn} P_n = 3,1035,$$

$$\sum_{i=1}^{18} I_i^2 R_i = 18,0272,$$

$$\sum_{m=1}^6 \sum_{n=1}^6 P_m A_{mn} P_n = -27,6979,$$

следовательно $R = 14,7333$

Числовые значения сетевых коэффициентов

	1	2	3	4	5	6
1	1,5039	1,0018	-1,2815	0,0526	-0,0172	0,1686
2		1,7648	-0,5410	1,0462	-0,0979	0,4730
3			13,7418	1,9728	-0,1210	0,1431
4				11,8348	-2,4929	0,8070
5					6,6182	3,1956
6						3,3611

Эта матрица тоже симметричная.

Аналогично определяем сетевые коэффициенты для остальных режимов и полученные результаты приводим в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты B_{mn} $\left| \frac{10^4}{\text{мвт}} \right|$ для отдельных режимов

$m-n$	Режим I	Режим II	Режим III
1-1	1,5039	1,5966	1,2812
2-2	1,7648	1,9517	1,6066
3-3	13,7418	15,2920	12,7958
1-2	1,0018	1,1113	0,8424
1-3	-1,2815	-1,2334	0,1903
1-6	0,1686	0,2072	0,1270
2-3	-0,5410	-0,4667	0,8471
2-4	1,0462	1,2393	0,6101
3-4	1,9728	2,2936	2,8095
3-5	-0,1210	-0,0098	1,4169
4-6	0,8070	0,8151	1,4567
5-6	3,1956	2,7340	2,2232

IV. Пример расчета потерь и производных от потерь

Для данной энергосистемы определяются потери трех режимов и полученные результаты приводятся в таблице 3.

Таблица 3

Результаты вычисления потерь

Режим	Потери, вычисленные по формуле (2) в мвт	Действительные потери в мвт
I	18,0316	18,0272
II	20,2862	21,0570
III	17,2441	17,2360

По данным табл. 3 не трудно заметить, что ощутимой разницы между потерями, вычисленными по формуле и действительными потерями, не существует. После вычисления производных от потерь результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Значения производных от потерь

Произв. от потерь	Режим I	Режим II	Режим III
$\partial \pi / \partial P_1$	0,0515	0,0600	0,0478
$\partial \pi / \partial P_2$	0,0888	0,1016	0,0877
$\partial \pi / \partial P_3$	0,0392	0,0530	0,1137
$\partial \pi / \partial P_4$	0,1172	0,1190	0,0930
$\partial \pi / \partial P_5$	0,0765	0,0788	0,1003
$\partial \pi / \partial P_6$	0,1080	0,1108	0,1125

V. Анализ вопроса о выборе расчетных значений сетевых коэффициентов

Анализ данных табл. 2 показывает, что сетевые коэффициенты B_{mn} ($B_{11}, \dots, B_{66}$) имеют строго положительные знаки при любом режиме, в то время как B_{mn} ($B_{12}, \dots, B_{56}$) могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. Расчеты показывают, что сетевые коэффициенты весьма чувствительны к коэффициенту $tg \varphi_m$ и в зависимости от его значения ($-1 < tg \varphi_m < 1$) они резко изменяются. Следовательно, важным этапом при вычислении сетевых коэффициентов является правильный выбор отношения $tg \varphi_m = Q_m / P_m$. Величина напряжения U_m влияет на сетевые коэффициенты в меньшей степени чем начальная фаза ϕ_{um} .

Из табл. 2 не трудно заметить, что на величину потерь в основном будут влиять собственные сетевые коэффициенты B_{mm} , так как они во много раз превышают взаимные сетевые коэффициенты B_{mn} . Из приведенной таблицы видно также, что разница между коэффициентами при различных режимах не очень велика, особенно для коэффициентов B_{mm} . Однако принять их величиной постоянной для данной энергосистемы можно лишь после вычисления потерь и сравнения результатов. Для иллюстрации, примем сетевые коэффициенты

Таблица 5

Сравнение результатов потерь

Режимы	Потери, вычисленные по формуле при $V_{\text{пл}}$ — пост. для I режима (в мвт)	Действительные потери в мвт
I	18,0316	18,0272
II	18,6974	21,0570
III	15,6592	17,2380

первого режима за постоянные величины и вычислим потери для остальных режимов, исходя только из генерирующих мощностей.

Полученные данные приведены в таблице 5.

Из табл. 5 не трудно заметить, что при этом получаются значительные расхождения между действительными потерями и потерями, вычисленными с помощью сетевых коэффициентов первого режима. Следовательно, подобный подход к выбору сетевых коэффициентов, когда они были приняты постоянными, не дает верных результатов и требует дополнительных корректировок и уточнений.

Ниже приводятся результаты расчета потерь (табл. 6) с помощью усредненных значений сетевых коэффициентов, полученных из сетевых коэффициентов рассмотренных режимов.

Таблица 6

Сравнение результатов потерь

Режимы	Потери, вычисленные с помощью $V_{\text{ср}}$ в мвт	Действительные потери в мвт
I	19,7081	18,0272
II	20,5900	21,0570
III	17,2512	17,2380

Таблица 6 показывает, что при этом точность повышается. Все же следует принять, что точность недостаточно высокая, хотя для практических целей, при решении инженерных задач, с успехом можно пользоваться этим методом. Затем пользуемся сетевыми коэффициентами, вычисленными после усреднения коэффициентов $k_{\text{ср}}$ рассматриваемых режимов. При этом снова режим I выбирается в качестве расчетного.

Сопоставление вычисленных и действительных потерь приведено в таблице 7.

Таблица 7

Режим	Потери, вычисленные с помощью $B_{\text{вс}}$ в мвт	Действительные потери в мвт
I	18,9222	18,0272
II	19,7201	21,0570
III	15,2727	17,2380

Как видно из данных табл. 7, при таком подходе к вопросу также обеспечивается практически большая точность.

При анализе результатов приведенных в таблицах 6 и 7 можно прийти к следующему заключению.

Для данной энергосистемы можно получить расчетные значения сетевых коэффициентов посредством:

1) усреднения значения сетевых коэффициентов нескольких характерных режимов и

2) усреднения коэффициентов $i_{\text{сн}}$ нескольких характерных режимов.

Здесь необходимо отметить, что для точности расчета важен правильный выбор характерных режимов энергосистемы. Однако первый способ определения расчетных значений сетевых коэффициентов связан с большими вычислительными работами. Поэтому рекомендуется, в основном, пользоваться вторым методом. Но, строго говоря, сетевые коэффициенты не постоянны, они изменяются с изменением параметров данной энергосистемы.

В заключение следует отметить, что данный расчет весьма трудоемок и связан с большим количеством вычислений. В связи с этим целесообразно расчет сетевых коэффициентов производить на электронной цифровой вычислительной машине.

П р и л о ж е н и е

Вывод формулы потерь. Для многополюсника по рис. 1 можно составить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \sum_{m=1}^{\Gamma} I_m Z_{nm} - \sum_{k=1}^H I_{(\Gamma-k)} Z_{n(\Gamma+k)} \\ \dot{U}_{\Gamma+j} &= \sum_{m=1}^{\Gamma} I_m Z_{(\Gamma+j)m} - \sum_{k=1}^H I_{(\Gamma+k)} Z_{(\Gamma+j)(\Gamma+k)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $m, n = 1, 2, 3 \dots \Gamma$ — индексы генераторных узлов;

$j, k = 1, 2, 3 \dots H$ — индексы нагрузочных узлов.

Если принять, что каждый ток нагрузки $I_{(\Gamma+k)}$ является фиксированной долей общего тока нагрузки $I_{\text{сн}}$ ($I_{(\Gamma-k)} = I_{(\Gamma+k)} \cdot I_{\text{сн}}$, где

$I_{\Gamma+k}$ комплексный коэффициент пропорциональности и сумма всех токов входящих в энергосистему и выходящих из нее равна нулю, то система уравнений (1) примет следующий вид (рис. 2)

$$\left. \begin{aligned} U_n &= \sum_{m=1}^{\Gamma} I_m Z_{nm} - I_{\Gamma H} Z_{\Gamma H} , \\ U_{\Gamma H} &= \sum_{m=1}^{\Gamma} I_m Z_{m\Gamma} - I_{\Gamma H} Z_{HH} , \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

здесь

$$Z_{\Gamma H} = \sum_{k=1}^H I_{(\Gamma+k)} Z_{n(\Gamma+k)} \quad (3)$$

$$Z_{H\Gamma} = \sum_{k=1}^H I_{(\Gamma+k)} Z_{m(\Gamma+k)} \quad (4)$$

$$Z_{HH} = \sum_{k=1}^H \sum_{j=1}^H I_{(\Gamma+k)} Z_{(\Gamma+k)(\Gamma+j)} I_{(\Gamma+j)} \quad (5)$$

Потери активной мощности

$$\pi = \operatorname{Re} [(U_n - U_{\Gamma H}) I_n] \quad (6)$$

$$\text{Учитывая, что } I_n = \frac{P_n - jQ_n}{U_n}; \quad I_m = \frac{P_m + jQ_m}{U_m} \quad (7)$$

произведя соответствующие преобразования и некоторые упрощения, получим следующие выражения для потери активной мощности

$$\pi = \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m B_{mn} P_n \quad (8)$$

где

$$B_{mn} = \frac{R_{m-n} - R_m - R_n + R}{U_m U_n} \left[(1 + \operatorname{tg} \varphi_m \operatorname{tg} \varphi_n) \cos \theta_{mn} + \right. \\ \left. + (\operatorname{tg} \varphi_m - \operatorname{tg} \varphi_n) \sin \theta_{mn} \right] \quad (9)$$

В выражение B_{mn}

$$R_{m-n} = \operatorname{Re} (Z_{m-n}), \quad (10)$$

$$R_m = \operatorname{Re} (Z_{\Gamma H}), \quad (11)$$

$$R_n = \operatorname{Re} (Z_{H\Gamma}), \quad (12)$$

$$R = \operatorname{Re} (Z_{HH}). \quad (13)$$

Վ. Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԷՆԵՐԳՈՍԻՍՏԵՄԻ ՑԱՆՅՈՒՄ ԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՄՏԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Ս. մ Վ ի ո Վ ի ո լ մ

Հոգվածում տրվում է էներգոսխտեմի ցանցում ստաջացող հզորության կորուստի հաշվման մեթոդ: Դանի որ հզորության կորուստի որոշման համար անհրաժեշտ է իմանալ ալյակիս կոչված ցանցային զործակիցների (B_{mn}) արժեքները, ապա տրված է նաև նրանց որոշման մեթոդը: Ցանցային զործակիցների քանակը կախված է միայն էներգոսխտեմում գործող էլեկտրական կալանների քանակից (3): Ցանցային զործակիցներն օգտագործվում են նաև կորուստների աճերի որոշման համար: որոնք անհրաժեշտ են էներգոսխտեմների էկոնոմիկական աշխատանքային սեփմիսի ստանալու ժամանակ: Հոգվածում արտածված մեթոդը կիրառված է կոնկրետ էներգոսխտեմի համար, որը կազմված է վից էլեկտրակալաններից և ինն ենթակալաններից: Տվյալ օրինակում դիտված են մի քանի սկզբունքներ ցանցային զործակիցների որոշման համար և ստացված արդյունքները տրված են համապատասխան աղյուսակների միջոցով: Պարզվում է, որ տվյալ էներգոսխտեմի համար, հաշվային ցանցային զործակիցներ կարելի է ստանալ մի քանի (4—5) բնութագրիչ սեփմիսների ցանցային զործակիցների կամ էլքստ զործակիցների միջին արժեքով: Վերջին եղանակացությունը կիրառելի է ցանկացած բարդության էներգոսխտեմի համար:

Դանի որ ցանցային զործակիցների կորուստների և կորուստների աճի որոշումը պահանջում է մեծ հաշվային աշխատանք և ժամանակ, ապա առաջարկվում է տվյալ հաշվումների կատարման ժամանակ օգտվել ժամանակակից դիսկրետ գործող հաշվիչ մեքենաներից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. Госэнергоиздат. 1957.
2. Мельников Н. А. Учет потерь в сети при определении наимыгоднейшего режима энергосистемы. "Электричество", № 2, 1960.
3. George E. E. Intrasystem Transmission Losses. "AIEE Transactions", vol. 61, 1943, p. 153—58.
4. Kron G. G. Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems, Part 1. The Six Basic Reference. "AIEE Transactions", vol. 70, 1951, p. 1239—48.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В. Г. БЕГЛЯРОВ

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

§ 1. Уравнения режимов для переменных уровней воды
в водохранилищах ГЭС

Широко известные в настоящее время уравнения относительных приростов с постоянными коэффициентами λ для гидростанций являются исходной базой для построения экономичных режимов энергосистем при постоянных уровнях воды в водохранилищах. Если уровни воды в водохранилищах ГЭС при ведении режимов меняются, то эти уравнения, как известно, не дают оптимального решения задачи*. Имеются попытки решения указанной задачи в рамках уравнений относительных приростов, но в предположении переменности коэффициентов λ во времени. Однако полученные функции не являются непосредственными решениями этих уравнений, а потому проблема построения экономичных режимов этим приемом не снимается, так как с равным успехом за критерии экономичности можно принять любые уравнения, связывающие необходимые нам параметры в любой зависимости с оговоркой, что они справедливы при правильном выборе некоторых, входящих в них, функций времени. Следовательно, нам нужно найти такие уравнения, решениями которых были бы эти искомые функции.

Первая попытка строгого математического решения этой общей задачи принадлежит И. М. Марковичу [2, 3]**. Уравнения И. М. Марковича совпадают с аналогичными уравнениями метода удельных экономий, предложенных несколько раньше Б. И. Никитиным [6], но полученными им менее строгим путем. И. М. Маркович ищет условие минимума затрат топлива, которые он представляет в виде алгебраических функций переменных мощностей ГЭС и отдельные дискретные промежутки времени всего рассматриваемого периода регулирования и расходов воды на ГЭС за эти промежутки. При этом мощности ГЭС в каждый промежуток времени зависят от расходов воды ГЭС за этот и все предыдущие промежутки времени.

* Сказанное может быть легко проверено на практических примерах.

** Здесь имеется в виду решение задачи в детерминистической постановке, когда считаются заранее известными график приточности воды в водохранилища ГЭС, и график нагрузки энергосистемы на рассматриваемый период времени.

