

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ.
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԽՐԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒԵԴԻԱ

Աղանց Հ. Տ., Ալեքսեևսկի Վ. Վ., Գառապարյան Ա. Մ., Եղիազարյան Ի. Վ., Կասյան Մ. Վ., Նազարով Ա. Գ. (պատ. խմբագիր), Սիմոնով Մ. Զ., Տեր-Ստեփանյան Գ. Ի., Փինաջյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ):

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афонц Г. Т., Алексеевский В. В., Гаспарян А. М., Егиазаров И. В., Касьян М. В., Назаров А. Г. (ответ. редактор), Пиниджян В. В. (зам. отв. редактора), Симонов М. З., Тер-Степанян Г. И.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

П. А. МАТЕВОСЯН

МНОЖИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО НА ВАРИСТОРАХ

За последние годы разработано значительное число различных типов множительных устройств, необходимых для использования в вычислительных машинах непрерывного действия (ВМНД). Предложен [1, 2, 4, 5] ряд схем множительных устройств, основанных на использовании свойств нелинейных полупроводниковых сопротивлений (НПС). Множительное устройство на НПС, по сравнению с множительным устройством на диодных квадраторах, имеет ряд преимуществ, однако их изготовление связано с предварительным расчетом каждого квадратора, что вызывает ряд неудобств в серийном производстве. В этой статье рассматривается способ расчета параметров множительного устройства на НПС (варисторах), основанный на предварительном установлении параметров квадратора посредством схемы, собранной на ВМНД.

Установление параметров квадратора

В качестве НПС были использованы варисторы типа НПС—100—1,5—3,6 диаметром 15 мм Таллинского радиотехнического завода. Предварительные испытания показали, что вольтамперная характеристика почти всех варисторов, имеющейся в нашем распоряжении партии, отличалась от квадратичной.

Существует ряд схем, позволяющих приблизить характеристику квадратора на НПС к квадратичной. В этих схемах путем включения последовательно и параллельно с НПС активных сопротивлений добиваются совпадения характеристики квадратора в трех точках с квадратичной функцией. Затем определяется путем измерений и оценивается отклонение характеристики квадратора от идеальной в других точках.

С целью упрощения способа установления параметров квадратора была собрана на машине МПТ-9 блок-схема (рис. 1) позволяющая реализовать зависимость вида:

$$U_{\text{вых}} = K_B \frac{100}{R_g + R_B} U_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где R_B — сопротивление варистора (ком);

R_g — добавочное к варистору сопротивление (ком);

K_B — коэффициент, подбираемый посредством делителя D для получения с определенной точностью на выходе схемы, рис. 1 напряжения вида:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}^2}{100}.$$

Схема рис. 1 позволяет установить параметры R_g и K_B при условии совпадения характеристики квадратора с идеальной в двух точках и в пределах заданного допуска в третьей точке.

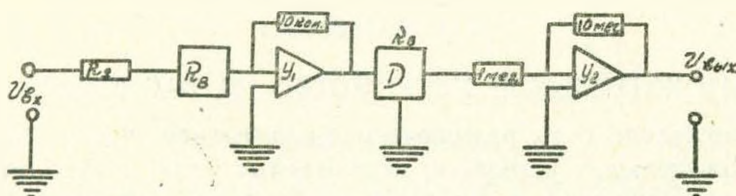


Рис. 1.

После ряда исследований полученных характеристик были выбраны следующие три значения входного напряжения $U_{\text{вх}} = 90, 50, 20$ в. При этом на выходе схемы при соответствующих значениях R_g и K_B следует получить, соответственно $U_{\text{вых}} = 81, 25$ и $4 \div 4,5$ в.

Экспериментальное исследование показало, что при выборе таких точек отклонение характеристики квадратора от идеальной во всех остальных точках, в подавляющем большинстве случаев, не превышает $0,5\%$ по отношению к полной шкале 100 в.

Для нахождения параметров R_g и K_B была использована следующая последовательность действий:

а) При помощи магазина сопротивлений устанавливается величина R_g в пределах $5 \div 10$ ком;

б) Делителем напряжения D достигается при $U_{\text{вх}} = 50$ в на выходе схемы $U_{\text{вых}} = 25$ в;

в) На вход схемы (рис. 1) подается напряжение $U_{\text{вх}} = 90$ в и измеряется величина $U_{\text{вых}}$. Если оказывается, что $U_{\text{вых}} > 81$ в, то величина R_g увеличивается, а если $U_{\text{вых}} < 81$ в, то величина R_g уменьшается;

г) Для нового значения R_g при $U_{\text{вх}} = 50$ в аналогично предыдущему подбирается посредством делителя новое значение K_B , обеспечивающее на выходе схемы $U_{\text{вых}} = 25$ в;

д) Повторно измеряется величина $U_{\text{вых}}$ при $U_{\text{вх}} = 90$ в.

Пункты б) и в) повторяются до достижения на выходе схемы $U_{\text{вых}} = 25$ в и $U_{\text{вых}} = 81$ в при $U_{\text{вх}}$, соответственно 50 и 90 в (практически подбор R_g и K_B достигается за $3 \div 4$ цикла). После этого измеряется величина $U_{\text{вых}}$ при $U_{\text{вх}} = 20$ в. Варисторы, у которых $U_{\text{вых}}$ оказываются меньше 4,4 в, считаются подобранными.