Эти расходы влияют на сработку водохранилища и на напор. Указанная зависимость для каждой ГЭС не является раз и навсегда заданной, а меняется с изменением графика приточности в водохранилище. Поэтому, чтобы найти решение задачи, используя эти уравнения, нужно каждый раз предварительно найти указанные зависимости.

Решение задачи по указанным уравнениям нам представляется неосуществимым из-за невозможности построения алгоритма обеспечивающего получение решения за достаточно короткое время. В частности, одним из препятствий следует считать необходимость построения зависимостей мощностей ГЭС в каждый промежуток времени от расходов воды на ГЭС за данный и все предыдущие промежутки времени. Заметим, что, если для решения этой задачи воспользоваться методом простого перебора, то при использовании современных даже весьма быстродействующих вычислительных машин (например с быстродействием в 10^6 операций в секунду) потребуется много времени. Так как указанная задача, строго говоря, вариационная, то одним из таких алгоритмов, если он найден, может служить алгоритм для решения дифференциальных уравнений Эйлера, являющихся условием минимума функционала затрат топлива в энергосистеме за рассматриваемый период времени при известных ограничениях налагаемых на решение.

Найдем дифференциальные уравнения, являющиеся условием минимума затрат топлива в системе с переменными уровнями воды в водохранилищах ГЭС. Решению этой задачи для системы ТЭС и независимых ГЭС была посвящена американская работа [1]. Здесь предлагается решение этой задачи с необходимыми уточнениями и рассматриваются уравнения оптимального режима для энергосистем с каскадными ГЭС.

Известно, что отметка верхнего бьефа ГЭС есть функция текущего объема воды $Z_n(v)$ в водохранилище. Если объем воды в водохранилище до начала регулирования обозначить через V_n , и если отметку нижнего бьефа считать только статической функцией расхода воды $Z_n(Q)$ через турбины, т. е. не учитывать переходных процессов в нижних бьефах, то выражение для напора ГЭС будет иметь вид:

$$H = Z_n(V_n - \int_0^t [q(t) - Q(t)] dt) - Z_n(Q), \quad (1)$$

где $q(t)$ — приточность в водохранилище, а $Q(t)$ расход воды через турбины. $\int_0^t Q(t) dt = V_1$ — есть объем сработки из водохранилища.

Как видим $\frac{dV}{dt} = Q$. Условием минимума затрат топлива в энергосистеме без учета потерь в сетях для одной ТЭС и ГЭС будет условие минимума функционала

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_1} T (P_n - Q \cdot H \cdot \eta) dt, \quad (2)$$

где T — затраты топлива, P_n — нагрузка энергосистемы, η — к.п.д. ГЭС, $QH\eta = P_r$ — мощность ГЭС, $P_n - P_r = P_r$ — мощность ТЭС, т. е. — условие баланса мощностей реализовано непосредственно в выражении для функции T .

Изопериметрическое условие реализации гидроэлектростанцией заданного объема воды учтено значениями функции V в точках t_0 и t_1 . Для того, чтобы получить абсолютный экстремум для широкого класса кривых $Q(t)$, заданных значением определенного интеграла

$\int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt = V_1$ не следует фиксировать значения $Q(t)$ в точках t_0 и

t_1 . В противном случае мы получаем относительный экстремум только для класса кривых, проходящих через заданную пару точек. Условием минимума функционала (2) будет дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial P_r} \cdot \left[Q \left(\frac{\partial H}{\partial V} \cdot \eta + \frac{\partial \eta}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial V} \cdot H \right) - \frac{d}{dt} \left(H \cdot \eta + \frac{\partial H}{\partial Q} \cdot Q \cdot \eta + \frac{\partial \eta}{\partial Q} \cdot Q \cdot H + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial \eta}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial Q} \cdot Q \cdot H \right) \right] - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial P_r} \right) \cdot \left(H \cdot \eta + \frac{\partial H}{\partial Q} \cdot Q \cdot \eta + \right. \\ \left. + \frac{\partial \eta}{\partial Q} \cdot Q \cdot H + \frac{\partial \eta}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial Q} \cdot Q \cdot H \right) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Если в энергосистеме имеется несколько гидроэлектростанций, то получим систему дифференциальных уравнений вида (3). Для определения функции $\frac{\partial T}{\partial P_r}$ используется уравнение баланса мощностей $P_n - P_r = P_r$.

При учете потерь в сетях систему из любого числа ТЭС можно представить в виде одной эквивалентной ТЭС. То же при рассмотрении длительных циклов регулирования. Для ГЭС этого сделать невозможно из-за налагаемого на них условия реализации заданного объема воды. В общем случае уравнение (3) является нелинейным дифференциальным уравнением 2-го порядка.

Используя изложенный принцип, найдем условие максимума выработки электроэнергии отдельной ГЭС. Выработка электроэнергии отдельной ГЭС за промежуток времени от t_0 до t_1 есть функционал

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_1} (Q \cdot H \cdot \eta) dt. \quad (4)$$

Условием максимума этого функционала будет дифференциальное уравнение

$$Q \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial V} \cdot \tau + \frac{\partial \tau}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial V} \cdot H \right) - \frac{d}{dt} \left(H \cdot \tau + \frac{\partial H}{\partial Q} \cdot Q \cdot \tau + \frac{\partial \tau}{\partial Q} \cdot Q \cdot H + \right. \\ \left. + \frac{\partial \tau}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial Q} \cdot Q \cdot H \right) = 0. \quad (5)$$

Если в энергосистеме имеется каскад ГЭС, то мы можем рассмотреть следующие два случая:

1) ГЭС каскада имеют водохранилища с одинаковым циклом регулирования, а расположение их таково, что верхний бьеф нижней станции служит непосредственно нижним бьефом верхней.

2) ГЭС каскада имеют водохранилища с одинаковым циклом регулирования, и уровни нижних бьефов являются статическими функциями расходов воды только данной ГЭС.

В первом случае напор на любой промежуточной ГЭС будет представлен выражением

$$H_{(n+1)} = Z_{R(n+1)} \left\{ V_{R(n+1)} + \int_{t_0}^t [q_{n+1}(t) + Q_n(t) - Q_{n+1}(t)] dt \right\} - \\ - Z_{R(n+1)} \left\{ V_{R(n+2)} + \int_{t_0}^t [q_{n+2}(t) + Q_{n+1}(t) - Q_{n+2}(t)] dt \right\}, \quad (6)$$

а во втором случае выражением

$$H_{n+1} = Z_{R(n+1)} \left\{ V_{R(n+1)} + \int_{t_0}^t [q_{n+1}(t) + Q_n(t) - Q_{n+1}(t)] dt \right\} - Z_{R(n+1)}(Q) \quad (7)$$

Оптимальное решение задачи в первом случае описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{\partial T}{\partial P_1} \cdot \left[Q_1 \left(\frac{\partial H_1}{\partial V_1} \cdot \tau_1 + \frac{\partial \tau_1}{\partial H_1} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial V_1} \cdot H_1 \right) + Q_2 \left(\frac{\partial H_2}{\partial V_2} \cdot \tau_2 + \frac{\partial \tau_2}{\partial H_2} \cdot \frac{\partial H_2}{\partial V_2} \cdot H_2 \right) - \right. \\ \left. - \frac{d}{dt} \left(H_1 \cdot \tau_1 + Q_1 \cdot H_1 \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial Q_1} \right) \right] - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial P_1} \right) \cdot \left(H_1 \cdot \tau_1 + Q_1 \cdot H_1 \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial Q_1} \right) = 0$$

.....

$$\frac{\partial T}{\partial P_r} \cdot \left[Q_m \cdot \left(\frac{\partial H_m}{\partial V_m} \cdot \tau_m + \frac{\partial \tau_m}{\partial H_m} \cdot \frac{\partial H_m}{\partial V_m} \cdot H_m \right) - \frac{d}{dt} \left(H_m \cdot \tau_m + \right. \right. \\ \left. \left. + Q_m \cdot H_m \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial Q_m} \right) \right] - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial P_r} \right) \cdot \left(H_m \cdot \tau_m + Q_m \cdot H_m \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial Q_m} \right) = 0, \quad (8)$$

а во втором случае системой вида:

$$\frac{\partial T}{\partial P_1} \cdot \left[Q_1 \left(\frac{\partial H_1}{\partial V_1} \cdot \tau_1 + \frac{\partial \tau_1}{\partial H_1} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial V_1} \cdot H_1 \right) + Q_2 \left(\frac{\partial H_2}{\partial V_2} \cdot \tau_2 + \frac{\partial \tau_2}{\partial H_2} \cdot \frac{\partial H_2}{\partial V_2} \cdot H_2 \right) - \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{d}{dt} \left(H_1 \cdot \tau_0 + Q_1 \cdot \tau_0 \cdot \frac{\partial H_1}{\partial Q_1} + Q_1 \cdot H_1 \cdot \frac{\partial \tau_0}{\partial Q_1} + Q_1 \cdot H_1 \cdot \frac{\partial \tau_0}{\partial H_1} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial Q_1} \right) - \\
& - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial P_1} \right) \cdot \left(H_1 \cdot \tau_0 + Q_1 \cdot \tau_0 \cdot \frac{\partial H_1}{\partial Q_1} + Q_1 \cdot H_1 \cdot \frac{\partial \tau_0}{\partial Q_1} + Q_1 \cdot H_1 \cdot \frac{\partial \tau_0}{\partial H_1} \cdot \frac{\partial H_1}{\partial Q_1} \right) = 0 \\
& \dots \dots \dots \\
& \frac{\partial T}{\partial P_m} \Big|_{Q_m} \cdot \left(\frac{\partial H_m}{\partial V_m} \cdot \tau_m + \frac{\partial \tau_m}{\partial H_m} \cdot \frac{\partial H_m}{\partial V_m} \cdot H_m \right) - \\
& - \frac{d}{dt} \left(H_m \cdot \tau_m + Q_m \cdot \tau_m \cdot \frac{\partial H_m}{\partial Q_m} + Q_m \cdot H_m \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial Q_m} + Q_m \cdot H_m \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial H_m} \cdot \frac{\partial H_m}{\partial Q_m} \right) - \\
& - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial P_m} \right) \cdot \left(H_m \cdot \tau_m + Q_m \cdot \tau_m \cdot \frac{\partial H_m}{\partial Q_m} + Q_m \cdot H_m \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial Q_m} + Q_m \cdot H_m \cdot \frac{\partial \tau_m}{\partial H_m} \cdot \frac{\partial H_m}{\partial Q_m} \right) = 0.
\end{aligned} \tag{9}$$

§ 2. Оптимальный режим системы с газовыми станциями и компрессорными магистралью газопровода

С развитием в нашей стране сети магистральных газопроводов, подающих газ на промышленные и энергетические нужды, и с использованием в энергосистемах ТЭС, работающих на газовом топливе и не имеющих собственных газохранилищ, появляется необходимость разработки методики построения такого режима работы энергосистемы, для которого следует планировать переток газа к отдельным газовым станциям для получения наименьших затрат жидкого и твердого топлива в системе. Постановка этой задачи принадлежит Г. Т. Адонцу. Здесь мы рассмотрим условие оптимума для поставленной задачи. Для наглядности не будем учитывать потерь в сетях. Заметим, что мощности отдельных газовых потоков будут зависеть как от характеристик самих газовых ТЭС, так и от характеристик компрессорных станций магистрального газопровода, получающих питание непосредственно из сети рассматриваемой энергосистемы. Мощности, потребляемые ими за рассматриваемый период времени, заранее неизвестны. Суммарный же объем газа, идущий на покрытие промышленных и энергетических нужд района за рассматриваемый период времени, например сутки, известен. Если в энергосистеме имеются гидростанции, использующие воду высокогорных озер, и если вода представляет большую ценность для целей ирригации, можно решить задачу на минимум затрат воды. Схема газопровода и отбора газа может быть любой. Функционал затрат жидкого и твердого топлива в системе с учетом всех налагаемых на задачу ограничений будет иметь вид:

$$\Phi = \int_0^T \left[T + \lambda_1 \cdot Q_1 + \dots + \lambda_n \cdot Q_n + \gamma (\Gamma_{n1} + \dots + \Gamma_{n1} + \Gamma_{n1} + \dots + \Gamma_{nm}) + \right.$$

$$+ \tau_i(t) \cdot (P_n + P_{k1} + \dots + P_{km} - P_r - P_{r1} - \dots - P_{rn} - P_{r1} - \dots - P_{rm})] dt \quad (10)$$

Здесь Γ_r — затраты газа на газовых ТЭС. Γ_n — отбор газа на промышленные нужды в отдельных точках газопровода, являющийся известной функцией времени. P_n — нагрузка системы без учета компрессорных станций, P_k — мощности компрессорных станций, P_r — нагрузки ГЭС, P_r — нагрузки газовых ТЭС, P_r — нагрузки ТЭС на жидком и твердом топливе. Условием минимума для (10) в окончательном виде будет система алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial P_1} &= \lambda_1 \cdot \frac{\partial Q_1}{\partial P_{r1}} = \dots = \lambda_n \cdot \frac{\partial Q_n}{\partial P_{rn}} = \\ &= \frac{\frac{\partial \Gamma_{r1}}{\partial P_{r1}} \cdot \gamma}{1 - \frac{\partial P_{k1}}{\partial \Gamma_{k1}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{r1}}{\partial P_{r1}} - \frac{\partial P_{k2}}{\partial \Gamma_{k2}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{r1}}{\partial P_{r1}} - \dots} = \dots = \\ &= \frac{\frac{\partial \Gamma_{rm}}{\partial P_{rm}} \cdot \gamma}{1 - \frac{\partial P_{k1}}{\partial \Gamma_{k1}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{rm}}{\partial P_{rm}} - \frac{\partial P_{k2}}{\partial \Gamma_{k2}} \cdot \frac{\partial \Gamma_{rm}}{\partial P_{rm}} - \dots} = \tau_i(t), \quad (11) \end{aligned}$$

где Γ_k — весовой расход газа на компрессорной. Разность давлений на выкиде и приеме компрессоров принята постоянной. Введя обозначения

$$\frac{\partial T}{\partial P_1} = \varepsilon_1, \quad \frac{\partial Q}{\partial P_r} = \varepsilon_r; \quad \frac{\partial \Gamma_r}{\partial P_r} = \varepsilon_r; \quad \frac{\partial P_k}{\partial \Gamma_k} = \tau_r,$$

получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \lambda_1 \cdot \varepsilon_{r1} = \dots = \lambda_n \cdot \varepsilon_{rn} = \frac{\varepsilon_{r1} \cdot \gamma}{1 - \tau_1 \cdot \varepsilon_{r1} - \tau_2 \cdot \varepsilon_{r1} - \dots} = \dots = \\ &= \frac{\varepsilon_{rm} \cdot \gamma}{1 - \tau_1 \cdot \varepsilon_{rm} - \tau_2 \cdot \varepsilon_{rm} - \dots}. \quad (12) \end{aligned}$$

Для компрессорных, которые расположены за точкой отбора газа к данной газовой ТЭС, $\tau = 0$.

Используя выводы § 1, указанную задачу можно решить и в общем виде с учетом сработки водохранилищ ГЭС.

§ 3. Алгоритм для построения оптимального режима работы системы ТЭС и одной ГЭС, с учетом сработки водохранилища, на математической машине дискретного действия

Условием оптимума для данного случая является дифференциальное уравнение (3), рассмотренное нами в первом параграфе. Это уравнение n -степени относительно функции V и ее первой и второй производной по времени. Степень уравнения определяется

степенями полиномов $\frac{\partial T}{\partial P_T}$, $\frac{\partial \eta}{\partial Q}$, $\frac{\partial Z_B}{\partial Q}$ и $\frac{\partial Z_n}{\partial Q}$. Так как на практике, в ряде случаев, можно пренебречь изменением уровня воды в нижнем бьефе ГЭС, то допустив также, что к.п.д. ГЭС постоянен и равен некоторому среднему его значению, уравнение (3) можно представить в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial P_T} \cdot \frac{\partial H}{\partial v} \cdot q + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial P_T} \right) \cdot H = 0. \quad (13)$$

При получении уравнения (13) из уравнения (3) было принято во внимание, что $\mu(v) = \frac{\partial H}{\partial v} = -\frac{\partial H}{\partial V}$. Это видно из выражения для напора (1) при $Z_n(Q) = \text{const}$. Уравнение (13), также как и уравнение (3), является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка n -степени относительно V , $\frac{dV}{dt}$ и $\frac{d^2V}{dt^2}$ и неразрешимо известными численными методами решения дифференциальных уравнений. Однако, принимая во внимание, что $\frac{d^2V}{dt^2}$ входит только в выражение для относительного прироста системы ТЭС $\frac{\partial T}{\partial P_T} = \epsilon_T(P_T)$, и что аналитическое выражение или график $\epsilon_T(P_T)$ нам известен, можно решить уравнение (13) искусственным приемом не представляя его в явном виде относительно $\frac{d^2V}{dt^2}$. Решение этого уравнения даст нам оптимальные графики нагрузок системы ТЭС и одной ГЭС на длительный отрезок времени, определяемый циклом регулирования водохранилища ГЭС, и, вместе с тем, даст те объемы сработки из водохранилища за меньшие промежутки времени, например сутки, которые нами обычно предполагаются известными при построении суточного оптимального режима энергосистемы по уравнениям относительных приростов.

Разрешив (13) относительно $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial P_T} \right)$ и введя принятые нами сокращенные буквенные обозначения, получим

$$\epsilon_T(P_T) \cdot \frac{\mu(v) \cdot q}{H} = -\frac{d}{dt} \epsilon_T(P_T). \quad (14)$$

Для решения уравнения (14) разобьем рассматриваемый цикл регулирования на l интервалов времени Δt одинаковой длительности. Значение $\epsilon_T(P_T)$ в первый момент времени задаем произвольно. Заметим, что перебрав все l интервалов и соблюдая условие (14), мы можем не получить сразу в первом же цикле расчета искомого решения, удовлетворяющего заданному конечному значению функции $V(t) = V_1$. Однако, учитывая, что относительный прирост системы ТЭС в данном случае будет монотонно убывающей функцией време-

ни, что следует из того, что оба сомножителя в левой части уравнения (14) положительны и, следовательно, значение нагрузки системы ТЭС также будет убывающей функцией времени, можно искомое решение найти перебором режимов с различными, но выбираемыми по определенному закону значениями $\varepsilon_T(P_T)$, осуществляя несколько циклов расчета. При этом, очевидно, уменьшению конечных значений функции $V(t) = V_l$ будут соответствовать увеличения начальных значений $\varepsilon_T(P_T) = \varepsilon_{T1}$ и наоборот. Заметим, что речь идет не о строго заданной математической зависимости, а только о тенденции, т. е. о соответствии в изменении конечного значения V_l и начального значения ε_{T1} . Что же касается реальной математической зависимости, то для каждого конкретного режима она может быть самой различной.

Это легко видеть из выражения для $V_l = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_T}{H \cdot \eta} \cdot dt$. Для различ-

ных значений ε_{T1} график изменения H по времени имеет различную форму, так как при этом меняется график $P_T(t) = P_n(t) - P_T(t)$.

При решении задачи характеристику $\varepsilon_T(P_T)$ мы предполагаем продолженной в область фиктивных нагрузок ТЭС до значения P_T , равного максимальной нагрузке энергосистемы. Ограничения по мощности станций мы будем вносить после получения общего математического решения. При проведении расчета будем пользоваться вспомогательными формулами:

$$(\varepsilon_T)_{t+\Delta t} = (\varepsilon_T)_t - \left(\frac{d}{dt} \varepsilon_T \right) \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$P_{nt} - P_{Tt} = P_{rt} \quad (16)$$

$$V_{nt} = \sum_{j=1}^{j=t} q_j \quad (17)$$

$$v_t = V_n + V_{nt} - V_l \quad (18)$$

$$Q_t = 102 \frac{P_{rt}}{H_t \cdot \eta} \quad (19)$$

$$V_{t+\Delta t} = V_t + Q_t \cdot \Delta t. \quad (20)$$

Здесь t текущие дискретные значения моментов времени от 1 до l . Длительность интервала рекомендуется брать равной 1. При этом объемы воды должны быть соответствующим образом пересчитаны в условные объемы. Можно решить задачу и в фактических единицах измерения времени, однако, это менее удобно. Нам заданы $\varepsilon_T(P_T)$, $q(t)$, $P_n(t)$ аналитически или таблицей дискретных значений, а также значения V_n , $V_{l-1} = 0$, η , l , $v_{\min}$ и $v_{\max}$ и значение ε_{T1}^{j-1} , где j — номер расчетного цикла.

Для практических расчетов вполне достаточно, если $l=24$. Порядок решения задачи следующий:

1. По характеристике $P_T(\varepsilon_T)$ находим величину P_{Ti}^i для данного значения ε_{Ti}^i .

2. По характеристике $q(t)$ находим q_i^i для данного t и вычисляем V_{ni}^i по известным q для данного и всех предыдущих моментов времени по формуле (17).

3. По формуле (16) вычисляем P_{Ti}^i .

4. По формуле (18) вычисляем v_i^i .

Если $v_i^i < v_{\min}$, принимаем $v_i^i = v_{\min}$.

Если $v_i^i > v_{\max}$, принимаем $v_i^i = v_{\max}$.

5. По характеристикам $H(v)$ и $\mu(v)$ находим значения H_i^i и μ_i^i для известного значения v_i^i .

6. По формуле (19) вычисляем Q_i^i .

7. Сравниваем число t с числом l . Если $t < l$, переходим к пункту 8. Если $t = l$, переходим к пункту 9.

8. Из уравнения (14) определяем величину $\left(\frac{d}{dt} \varepsilon_i\right)_i^i$ и по формулам (15) и (20) вычисляем значения $(\varepsilon_{Ti})_{i+1}^i$ и V_{ni}^{i+1} для следующего момента времени и переходим к пункту 1.

9. Подсчитывается разность $V_{ni}^{i+1} - V_{ni}^i = \Delta V$ и вычисляется отношение $\frac{\Delta V}{V_{ni}^i} A^i$. Если $|A^i| < 0.03$, печатаются значения P_T^i , Q^i , H^i , V^i и V_{ni}^i для каждого момента времени от 1 до l и расчет заканчивается. Если $|A^i| > 0.03$, переходим к пункту 10.

10. Находим значение величины ε_{Ti}^{i+1} для следующего расчетного цикла и переходим к пункту 1. Значение ε_{Ti}^{i+1} находится последовательным делением интервала $(\varepsilon_{T\max}^i, \varepsilon_{Ti}^i)$ или $(\varepsilon_{Ti}^i, \varepsilon_{T\min}^i)$, где $\varepsilon_{T\max}^i$ и $\varepsilon_{T\min}^i$ наибольшее и наименьшее значения относительных приростов системы ТЭС, найденные на двух предыдущих циклах расчета, предшествовавших данному циклу i . Если $A^i < 0$, ε_{Ti}^{i+1} находится делением интервала $(\varepsilon_{T\max}^i, \varepsilon_{Ti}^i)$, если $A^i > 0$, ε_{Ti}^{i+1} находится делением интервала $(\varepsilon_{Ti}^i, \varepsilon_{T\min}^i)$. При этом предварительно необходимо из двух значений относительных приростов системы ТЭС, найденных на двух предыдущих циклах определить наименьшее и наибольшее значения.

При решении рассмотренной задачи к.п.д. ГЭС необязательно принимать постоянным. Его можно считать независимым от расходов воды через турбины, но зависимость к.п.д. от величины напора на ГЭС может учитываться. В последнем случае мощность ГЭС будет представлена выражениями

$$P_T = Q \cdot H(V) \cdot \eta(H) = Q \cdot H(v) \cdot \eta(v) = Q \cdot h(v),$$

где $h(v)$ — уже фиктивная кривая объемов водохранилища, в отличие от реальной $H(v)$. Эту кривую можно построить заранее. Таким образом, решение задачи вновь свелось к условию постоянства к.п.д.,

но только в данном случае его величина равна единице. Легко проверить, что исходное уравнение у нас не изменится.

Институт энергетики
АН Армянской ССР

Поступило 31.XII 1961

Վ. Գ. ՌԵԴԱԿՏՈՐՎ

ԷՆԵՐԳՈՍԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՌԵԺԻՄՆԵՐԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ն Ա Մ

Ներկա հոդվածում արված է էներգոսիստեմների օպտիմալ ռեժիմների մաթեմատիկական լուծումը հիդրոէլեկտրակայանների կապազի համար, երբ հաշվի է առնվում ջրի մակարդակի փոփոխությունը ջրամբարում:

Տրված է էներգոսիստեմների օպտիմալ ռեժիմների լուծումը նաև դաշային էլեկտրակայան և կոմպրեսորային մագիստրալ գաղամուղ ունեցող սիստեմների համար:

Էներգոսիստեմների էկոնոմիկական ռեժիմների լուծման համար, երբ սիստեմը բաղկացած է ջրմաշէլեկտրակայանից և երկարատև կորզավորման ջրամբար ունեցող մեկ հիդրոէլեկտրակայաններից կազմված է ալգորիթմ, որը կարելի է իրականացնել ժամանակակից գիտկրետ գործող հաշվիչ մեքենաների վրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A. L. Glimm, L. K. Kirchmayer. Economic Operation of variable-Head Hydroelectric Plants. Power Apparatus and Systems, № 39, 1958.
2. И. М. Маркович. О методике экономического распределения активных мощностей между ГЭС и ТЭС. Общая энергетика. Вып. 1, 1959.
3. И. М. Маркович. Основные режимные принципы автоматического регулирования частоты и активной мощности в объединенных энергосистемах и ЭЭС. Журн. Электричество, № 1, 1959.
4. И. М. Маркович. Режимы энергетических систем. Госэнергоиздат, 1957.
5. В. А. Горштейн. Наиболее эффективные режимы работы гидроэлектростанций в энергетических системах. Госэнергоиздат, 1959.
6. Б. Н. Никитин. Гидроэлектростанции в единой энергетической системе. Изд. АН СССР, 1960.
7. А. С. Смирнов. Транспорт и хранение газа. Гостехиздат, 1950.

ГИДРАВЛИКА

Б. Л. БУНИАТЯН

О НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ
 В НАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ

Неустановившийся режим движения характеризуется изменением во времени расхода и давления в каком-либо сечении водовода. В энергетических установках этими водоводами являются системы сооружений: напорный тоннель—уравнительный резервуар—турбинный трубопровод—спиральная камера—отсасывающая труба гидротурбины, нагнетательный трубопровод насосов, подводящий трубопровод гидравлических таранов и т. п.

В этих водоводах неустановившийся режим может возникнуть по причине быстрого изменения нагрузки, за которым последуют изменения во времени расхода и давления.

Если в водоводе с поперечным сечением F скорость движения воды v , давление P , длина l , отметка над плоскостью сравнения Z , объемный вес воды γ , потери напора h_n , ускорение силы тяжести g , выделить двумя перпендикулярным к оси трубы плоскостями бесконечно малый элемент трубы dx (рис. 1) и рассмотреть процесс движения воды в этом объеме, то при неустановившихся режимах получим основное уравнение одномерного движения



Рис. 1. Расчетная схема.

$$\frac{1}{g} \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \right] = - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (1)$$

где $P = P_0 + \gamma Z - \gamma h_n$.

Это уравнение справедливо для всех видов и конструкций напорных водоводов и связывает изменения по длине водовода P с изменением по длине и во времени v , следовательно P и v находятся в зависимости от x и t . Поэтому для его решения необходимо установить зависимость между $P(t)$ и $v(x)$.

Такую зависимость можно установить уравнением неразрывности, написанным для каждого случая в соответствующей форме. Так, например, при рассмотрении системы: тоннель—уравнительный резервуар и подводящий трубопровод гидравлических таранов в [1—4] жидкость принимается абсолютно жесткой благодаря чему допускается, что изменения скорости во времени в разных сечениях по длине водовода происходят одновременно и одинаково, т. е.

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0.$$

Поэтому, условие неразрывности расхода для системы сооружений запишется в виде:

$$Fv = S \frac{dy}{dt}, \quad (2)$$

где S —поперечное сечение резервуара, а y —подъем уровня воды в нем. При этом явление неустановившегося режима выражается затухающим во времени движением колонны несжимаемой жидкости, что иногда называют жестким гидравлическим ударом, или колебанием масс.

При рассмотрении турбинных и насосных трубопроводов [4], та же жидкость принимается упругой, подчиняющейся закону Гука благодаря чему в любой момент времени расходы в разных сечениях водовода разные, т. е.

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0.$$

В этом случае явление неустановившегося режима выражается упругими колебаниями колонны воды благодаря чему уравнение неразрывности запишется в виде:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{g}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3)$$

где

$$a = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon g}{\gamma}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon D}{E \delta}}}. \quad (4)$$

Здесь a —скорость распространения изменения давления; E , ε —модули упругости материалов трубы и жидкости, D —диаметр, δ —толщина стенки трубы. Если $E = \infty$

$$a = a_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon g}{\gamma}} = 1435 \text{ м/сек.} \quad (5)$$

Таким образом, система (1) и (2) описывает неустановившийся режим движения несжимаемой колонны жидкости, при отсутствии в ней упругих колебаний, а система (1) (3) описывает упругие колебания колонны при ее остановке.

В первом случае за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ инерционный напор будет:

$$\Delta h_1 = \frac{t}{g} \frac{(v_2 - v_1)}{(t_2 - t_1)}, \quad (6)$$

а во втором

$$\Delta y = \frac{a}{g}(v_2 - v_1). \quad (7)$$

Такое разделение хотя и соответствует в ряде случаев действительности, однако оно не полное и содержит в себе элементы произвола, ибо одна и та же жидкость в первом случае принимается абсолютно жесткой, а во втором — упругой.

Рассмотрим в каких случаях упругую жидкость можно считать абсолютно жесткой и покажем, что колонна воды совершая неустановившееся движение, одновременно может подвергаться упругим колебаниям.

Из (1) следует, что если неустановившийся режим вызван изменением давления в концевом сечении трубопровода на величину ΔP , то в данный момент, правая грань выделенного элемента (рис. 1) длиной dx , переместится на величину $\epsilon + \frac{\partial \epsilon}{\partial x} dx$, левая же грань — на величину ϵ .

Суммарное относительное перемещение элемента будет:

$$\epsilon = \frac{\partial \epsilon}{\partial x}.$$

Поскольку вода имеет модуль упругости ϵ , то по закону Гука

$$\Delta P = \epsilon \epsilon = \epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x}.$$

Учитывая это, уравнение (1) можно переписать в виде:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = -a^2 \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2}, \quad (8)$$

где a — определяется по (4) или по (5).

Следовательно, возмущение ΔP , созданное в конце трубопровода, движется в нем со скоростью a , т. е. уравнение движения режима с концевого участка водовода распространяется в нем не мгновенно, а с течением времени.

Так как уравнение (1) содержит в себе a и колонна воды совершая неустановившееся движение по длине имеет некоторый градиент скорости, то независимо от того уравнение неразрывности написано в форме (2) или (3), теоретически возможно существование в ней упругих колебаний, т. е. существование упругого гидравлического удара.

В зависимости от причины и способа возбуждения неустановившегося режима один из них может быть преобладающим, а другой исчезающим по сравнению с первым, или они могут быть соизмеримы.

Положим, что вода в начальный момент движется с установившейся скоростью v_0 , тогда скорость протекания жидкости в любом

створе системы сооружения тоннель—уровнительный резервуар трубопроводов будет:

$$v_0 = \frac{\sqrt{2gy_0}}{\sqrt{1+\zeta_c}}, \quad (9)$$

где $y_0 = \frac{P}{\gamma}$; ζ_c —коэффициент сопротивления системы. Если турбина или задвижка быстро закроется, то это с точки зрения гидравлики означает увеличение сопротивления задвижки на величину ζ_z , а механики—введение в систему действующих уравновешенных сил. дополнительной силы сопротивления. При этом у задвижки получим:

$$v_z = \frac{\sqrt{2gy_0}}{\sqrt{1+\zeta_c+\zeta_z}}. \quad (10)$$

Поскольку согласно (8) это возмущение распространяется со скоростью a , то в другом створе, куда возмущение еще не дошло, скорость будет $v_0 > v_z$. Следовательно, здесь имеет место упругий гидравлический удар.

Для системы сооружения тоннель—резервуар получим:

$$v_1 = v_0 = \frac{\sqrt{2gh_0}}{\sqrt{1+\zeta_n}}, \quad (11)$$

где h_0 —потери напора ζ_n —коэффициент сопротивления тоннеля.

Здесь происходит замена сил действующих на тоннель со стороны трубопровода, на равновеликие силы, действующие со стороны резервуара. Поэтому, в любом створе тоннеля $v_1 = \text{const}$ и определяется по (11). Но поскольку уровень воды в башне с течением времени поднимается, то согласно (8) в тоннели получим $\frac{\partial v}{\partial x} \neq 0$. Прак-

тически этого не наблюдается лишь потому, что процесс подъема уровня протекает медленно. Отсюда следует, что в данном сооружении явления упругого удара выражены весьма слабо и преобладающим является колебание масс. В этом случае можно считать $\varepsilon = \infty$, и явление тогда описывается уравнениями (1) и (2).

В случае же башни с сопротивлением наряду с колебанием масс, появляется резко выраженный упругий удар, так как при этом быстро вводится в действие сила сопротивления башни.

Из изложенного следует, что в данном водоводе $\frac{\partial v}{\partial x}$ может существовать только в том случае, когда возмущение создается путем приложения или отбрасывания сил, действующих в каком-либо его сечении.

Рассмотрим теперь случай, когда колонна воды совершая неустойчившееся движение, одновременно упруго колеблется.

Если при быстром закрытии турбины или задвижки, установленной на конце трубопровода, в момент полного закрытия имеем $v_0 = 0$ и неустановившийся режим выражается упругим гидравлическим ударом, то при открытии турбины, или при мгновенной остановке насоса благодаря инерции массы колонны воды, скорость v_0 изменяется по времени.

Так как на колонну воды действует реакция задвижки, то в случае уменьшения этой реакции, она расширяется, что видно из рис. 1 и уравнения (6). При этом в начальный момент скорость движения определяется формулой (10), которая справедлива для всей длины водовода.

При мгновенном открытии задвижки, установленной на конце трубопровода, длиной $x=l$ скорость течения v_1 , а в резервуаре $v=0$. Умножая (1) на dl принимая $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$ и интегрируя получим [5]

$$v_1 = u \frac{e^{\frac{t}{\tau_v}} - n}{e^{\frac{t}{\tau_v}} + n}, \quad (12)$$

где u — скорость потока при новом установившемся режиме;

$$n = \frac{l}{(\zeta_c - \sigma_{\zeta_c} + 1)u}; \quad n = \frac{u - v_0}{u + v_0}; \quad n = \sqrt{\frac{2gk_s}{\zeta_c - \sigma_{\zeta_c} + 1}}. \quad (13)$$

Для трубопровода насоса в случае его мгновенной остановки из (1) аналогично получим:

$$v_1 = v_0 y \left(\frac{\pi}{4} - \frac{t}{\tau_H} \right), \quad (14)$$

$$\tau_H = \frac{2l}{(\zeta_c + 1)v_0}. \quad (15)$$

Формулы (12) и (14) дают закон изменения $V(t)$ в створе задвижки в случае отсутствия влияния волны давления гидравлического удара.

Но поскольку согласно (8) колонна воды деформируется, т. е. $\frac{\partial v}{\partial x} < 0$, то для получения истинной скорости течения необходимо систему уравнений (1) и (3) решать с учетом формул (12) или (14), в качестве граничных условий при соответствующих случаях.

Пусть в трубопроводе с параметрами $l=70$ м, $y_0=2,75$ м, $v_0=0,735$ м/сек, $\zeta_c=100$, $h_n=0,42$ м, $\zeta_0=85,8$, $a=1240$ м/сек, $t_1=0,03$ сек. и $n = \frac{2l}{a} = -0,113$ сек. в какой-то момент времени задвижка от-

крылась настолько, что в конце нового установившегося режима скорость движения потока стала $u=1,5$ м/сек $h_n=1,7$ м, чему по (13)

соответствует $\zeta_c - \zeta_1 = 22.9$. Проследим изменение давления и скорости в конечном сечении трубопровода.

Из (13) находим $\tau = 1.95$, $n = 0.343$. Принимая за интервал времени $t_1 = \frac{l}{2a} = 0.0282$ сек., подставляя v_0 , τ и n в (12) и задавая t по интервалам, получим изменения $v(t)$, которые нанесены на рис. 2. Начальное возбуждение, двигаясь по трубопроводу в конце второго интервала t_2 дойдет до резервуара и отражаясь, вернется к задвижке. Так как отраженные из резервуара волны имеют положительный знак и соответствующая им скорость движения потока направлена к задвижке, то она увеличит те значения приращения скорости, кото-

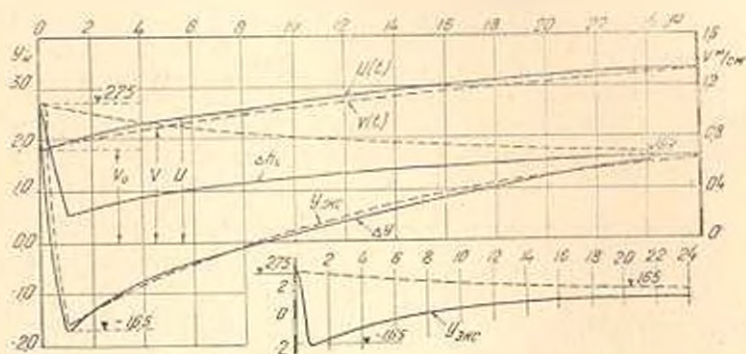


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых.

рые получаются по (12). Так, например, если в концах каждой фазы скорости по (12) будут $v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$, а изменения $\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3, \dots, \Delta v_n$, то в конце второго и последующих фаз, когда отраженные из резервуара волны дойдут до задвижки, общие приращения скорости по фазно будут:

$$\begin{aligned}
 \Delta u_1 &= \Delta v_1 & u_1 &= v_1 \\
 \Delta u_2 &= \Delta v_2 + \Delta v_1 & u_2 &= v_2 + \Delta v_1 \\
 \Delta u_3 &= \Delta v_3 + \Delta v_2 & u_3 &= v_3 + \Delta v_2 \\
 &\dots\dots\dots & &\dots\dots\dots \\
 \Delta u_n &= \Delta v_n + \Delta v_{n-1} & u_n &= v_n + \Delta v_{n-1}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

По этим данным на рис. 2 нанесена кривая $u(t)$, которая дает фактическое изменение скорости движения потока с учетом упругого удара. Если пренебречь влиянием упругого удара на процесс нарастания $v(t)$, т. е. считать колонну воды абсолютно жесткой, изменение скорости движения выразилось бы кривой $v(t)$, а значение инерционного напора отвечало бы формуле (6).

Пользуясь формулой (6) и кривой $v(t)$, на рис. 2 нанесены значения Δh , для каждого интервала времени t_1 .

Если в формуле (6) уменьшить Δt , величина Δh_i увеличится, и в пределе, когда $\Delta t \rightarrow 0$, получим $\Delta h_i \rightarrow \infty$. Однако, как указывает Г. И. Кривченко [2], многочисленные исследования опровергают этот вывод и устанавливают, что существует предел влияния ударного давления, как бы мало ни было Δt . Следовательно, для правильного представления явления гидравлического удара в случае открытия задвижки необходимо учитывать упругость воды и стенок трубопровода.

Учет влияния упругости приводит к существованию в трубопроводе волновых явлений, благодаря которым, согласно (16), процесс изменения фактической скорости движения потока протекает по кривой $u(t)$, вместо кривой $v(t)$.

Выписывая из кривой $u(t)$ пофазно значение Δu_i по формуле:

$$\Delta y_n = -\frac{a}{g} \Delta u_n + \Delta y_{n-1} \quad (17)$$

определим кривую изменения $\Delta y(t)$, которая нанесена на рис. 2. Там же нанесена олатная кривая $v_{\text{экс}}$, условия которой отвечают данным рассмотренного численного примера. Из сопоставления видно, что результаты расчетов по (17) с достаточной точностью совпадают с результатами экспериментов, а формула (6) дает заниженные результаты в среднем в два раза.

Действительно, если в формуле (6) принять $\Delta t = \frac{2l}{a}$, то для каждой фазы получим:

$$\Delta h_i = \frac{\Delta y}{2}, \quad (18)$$

т. е. колебания масс в случае открытия задвижки в среднем в два раза меньше.

На рис. 2 видно, что с приближением к новому установившемуся режиму кривые $v(t)$ и $u(t)$ асимптотически приближаются к одному и тому же значению u_0 , а кривые $\Delta y(t)$ и $\Delta h_i(t)$ к y_0 , т. е. в пределе, когда $t \rightarrow \infty$, практически $\Delta y = \Delta h_i = 0$.

Чтобы не было сомнений в правильности методики расчета и сделанных выводов, были произведены соответствующие эксперименты на натурном трубопроводе КанакерГЭС, где $l=430$ м, $a=860$ м/сек, $y_0=170$ м.

При работе агрегата с разными постоянными нагрузками, которым соответствовали скорости v_0 , равные 2,74; 1,64 и 0,7 м/сек, в течение одной секунды холостой сброс турбины открывался благодаря чему из трубопровода были сброшены дополнительные расходы.

При новом установившемся режиме скорости u_0 были 4,27; 3,25 и 2,9 м/сек. Относительное открытие холостого сброса α изменялось от 0 до 0,4, 0,36 и 0,46 линейно по времени.

При экспериментах изменения давления Δp и концевом сечении трубопровода через тензометрический датчик передавалась на осциллограф, который регистрировал $\Delta p(t)$ (рис. 3).

Проанализируем полученные из опыта 1 результаты.

Так как интегрирование уравнения (1) в случае изменения α во времени невозможно, то интегрируем по интервалам Δx . Если при

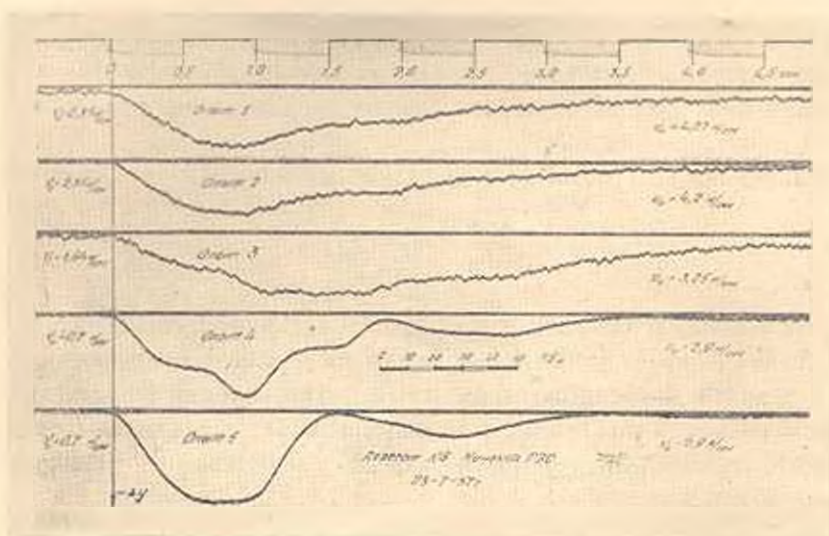


Рис. 4. Осциллограмма изменения давления в трубопроводе ГЭС при открытии хлористого сброса.

эксперименте в течение одной секунды τ изменяется от нуля до 0,4 по линейному закону, то разобьем α на четыре интервала $\alpha/4 = \Delta x$ и примем, что через каждый интервал времени 0,25 сек. холостой сброс мгновенно открывается на величину $\Delta x = 0,1$.

В соответствии с этим из характеристики холостого сброса находим для конца каждого интервала скорости u_0 , равные 2,74; 3,20; 3,72 и 4,27 м/сек, которым по (13) соответствуют $\tau = 0,35$; 0,41; 0,48; и 0,54,

Для определения $v(t)$ в течение времени первого интервала по имеющимся τ_1 , v_0 и u_0 по (13) и (12) находим значения v_1 в конце времени 0,25 сек. Подставляя теперь в те же формулы $v_1 = v_0$ и $u_0 = 3,2$ м/сек, при τ_1 находим v_2 в конце времени 0,5 сек. После этого, принимая $v_2 = v_1$ и $u_0 = 3,72$ м/сек для τ_2 находим v_3 в конце времени 0,75 сек., а затем, принимая $v_3 = v_2$, $u_0 = 4,27$ и τ_3 , находим $v(t)$ до конца установившегося режима. Полученная по этим расчетам кривая $v(t)$ нанесена на рис. 4 пунктирными линиями.

Аналогично предыдущей задаче находим $u(t)$, $\Delta p(t)$ и $\Delta h(t)$, которые приведены на рис. 4. Там же нанесены точки, полученные в результате обработки осциллограммы опыта № 1, приведенной на рис. 3.

Из этого сопоставления следует, что экспериментальные точки с достаточной точностью ложатся на расчетную кривую $\Delta y(t)$. Следовательно, выведенные формулы и методы расчетов могут быть рекомендованы для инженерных расчетов в случаях как малых, так и больших напоров и возмущений. Из приведенного анализа следует, что при быстром открытии задвижки, явление неустановившегося

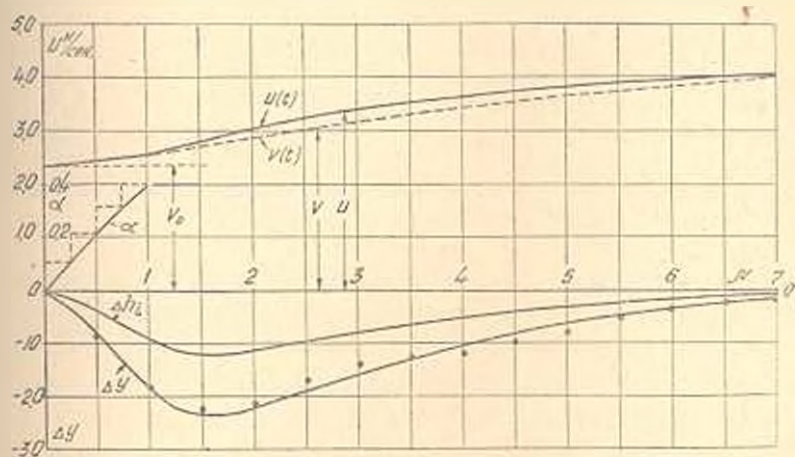


Рис. 4. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

движения характеризуется одновременным существованием колебания масс и упругого удара, которые по величине соизмеримы. При известных начальных условиях задача решается по цепным уравнениям упругого гидравлического удара с применением в качестве граничного условия формулы (12).

Институт водных проблем
АН Армянской ССР

Поступило 6.IX.1961

Ր. Լ. ԲՈՒՆԻՍԵԱՆ,

ԷԶՔՍԻԶԻՆ ՋՐԱՏԱՐԱՆԵՐՈՒՄ ՀԵԼՈՒՆՆԵՐԻ ԶԵԱՍՏԱՏՎԱՆԻ ՇԱՐԺՈՒՄՆԵՐԻ
ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա. Ժ. Ո Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հեղուկների շահատառված շարժումները բնորոշվում են ջրատարի տվյալ կորվածքում ելքի և ճնշման բառ ժամանակի փոփոխմամբ:

Այդ շարժումները կարող են արտահայտվել կամ զանգվածի տատանմամբ և կամ առաձգական հիդրավլիկական հարվածի երևույթով:

Հարվածում պարզարանում է նրանց էական տարբերությունը և տպացուցվում է, որ կոխված շահատառված շարժում առաջանալու ձևերից, միևնույն կառուցվածքում կարելի է ստանալ ինչպես զանգվածի տատանում, այնպես էլ առաձգական հիդրավլիկական հարված: Թացի աղ, հոդվածում ցույց է տրվում, որ հնարավոր է ստանալ նաև ալիպիսի ղեղը, երբ շահատառված շարժումն արտահայտվում է զանգվածի տատանման և առաձգական հիդրավլիկական հարվածի միատեսակ կառուցվածքով: Այդ ապացուցելու

համար կատարած առնական վերլուծությունների ճիշտ լինելը հաստատվում է թվական օրինակներից և փորձերից ստացված արդյունքների համեմատմամբ. որոնք բավարար ճշտությամբ միմյանց համընկնում են:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Егизаров Н. В. Гидроэлектрические силовые установки. ч. III, Л.—М., 1937.
2. Кривченко Г. И. Гидравлический удар и рациональные режимы регулирования турбин гидроэлектростанций. Госэнергоиздат, М.—Л., 1951.
3. Овсепян В. М. К вопросу конструирования мощных гидравлических таранов. Известия АН АрмССР*, (серия техн. наук). XI. № 1, 1958.
4. Мостков М. А. и Башкиров А. А. Расчеты гидравлического удара. Госэнергоиздат, М.—Л., 1952.
5. Бунятыан Б. Լ. Օ հիդրավիկե տրուբոքոնտի քոսե յո դո ռազրիվո. Известия ВУЗ, Энергетика № 11, 1960.

ГИДРАВЛИКА

Г. А. СИМОНЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ БОКОВОГО
ВОДОСЛИВА С ОСТРЫМ РЕБРОМ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ
ПРИЗМАТИЧЕСКОМ РУСЛЕ

Как известно, боковые водосливы весьма часто применяются в гидротехнической практике. Однако существующие методы гидравлического расчета их пропускной способности нельзя считать удовлетворительными. Это объясняется как сложностью явлений, возникающих при движении потока вдоль бокового водослива, так и не вполне обоснованными методами исследований экспериментального материала.

Исследования показали, что в потоке с боковым водосливом образуется поверхность раздела с эстойными зонами и происходит отжим переливающейся струи в сторону водослива. В результате указанных явлений возникают дополнительные местные сопротивления, которые влияют на пропускную способность водослива [4].

Другим фактором, влияющим на пропускную способность водослива является форма свободной поверхности потока в его пределах. В данной статье мы рассмотрим наиболее часто встречающийся на практике случай, когда свободная поверхность потока является кривой подпора, состояние потока спокойное ($Fr < 1$) и напор на водосливе возрастает по течению.

Что касается случаев $Fr > 1$, т. е. бурного состояния основного потока, то в этом случае его свободная поверхность формируется в виде кривой спада, и закономерности движения при этом иные, чем в рассматриваемом здесь случае. Поэтому случай $Fr > 1$ представляет отдельную задачу, здесь нерассмотренную, хотя методика исследований, излагаемая ниже остается общей для обоих случаев.

Ввиду переменности напора на боковом водосливе возникает вопрос о выборе его расчетной величины, входящей в формулу для расхода воды на водосливе.

В литературе приводятся зависимости, в которых за расчетный принимается напор либо до водослива, либо после него, или же средний напор по длине водослива.

Для выбора расчетной зависимости нами были проведены исследования значительного количества экспериментального материала. Ре-

результаты этих исследований показали, что наиболее целесообразной из существующих расчетных зависимостей является зависимость в виде:

$$Q_1 = m_1 \sqrt{2g} H_2^2 \cdot l, \quad (1)$$

где Q_1 — расход бокового водослива;

m_1 — коэффициент расхода бокового водослива без связи с коэффициентом прямого водослива;

H_2 — напор над водосливом в его конце на расстоянии $(3-5) H_2$;

l — длина фронта водослива.

Зависимость (1) по своей структуре аналогична зависимостям для прямых водосливов и обеспечивает условие динамического подобия. Одновременно она проста, по сравнению с другими существующими, так как в нее входит один напор, который сравнительно легче определить, исходя из условий течения в русле ниже водослива.

С другой стороны важное преимущество зависимости (1) заключается в том, что при обработке экспериментальных данных для определения коэффициента m_1 разброс точек на графике $m_1 = f\left(\frac{H_2}{H_2 + P}\right)$

получается наименьшим по сравнению с данными полученными по другим формулам, где вместо напора H_2 приняты напор H_0 до перелива через водослив, напор H_1 в начале водослива и средний напор $\frac{H_1 + H_2}{2}$.

2

Что касается методики определения коэффициента расхода, то уже было сказано, что мы не связываем его с коэффициентом прямого водослива, как это делают некоторые авторы, а определяем по формуле (1) на основании опытных данных. Так как боковой водослив по характеру работы намного отличается от прямого, пропускную способность его надо рассматривать во взаимосвязи с характерными для него явлениями как деление потока, переменность расходов и напоров и т. п.

Чтобы искать определенную закономерность между m_1 и параметрами потока с боковым водосливом мы предполагали, что коэффициент расхода первоначально можно представить в виде функции;

$$m_1 = f(l, b, g, \rho, \mu, v_1, v_2, h_1 - P, h_2 - P, h_2), \quad (3)$$

где l — длина фронта водослива;

b — ширина потока;

g — ускорение силы тяжести;

v_1 и v_2 — средние скорости течения в начале и в конце водослива;

h_1 — глубина потока в начале водослива;

h_2 — глубина потока в конце водослива;

P — высота порога водослива;

ρ — плотность;

μ — вязкость жидкости.

Включение μ и ρ в зависимость (2) придает исследованию более общий и обоснованный характер.

Для выполнения критериальных зависимостей, пользуемся π -теоремой, заранее определяя число величин в (2), имеющих независимую размерность. С этой целью составляем размерную матрицу из степеней размерностей массы, длины и времени для каждой величины входящей в (2). Затем определяем ранг матрицы, который равен числу величин, имеющих независимую размерность. В данном случае число величин с независимой размерностью равно трем.

Принимая независимыми размерности величины ρ , v_2 и h_2 , при помощи π -теоремы получаем:

$$m_1 = f\left(\frac{b}{h_2}, \frac{l}{h_2}, \frac{v_2 h_2}{\mu/\rho}, \frac{v_2}{v_1}, \frac{g h_2}{v_1^2}, \frac{h_1 - P}{h_2}, \frac{h_2 - P}{h_2}\right). \quad (3)$$

Чтобы выбрать удобный масштаб для графического представления, в полученное выражение (3) нужно ввести некоторые изменения. Например можно взять отношение двух сходных комплексов или симплексов, сохранив первоначальный вид одного из них, а также внести простые алгебраические изменения в самих критериях.

После указанных изменений мы получаем

$$m_1 = f\left(\frac{b}{l}, \frac{l}{h_2}, \frac{v_2 h_2}{\nu}, \frac{v_2}{v_1}, \frac{v_2}{\sqrt{g h_2}}, \frac{H_1}{H_2}, \frac{H_2}{H_2 + P}\right), \quad (4)$$

где $H_1 = h_1 - P$, $H_2 = h_2 - P$ напоры на водосливе в его начале и конце, $\nu = \frac{\rho}{\mu}$ коэффициент кинематической вязкости;

$\frac{v_2 h_2}{\nu}$ — число Рейнольдса;

$\frac{v_2}{\sqrt{g h_2}}$ — число Фруда.

Мы вправе допускать, что движение происходит в автомодельной области, и сопротивления от числа Рейнольдса не зависят. Кроме того, так как μ и ρ в другие критериальные зависимости не входят, то число Рейнольдса из полученных критериев вообще можно отбросить. Тогда (4) примет вид:

$$m_1 = f\left(\frac{b}{l}, \frac{l}{h_2}, \frac{v_2}{v_1}, \frac{v_2}{\sqrt{g h_2}}, \frac{H_1}{H_2}, \frac{H_2}{H_2 + P}\right). \quad (5)$$

Для выяснения влияния каждого из комплексов и симплексов, входящих в (5), нами были использованы данные опытов, проведенных Энгельсом (1917) [1], Велятца (1914) [2], Виги (1939) [3] и автором (1959), всего 160 опытов.

Все указанные опыты были проведены в прямоугольных призматических лотках, снабженных боковым водосливом с острым ребром. При всех опытах свободная поверхность потока в пределах водосли-

ва характеризовалась кривой подпора, а состояние потока было спокойным ($Fr < 1$).

После обработки опытного материала были построены графики зависимостей

$$m_2 = f\left(\frac{H_2}{H_2 + P}\right), \quad m_2 = f\left(\frac{b}{l}\right), \quad m_2 = f\left(\frac{l}{h_2}\right), \quad m_2 = f\left(\frac{v_2}{v_1}\right),$$

$$m_2 = f\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \text{ и } m_2 = f\left(\frac{v_2}{\sqrt{g h_2}}\right),$$

представленные на рисунках 1, 2, 3, 4, 5, 6.

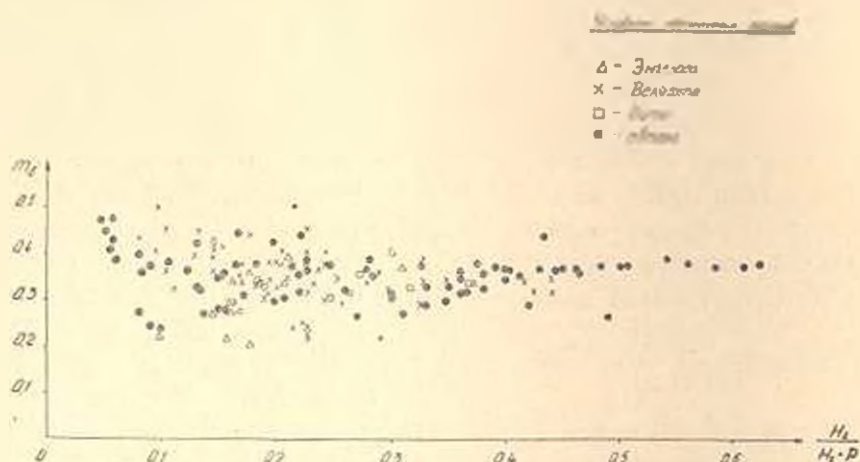


Рис. 1.

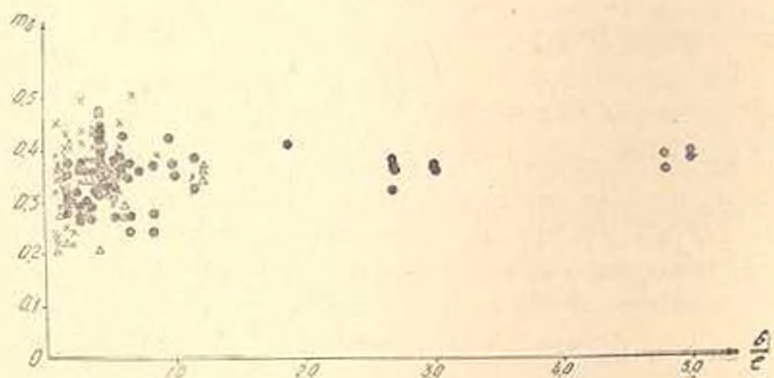


Рис. 2.

Из этих графиков следует, что m_2 — является функцией, притом линейной каждой из величин $\frac{H_1}{H_2}$ и $\frac{v_2}{\sqrt{g h_2}}$. Расчеты показали, что сортировку опытных точек по определенной закономерности в зависимости от числа Фруда на графике $m_2 = f\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$ не получаем.

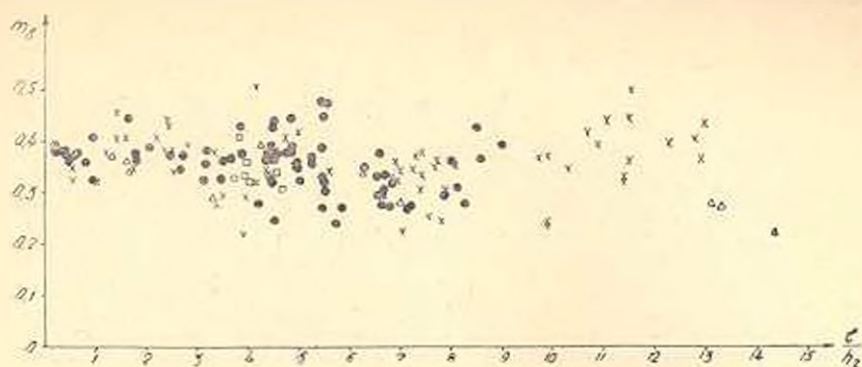


Рис. 3.

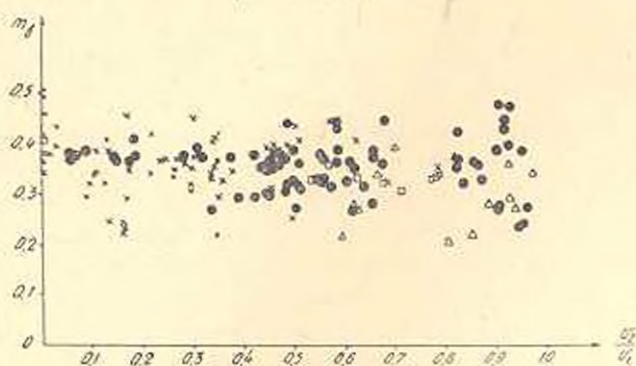


Рис. 4.

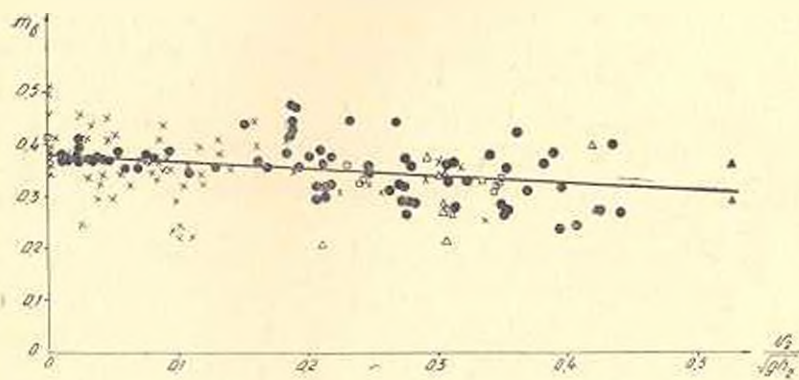


Рис. 5.



Рис. 6.

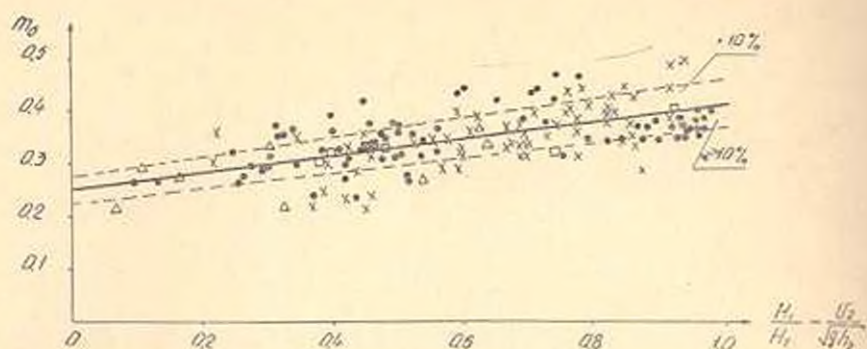


Рис. 7.

Поэтому задаваясь следующим видом связи $m = f\left(\frac{H_1}{H_2} - \frac{v_1}{\sqrt{gh_2}}\right)$, который, как показали вычисления, наиболее удачный по сравнению с произведением, отношением и т. д. и обработав соответствующим образом опытный материал построил график, представленный на рис. 7. Из этого графика следует, что указанная связь линейная. Уравнение этой линии в результате обработки материалов по методу наименьших квадратов получено в виде:

$$m = 0,167 \left[1,5 + \left(\frac{H_1}{H_2} - \frac{v_1}{\sqrt{gh_2}} \right) \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой эмпирическую зависимость между коэффициентом расхода бокового водослива с острым ребром, в прямоугольном призматическом русле.

На графике рис. 7 среднеквадратичное отклонение точек от указанной линии составляет $\pm 10\%$. Следовательно, по эмпирической формуле (6) коэффициент расхода бокового водослива можно определять с точностью $\pm 10\%$.

Одновременно надо указать, что несмотря на полученное отклонение 10% , сравнение результатов опытов с расчетами по формуле (6) показывает, что если исключить 35 опытов, из 160 дающие большие отклонения от полученной закономерности и составляющие примерно 20% от общего числа опытов, то совпадение опытных данных с расчетными получается удовлетворительное. Среднеквадратичное отклонение при этом составляет $5-7\%$ и лежит в пределах точности проведения опытов. Наряду со сказанным укажем, что увеличение точности определения m , связано, как с точностью проведения опытов, с их количеством, так и с тем, насколько удачно выбраны координаты, дающие наименьший разброс точек при обработке опытных материалов.

Что касается точности проведения опытов, то в данном случае она оказалась следующей. Так как $Q_1 = m \sqrt{2g} H_1^2 \cdot I$, то

$$\ln Q = \ln m_1 + \ln \sqrt{2g} + \frac{3}{2} \ln H_2 + \ln l.$$

Дифференцируя последнее выражение и складывая абсолютные величины дифференциалов слагаемых получим относительную ошибку для m_1 как сумму относительных ошибок остальных измеряемых величин:

$$\left| \frac{dm_1}{m_1} \right| = \left| \frac{dQ_1}{Q_1} \right| + \frac{3}{2} \left| \frac{dH_2}{H_2} \right| + \left| \frac{dl}{l} \right|. \quad (7)$$

При измерении расходов в лабораторных условиях с помощью мерных водосливов, допущенная ошибка не превышает $\pm 1\%$. При измерении же напора H_2 абсолютная погрешность могла доходить, например, до 3–4 мм, при напоре 100 мм. Такая погрешность весьма вероятна, так как уровень движущейся воды непрерывно колеблется.

Величина этих колебаний зависит, как от скорости, так и от других параметров потока.

Разумеется, что при измерении напоров меньших 100 мм, но с приведенной допускаемой абсолютной ошибкой 3–4 мм, относительная ошибка измерения напора при этом увеличится, и наоборот.

В измерении длины водослива ошибка весьма мала.

Таким образом мы имеем:

$$\left| \frac{dm_1}{m_1} \right| = \left| \frac{1}{100} + \frac{3}{2} \left| \frac{3-4}{100} \right| \right| = 5,5 \div 7\%.$$

Анализ ошибок показывает, что при расчете коэффициента расхода, они главным образом складываются из ошибок измерений напоров.

Для конкретного расчета бокового водослива с острым ребром при заданном напоре H_2 , предлагается в первом приближении принимать $m_1 = 0,35$, что соответствует $\frac{H_1}{H_2} = \frac{v_2}{\sqrt{gH_2}} = 0,53$. Соответствующая точка с указанными координатами лежит в середине графика рис. 7.

В дальнейшем, определяя расход бокового водослива по формуле (1) можно определить напор H_1 в начале водослива при помощи формул приведенных в [4] и пользуясь методом последовательных приближений уточнить величину коэффициента m_1 , входящего в формулу (1). Иными словами задачу решить подбором.

Изложенное выше позволяет прийти к следующим выводам:

1. Для расчета расхода бокового водослива, расположенного в призматическом русле со спокойным течением наиболее приемлемой из существующих зависимостей является формула (1).

2. Исследования, которые проведены на основании теории размерностей и обработки значительного количества экспериментальных данных, показывают, что коэффициент расхода бокового водослива с острым ребром, установленного в прямоугольном русле зависит от отношения $\frac{H_1}{H_2}$ напоров в начале и в конце водослива и от числа Фру-

да $\frac{v_2}{\sqrt{gH_2}}$ в конце водослива.

3. Расчет расхода бокового водослива предложенным методом можно вести только способом последовательных приближений.

Հ. Ա. ՍԻՄՈՅԱՆ

ՈՒՂԱՆԿՅՈՒՆ ՊՐԻՋՄԱՏԻԿ ՀՈՒՆՈՒՄ ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՍՈՒՐ ԽԱՅՐՈՎ ԿՈՂԱՅԻՆ ՋՐԹԱՓԻ ԹՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա. մ փ ո փ ո ւ մ

Սուր ծայրով կողային ջրթափի ջրաթողունակությունը որոշելու համար, որը հաստատված է ուղղանկյուն պրիզմատիկ հունում, օգտագործված է սովորական ջրթափի բանաձևը (1)։ Այդ բանաձևի մեջ որպես հաշվարքային մոտևում է կողային ջրթափի վերջում հաստատվող ջրի սլան ճնշումը, իսկ ելքի դորժակիցը որոշվում է ուղղակի կերպով փորձնական տվյալների հիման վրա։

Կողային ջրթափի թողունակությունը, կամ ինչպես միևնույն է ելքի դորժակիցը որոշելու համար օգտագործվել են 160 տարբեր հետադոտողների փորձնական կետեր։ Այդ կետերը համապատասխան կարգով մշակման են ենթարկվել չափողականության տեսության հիման վրա։ Ստացված արդյունքները պաշտոնապես հաստատված են, որ դիտված պայմաններում ելքի դորժակիցը կախված է միայն թվից կողային ջրթափի վերջում և ճնշումների հարաբերությունից ջրթափի սկզբում և վերջում։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Петров Г. А. Движение жидкости с переменным расходом вдоль пути. 1951.
2. Велятца М. Исследование бокового водослива. Energia Ellettrica, 1934, № 6.
3. Вити М. Измерение скорости на боковых водосливах. Energia Ellettrica 1959 36, № 7.
4. Симомян Г. А. К вопросу гидравлического расчета боковых водосливов. Известия АН АрмССР, серия тех. наук, том XIV, № 1. 1961.

ГИДРОЛОГИЯ

А. И. ЗАК

СРЕДНИЙ СТОК И ЕГО ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПО РЕКАМ
АРМЯНСКОЙ ССР

При решении задач хозяйственного использования вод прежде всего необходимо установить какое количество воды приносит река в среднем за год в интересующем нас створе реки. В основу проработок по комплексному использованию водных ресурсов должны быть положены достаточно точные количественные и качественные характеристики этих ресурсов. В связи с изложенным, вопрос изучения стока рек Армянской ССР приобрел особо важное значение, и этому вопросу уделяется большое внимание.

В настоящей статье, являющейся частью законченного в 1962 г. обобщения, рассматриваются вопросы расчета пространственного распределения среднего годового стока и его изменчивости по рекам Армянской ССР.

В современной практике гидрологических исследований по горным рекам описан ряд приемов косвенного расчета стока, основанных на использовании аргументов, которые по предположениям авторов отражают воздействие физико-географических условий на изменения водности рек и могут поддаваться достаточной количественной оценке в условиях малой гидрологической изученности. К такого рода аргументам относится, например, параметр „А“, объединяющий, как известно, весьма сложный, но более или менее однородный комплекс условий преимущественно климатического характера. Этот параметр, в формуле имеющий вид

$$M_0 = \frac{A}{H^n} \quad (1)$$

используется в ряде работ для расчета среднего стока по отдельным региональным территориям объединяющим бассейны нескольких горных рек, где H —средняя взвешенная высота водосбора, выступает как косвенный показатель физико-географических, прежде всего климатических, факторов стока, присущих той или иной ландшафтной зоне.

Характерной особенностью зависимости типа (1) является большая величина показателя „ n “, что свидетельствует о значительном влиянии средней взвешенной высоты водосбора. Однако, в горных районах территории Армянской ССР, где имеет место большая пестрота и в особенности аazonальность геологических условий, зависимость типа

(1) часто не применима, так как эти условия в ряде бассейнов рек нарушают закономерность, что не позволяет пользоваться обобщающими региональными зависимостями, так как значения параметра Δ варьируют в этих случаях в весьма больших пределах.

Поэтому, при гидрологических исследованиях по горным рекам Армении необходимо особенно тщательно проанализировать, в первую очередь, гидрометеорологический режим и геологические условия по бассейну каждой реки в отдельности. Кроме того, необходимо предварительно по отдельным рекам устанавливать зависимость вида:

$$M_0 = f(H).$$

Построения зависимостей модуля среднего годового стока M_0 от средней взвешенной высоты водосбора H в [7] были выполнены по каждой реке самостоятельно, а затем объединены на одном поле координат (рис. 1). Характерная особенность этих зависимостей состоит в том, что они подчинены различным законам. Так, например, по рекам Дебет, Дзорагет, Ташир, Раздан, Арпа, Вохчи, изменение модулей средних годовых расходов воды с высотой происходит по закону прямой линии, причем градиент возрастания модуля стока на каждые 100 м поднятия в горы составляет приблизительно от 0,65 до 3,3 л/сек. км². По рекам Агстев, некоторым рекам бассейна оз. Севан, р. Воратан модули средних годовых расходов воды закономерно изменяются по кривой с выпуклостью к оси высот, причем в нижних зонах между высотами 1700—1800 м модуль стока возрастает сравнительно медленно — приблизительно с 7 до 7,5 л/сек. км², а от точки перегиба с высоты 1850 м и до высоты 2400 м наблюдается наибольшая интенсивность прироста модуля стока приблизительно с 7,5 до 11 л/сек. км².

По реке Ахурян изменение модулей средних годовых расходов воды с высотой происходит по кривой с выпуклостью к оси модулей. Градиент возрастания модуля стока в зонах 1500—2000 м происходит медленно (с 8,5 до 10,5 л/сек. км²).

В отличие от других рек территории Армении, на реках Касах, Памбак и Масрик модули средних годовых расходов воды, по мере возрастания высоты местности, не увеличиваются, а уменьшаются, что объясняется подземным регулированием стока.

В соответствии с изложенным очевидно, что при установлении зависимостей модуля среднего годового стока (M_0) от средней взвешенной высоты водосбора (1) по каждой реке самостоятельно, непосредственно выявляются: характер самой зависимости, т. е. каким законам подчинены эти зависимости, градиенты возрастания модулей стока с высотой, а также наличие „гидрологических аномалий“ (Касах, Памбак и Масрик), когда модули стока по высоте не возрастают, а убывают. Эти особенности в ряде работ авторами не учитывались.

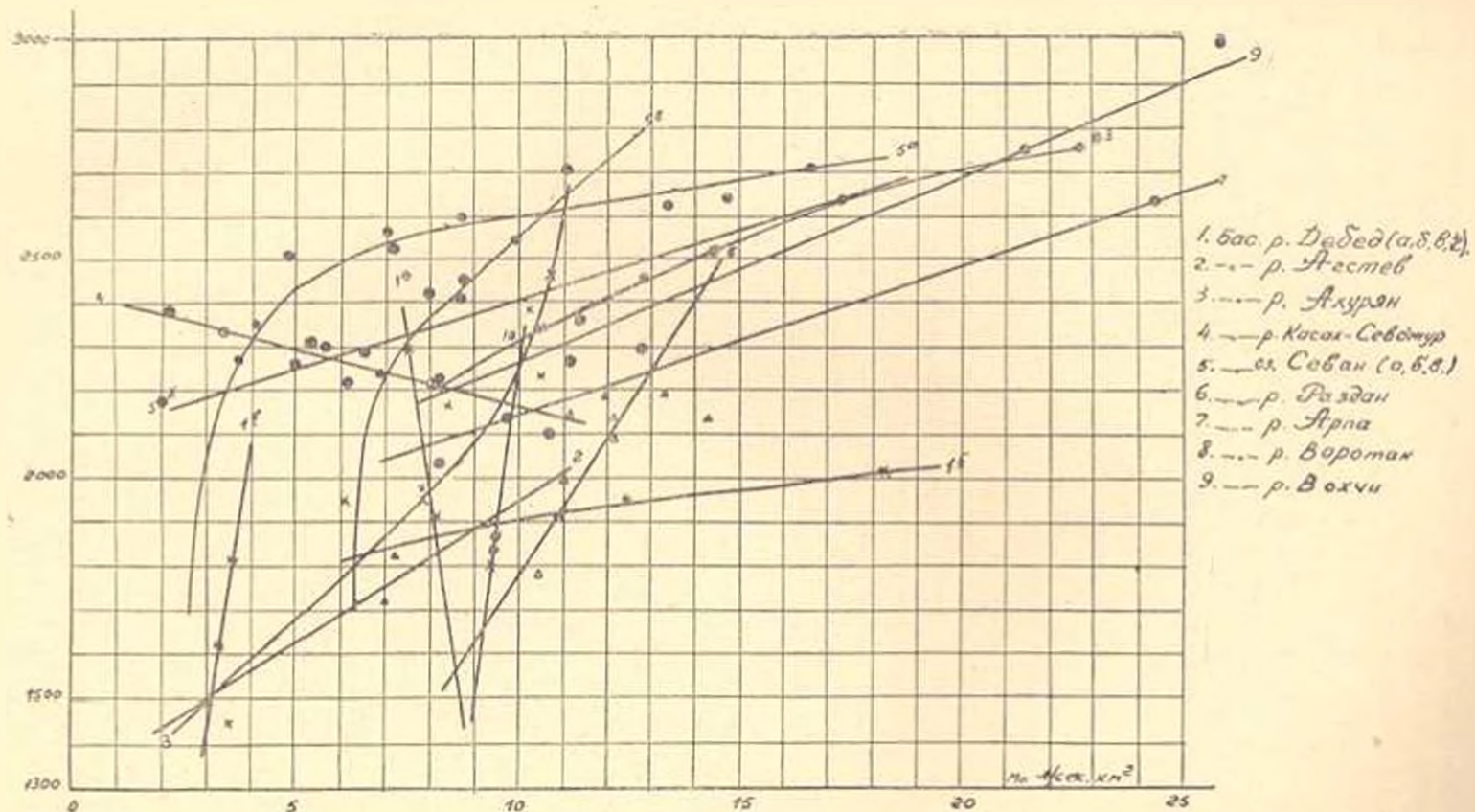


Рис. 1. Совмещенные кривые связи модулей средних годовых расходов воды со средней высотой бассейнов рек.

а точки, которые не подчинялись общим региональным законом, отбрасывались.

Выявленные зависимости модулей среднего стока от средней высоты бассейна, объединенные по крупным физико-географическим районам позволили оценить распределение среднего стока по территории и построить карту изолиний среднего стока рек Армянской ССР. Бассейны с геологической зарегулированностью на карте оконтурены. Пользуясь картой можно определить сток (модуль стока) для любого интересующего нас створа той или иной реки, с помощью формулы:

$$M_0 = \frac{(M_1 f_1) + \dots + (M_n f_n)}{f_1 + \dots + f_n}$$

где M_0 — искомое значение модуля стока для замыкающего створа; $M_1 f_1$ — соответственно модуль стока и площадь водосбора в пределах 1 — района, заключенной между двумя высотными зонами; M_n и f_n — то же в пределах n -го района. Переходя к исследованию коэффициентов вариации следует отметить, что наиболее обоснованными, дающими лучшие результаты, являются формулы, выражающие зависимость коэффициента вариации от нескольких факторов совместно (площадь бассейна, средний годовой модуль стока, озерность бассейна, дефицит влажности).

Из формул, включающих M_0 и F видно, что наибольшее влияние на значение коэффициента вариации оказывает средний годовой модуль стока, наименьшее — площадь бассейна. Доказательством этому служат незначительные показатели степени „ n “ при площади бассейна, заключающиеся в пределах $n = 0,06 - 0,076$ и сравнительно большие показатели степени „ n “ при модуле стока M_0 , имеющие значения $n = 0,27 - 0,48$. Установлено, что наиболее сильно влияет на коэффициент вариации дефицит влажности воздуха (показатель степени при дефиците влажности в формуле Антонова равен 0,89). Некоторыми авторами предлагается не учитывать зависимость $C_v = f(F)$, что мотивируется незначительным влиянием площади бассейна F на величину C_v .

Первая попытка расчета вариации годового стока горных рек была осуществлена Б. Д. Зайковым в 1944 г. [5]. Им были получены графические зависимости коэффициентов вариации от средней высоты водосборов.

А. Н. Важнов [1] в целях установления влияния естественной зарегулированности рек подземным питанием на изменчивость стока рек Армении, в качестве показателя зарегулированности стока принимает отношение среднего за весь ряд наблюдений наименьшего за зимние месяцы среднемесячного расхода воды Q_m к среднему многолетнему расходу воды (норме стока) данной реки.

Всю территорию Армении он разделил на две области.

Отдельно для каждой области были составлены связи коэффициентов вариации годового стока со средней высотой водосбора (H_{cp}), показателем естественной зарегулированности стока $\left(\frac{Q_u}{Q_0}\right)$ и площадью водосбора (F).

В результате анализа графиков связи А. Н. Важнов констатирует, что „зависимость от площади водосбора выражена очень слабо или вовсе не обнаруживается“.

В результате им было дано аналитическое выражение зависимости коэффициента вариации годового стока в следующем виде:

1. Для первой области

$$C_v = 0,51 - 0,21 \lg \left(\frac{Q_u}{Q_0} 100 + 1 \right) \quad (3)$$

2. Для второй области

$$C_v = 0,93 - 0,42 \lg \left(\frac{Q_u}{Q_0} 100 + 1 \right). \quad (4)$$

Далее А. Н. Важнов отмечает, что „попытка введения в уравнение средней высоты и площади бассейна не привела к удовлетворительным результатам“. Не возражая против правомерности установления зависимости коэффициента вариации годового стока C_v с показателем естественной зарегулированности стока $\frac{Q_u}{Q_0}$ отметим, что введение в

уравнение средней высоты водосбора, как это показала наша проверка, безусловно приводит к уменьшению ошибки в расчете, а также к возможности картирования C_v .

И. С. Соседов [8], рассматривая основные аргументы эмпирической зависимости, совершенно справедливо отмечает, что на коэффициент вариации годового стока оказывает влияние естественное регулирование колебаний стока подземной частью водосбора. Однако учитывая, что геологические условия в горных районах аномальны И. С. Соседов не пытается устанавливать связи коэффициента вариации годового стока в зависимости от условий естественной зарегулированности; он констатирует, что генетически различный характер связей коэффициента вариации с площадью и средней высотой водосбора позволяет предполагать повышение точности эмпирической расчетной зависимости при совместном использовании только этих двух аргументов (H_{cp} и F). Общий вид формулы предложенной И. С. Соседовым имеет вид:

$$C_v = \frac{A}{H_{cp}^n F^m}, \quad (5)$$

где A — физико-географический параметр.

Совершенно очевидно, что повышение точности эмпирической расчетной зависимости может быть достигнуто лишь при совместном использовании средней выгоды водосбора H , площади водосбора F и показателя естественной зарегулированности стока $\frac{Q_0}{Q_0}$. Зависимость, в которой учитываются аргументы H_{cp} и $\frac{Q_0}{Q_0}$ может быть представлена в следующем виде:

$$C_v = f \left(H_{cp}, \frac{Q_0}{Q_0} \right). \quad (6)$$

Значения коэффициентов вариации годового стока рек Армении, при наличии рядов по стоку в 15—32 года, были установлены непосредственно по данным наблюдений. Для рек с более короткими рядами коэффициенты вариации приводились к длинным периодам, по аналогии с лучше изученными реками Армении. Приведенные к длинному периоду значения коэффициентов вариации имеют, естественно, погрешности не только за счет неточности приводок, но и вследствие ошибок определения величины C_v за короткий период. Непосредственная связь значений C_v и F в горных условиях Армянской ССР не проявляется в достаточной степени, однако совершенно очевидно, что влияние площади на коэффициент вариации стока не исключается; оно лишь заглушается, в условиях вертикальной зональности, как это справедливо отмечает И. С. Соседов. В соответствии с изложенным на графике связи $C_v = f(H_{cp})$ были надписаны у точек значения

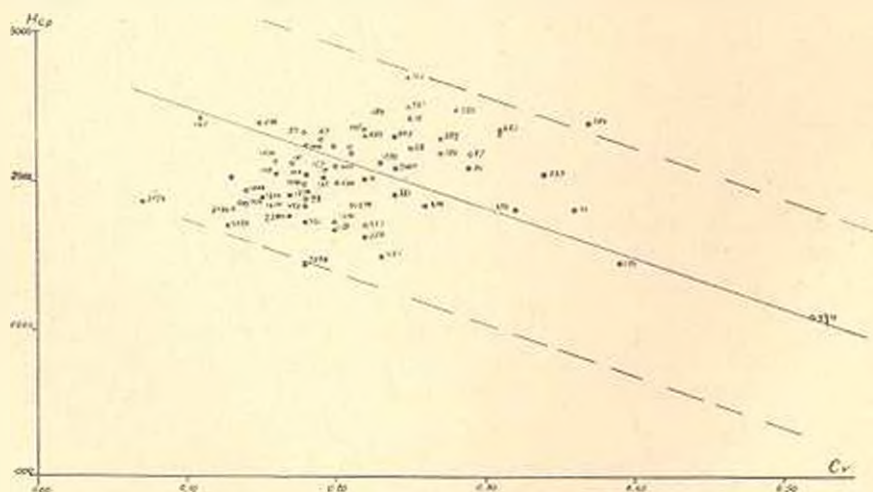


Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации среднего годового стока от естественной зарегулированности бассейнов рек.

площадей водосбора (рис. 2). Анализ связи показал, что вследствие сравнительно небольшого диапазона площадей водосборов рек Армянской ССР, проведение линии равных значений площадей водосборов

не представляется возможным. Связь $C_v = f(H_{cp})$ показывает на общее снижение коэффициентов вариации годового стока по мере повышения средней высоты водосбора.

Результаты сравнения значений C_v и $\frac{Q_v}{Q_n}$ показывают, что изменения коэффициента вариации стока C_v находятся в тесной зависимости от показателя естественной зарегулированности $\frac{Q_v}{Q_n}$; чем больше показатель естественной зарегулированности, тем меньше значение коэффициента вариации стока (табл. 1).

Таблица 1

№ п/п	Река	Пункт	Площадь F , км ²	H_{cp} , м средняя высота водосбора	Q_v зимний средне- суточный расход	Q_n норма годового стока	Отно- шение $\frac{Q_v}{Q_n}$	C_v Коэффициент ва- риации годового стока	$\frac{Q_v}{Q_n}$ в чис- лителе по- рядке	Соответствующий им коэффициент вари- ации C_v
1	Памбак	Налбанд	359	2230	1,36	2,82	0,48	0,21	0,96	0,07
2	Памбак	Мегрут	1070	1960	3,26	8,57	0,38	0,18	0,96	0,13
3	Памбак	Тумаян	1370	1920	3,89	11,60	0,33	0,17	0,64	0,13
4	Чичкан	Гетик	104	2235	0,57	1,14	0,50	0,18	0,60	0,17
5	Чичкан	Налбанд	186	2180	0,63	1,67	0,38	0,27	0,59	0,16
6	Дзорает	Степанаван	1000	1950	6,13	12,6	0,41	0,14	0,53	0,18
7	Дзорает	Н. вп. Гаргар	1450	1865	7,21	16,0	0,45	0,14	0,50	0,18
8	Талдзут	Хидзорут	102	2050	0,63	1,80	0,34	0,18	0,48	0,20
9	Дебет	ДзоратЭС	2830	1885	12,5	27,5	0,45	0,13	0,48	0,21
10	Дебет	Ахтала	3430	1820	14,4	32,5	0,44	0,13	0,46	0,22
11	Агсгев	Иджеван	1270	1830	2,57	9,22	0,27	0,21	0,45	0,14
12	Тавуш	Берз	102	—	0,25	0,90	0,27	0,26	0,45	0,13
13	Ахурян	Капс	839	2285	5,22	8,63	0,60	0,17	0,45	0,24
14	Ахурян	Айкацзор	7990	1454	15,07	28,2	0,53	0,18	0,44	0,13
15	Севджур	Эчминадзин	3380	—	24,7	25,7	0,96	0,13	0,44	0,34
16	Севджур	Ранчпар	3450	—	27,2	28,0	0,96	0,07	0,44	0,23
17	Касак	Зовуни	603	2313	1,49	3,29	0,45	0,24	0,43	0,25
18	Гехарот	Арагац	47	2369	0,24	0,82	0,30	0,19	0,41	0,14
19	Касак	Аштарак	932	2249	2,97	6,43	0,46	0,22	0,38	0,18
20	Мармарик	Агаввацзор	395	2360	1,33	5,71	0,23	0,22	0,38	0,27
21	Раздан	Арзни	1270	2140	9,16	15,50	0,59	0,16	0,37	0,22
22	Армичи	Геташен	380	2465	1,79	4,93	0,37	0,22	0,34	0,18
23	Азат	Зовашен	526	2004	4,67	7,31	0,67	0,13	0,33	0,17
24	Веди	Карабахлар	329	2035	0,87	1,96	0,44	0,34	0,30	0,19
25	Арпа	Елгизадзор	1210	2140	5,15	11,7	0,44	0,23	0,30	0,52
26	Волчи	Кафан	685	2350	2,21	8,24	0,27	0,31	0,27	0,21
27	Вороган	Ангахакот	787	2525	4,92	11,4	0,43	0,25	0,27	0,26
28	Воротан	Эйвацлар	1270	2270	10,9	22,6	0,48	0,20	0,27	0,31
29	Мегринет	Мегри	274	1050	0,97	3,34	0,30	0,52	0,23	0,22

Так в бассейне реки Севджур, представленном мощной толщей сильно трещиноватых андезито-базальтовых лав поглощающих значительную долю атмосферных осадков, коэффициент вариации годового стока сильно снижен ($C_v = 0,07$) за счет большого показателя естественной зарегулированности ($\frac{Q_v}{Q_n} = 0,96$).

Коэффициент вариации стока по реке Арма возрастает до 0,23, а показатель естественной зарегулированности снижается до значения 0,41.

Из непосредственной связи значений C_v и $\frac{Q_m}{Q_0}$ (рис. 3) видно, что



Рис. 3. Зависимость коэффициента вариации среднего годового стока от естественной зарегулированности бассейнов рек.

в зависимости от показателей естественной зарегулированности реки Армянской ССР могут быть объединены в две области:

Первая область — Армянское вулканическое нагорье и южные склоны Малого Кавказа, безлесные бассейны.

Вторая область — Северные и Северо-восточные склоны Малого Кавказа, залесенные бассейны.

Для расчета значений коэффициента вариации стока неизученных рек и повышения точности, в дальнейшем были установлены связи учитывающие среднюю высоту водосбора: $C_v = f(H_{ср})$.

Из рассмотрения зависимости C_v от $H_{ср}$ (рис. 4) видно, что эта связь закономерна также по отдельным выделенным областям, по которым установлена зависимость коэффициента вариации стока от показателя естественной зарегулированности.

Для первой области были получены две зависимости C_v от $H_{ср}$.

Первая зависимость объединяет реки Армянского вулканического нагорья и южных склонов малого Кавказа (реки озера Севан, р. Веди, Арпа, Вороган, Вохчи и Мегри и их притоки), безлесные бассейны:

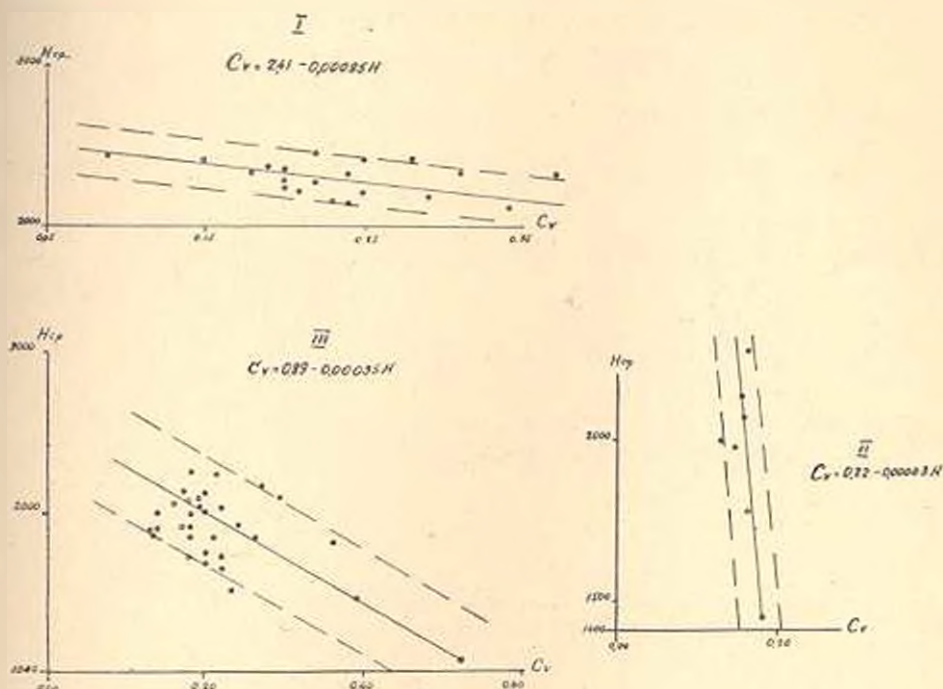


Рис. 4. Зависимость коэффициента вариации годового стока от средней высоты водосбора по рекам Армении.

Вторая зависимость объединяет сильно зарегулированные реки Армянского вулканического нагорья (Ахурян, Раздан, Касах-Севджур и Азат и их притоки), безлесные бассейны.

Для второй области получена одна зависимость C_v от H_{cp} и она объединяет реки северных и северо-восточных склонов Малого Кавказа (реки Памбак, Дебед, Агстев, Тавуш и их притоки), залесенные бассейны.

Для областей были получены аналитические выражения зависимости C_v от H_{cp} :

Первая область

Зависимость первая $C_v = 2,41 - 0,00095 H_{cp}$.

Зависимость вторая $C_v = 0,22 - 0,00003 H_{cp}$.

Вторая область

$$C_v = 0,89 - 0,00035 H_{cp}$$

Результаты сравнения значений C_v , вычисленных по полученным расчетным формулам с фактическими наблюдаемыми значениями C_v

по рекам имеющим большой период наблюдений (табл. 2) показали, что ошибка расчета по отдельным зависимостям составляет в пределах от 0,01 до 0,05, реже в пределах 0,10—0,14.

Эти ошибки в расчете C_r могут быть значительно уменьшены путем введения поправочного коэффициента к показателям естественной зарегулированности $\left(K = \frac{Q_e}{Q_0} \right)$ в расчетные формулы.

В результате установления зависимости коэффициента вариации стока от двух аргументов H_{cp} и $\frac{Q_e}{Q_0}$ получены следующие окончательные формулы для отдельных областей:

1. Армянское вулканическое нагорье и южные склоны Малого Кавказа, безлесные бассейны:

$$C_r = 2,41 - 0,00095 H_{cp} - 0,08 \frac{Q_e}{Q_0} \quad (7)$$

2. Сильно зарегулированные реки Армянского вулканического нагорья, безлесные бассейны (Ахурян, Раздан, Касах-Севджур, Азат):

$$C_r = 0,22 - 0,00003 H_{cp} \quad (8)$$

3. Северные и северо-восточные склоны Малого Кавказа, залесенные бассейны:

$$C_r = 0,89 - 0,000035 H_{cp} - 0,06 \frac{Q_e}{Q_0} \quad (9)$$

Таким образом показатель естественной зарегулированности стока $\frac{Q_e}{Q_0}$, являющийся в свою очередь величиной зональной, позволил выделить отдельные области, по которым были получены непосредственные зависимости C_r от H_{cp} , в результате чего значения коэффициентов вариации стока могут картироваться.

Управление гидрометслужбы
Армянской ССР

Поступило 18.X.61

В. И. 224

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՈՍԻ ԴԵՏՆԵՐԻ ՄԻՋՈՒՆ ՀՈՍԻՔԸ ԵՎ ՆՐԱ ՓՈՓՈԽԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

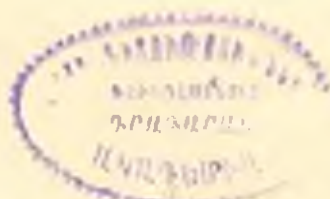
Ա Վ Վ Ի Ս Վ Ի Ռ Վ Մ

Հարկական ՍՈՍԻ-ի գետերի հոսքի հիդրոլոգիական դիտումների նյութերի աճի ուղիով հիման վրա հողվածում բերված են հոսքի չափի և ջրահավաքի աղաղանի միջին բարձրության միջև եղած ճշտված կախվածությունը և, ավելորդ աղ կախվածությունից, կառուցված է բաղմամբա տարիների միջին չափի քառակուսի:

Աշխատանքի երկրորդ մասը նվիրված է տարեկան հոսքի փոփոխության ուսումնասիրությանը: Այդ մասում հեղինակը առաջադրում է աշխատանքների դորժակցի կախվածությունը ոչ միայն բնական կանոնադրման դորժակցից, այլև ջրահավաք տվադանի միջին բարձրությունից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Важнов А. И. Средний многолетний сток рек Армянской ССР. Изд. АН Армянской ССР, Ереван, 1956.
2. Валески В. П. Исследование стока горных рек Армянской ССР. Изд. АН СССР, Москва, 1955.
3. Давыдов В. К. и Владимиром Л. А. Основные контуры водного баланса Армении. Записки ГИИ, т. X, Ленинград, 1933.
4. Зайков Б. Д. Гидрологический очерк. Материалы по исследованию озера Севан и его бассейна, Ленинград, 1933.
5. Зайков Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории Кавказа. Ленинград, 1944.
6. Зак А. И. Сток рек Армении в связи с вертикальной зональностью и методика прогноза стока. Рукопись, Ереван, 1954.
7. Зак А. И. Ресурсы поверхностных вод Армянской ССР. Арминдпроект, Ереван, 1960.
8. Соседов И. С. Опыт приближенного определения коэффициента вариации годового стока горных рек Восточного Казахстана. Вестник АН Казахской ССР, № 7 (112), Алма-Ата, 1954.



Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

62

ԷԼԵԿՏՐԱԵԽՆԻԿԱ

Յու. Մ. Շահնազարյան. Բարդ էլեկտրական սխեմաների գումարային կայունության ստուգման առանձնահատկությունները	3
--	---

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

Վ. Ս. Խաչատրյան. Էներգոսխառնմի ջառնգում հզորության կորուստի որոշման մեթոդ	13
Վ. Գ. Բեգլարով. Էներգոսխառնման ռադիոակտիվությունները	25

ՀԻԳՐԱՎԻԿԱ

Բ. Լ. Բուլդյարյան. Հիդրային էրատարներում հեղուկների հաստատված շարժումների ուժերի մասին	35
Հ. Ա. Սլոմեյան. Ուղղանկյուն պրիզմատիկ հունում հաստատված սուր ծայրով կոդային չբխիթի թողունակության որոշումը	45

ՀԻԴՐՈԼՈԳԻԱ

Ա. Ի. Զակ. Հայկական ՍՍՏ դետերի միջին հոսքը և նրա փոփոխականությունը	53
--	----

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Стр.

Электротехника

Ю. М. Шахназарян. Особенности проверки результирующей устойчивости сложных электрических систем	3
---	---

Электроэнергетика

В. С. Хачатрян. Методика расчета потерь мощности в сетях энергосистемы	13
Г. В. Бегларов. Оптимальные режимы энергосистем	25

Гидравлика

Л. Б. Буниatian. О неуставившихся режимах движения жидкости в напорных водоводах	35
Г. А. Симонян. Определение пропускной способности бокового водослива с острым ребром в прямоугольном призматическом русле	45

Гидрология

А. И. Зах. Средний сток и его изменчивость по рекам Армянской ССР	53
---	----