Описанным способом было установлено R_g и K_B для 42 варисторов*.

* В опытах по испытанию и подбору параметров квадратора принимала участие А. Г. Абгарян.

В результате экспериментов выявлено, что только у $15 \div 20\%$ варисторов величина напряжения $U_{\text{вых}}$ при $U_{\text{вх}} = 20$ в оказалось больше 4,4 в.

Характеристику квадратора можно изменить так, чтобы получить и при $U_{\text{вх}} = 20$ в значение $U_{\text{вых}} = 4$ в. Этого добиваются путем подключения параллельно варистору омического сопротивления R_n по схеме, описанной в работах [1], [2]. Однако, с целью упрощения схемы и методики выбора параметров квадратора, а также учитывая заданную точность квадратора $0,5\%$, второе сопротивление R_n в схему квадратора не включалось.

На основе установленных значений R_g и K_B построены гистограммы (рис. 2 и 3), из которых видно, что величины R_g и K_B у варисторов испытанной партии имеют довольно широкий разброс. Отношение величин R_g и K_B находится в пределах $20 \div 35$.



Рис. 2.

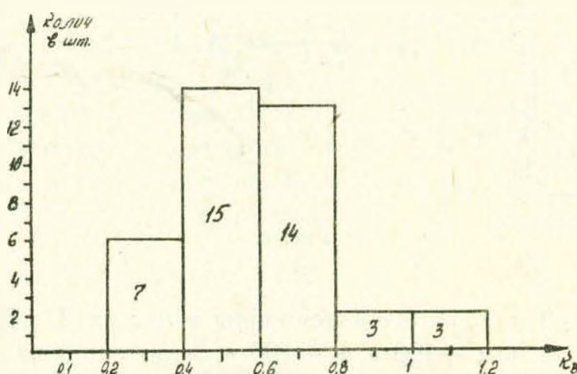


Рис. 3.

Схема множительного устройства

В основу схемы множительного устройства (рис. 4а) положено известное соотношение:

$$xy = \frac{1}{4} \left[(x+y)^2 - (x-y)^2 \right],$$

где x и y — множимое и множитель.

Эта же схема но без усилителей 1 и 2, несколько видоизмененная, представлена на рис. 4б.

Из рис. 4б видно, что сопротивления $R_1, R_2, \dots, R_8$ образуют делитель напряжения.

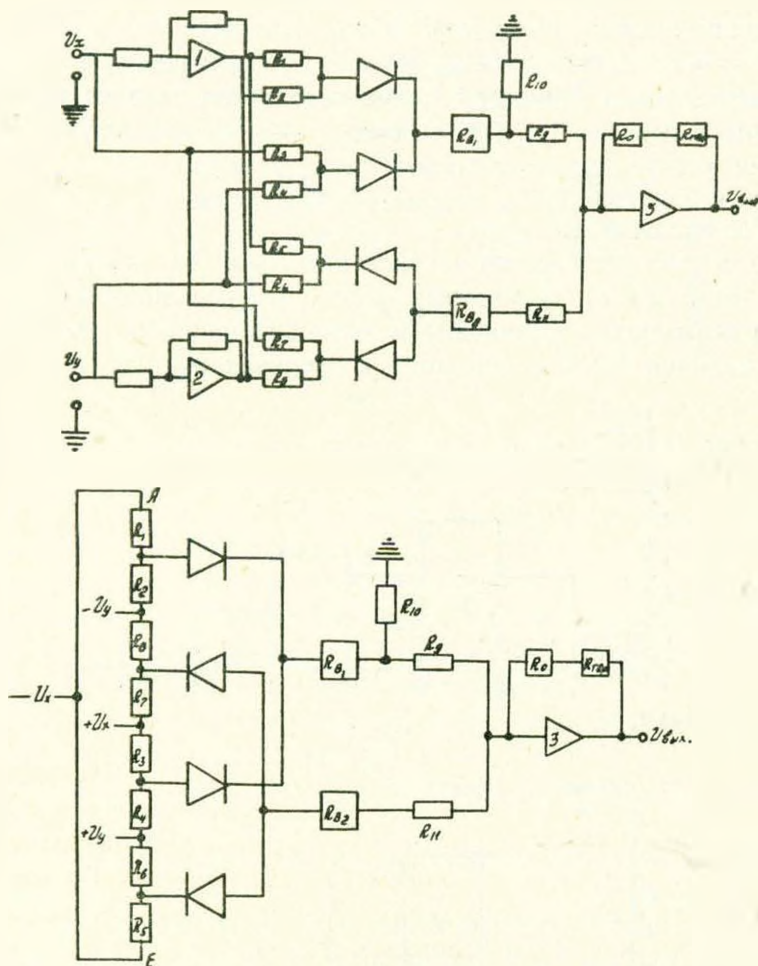


Рис. 4.

При $U_x = 0$ и $U_y = 100$ в потенциалы в точках Д и В должны быть соответственно равны $+100$ в и -100 в, а потенциалы в точках А и С должны быть равны нулю. Для соблюдения этого условия необходимо выполнение следующих равенств:

$$R_1 + R_2 = R_5 + R_6; \quad (2)$$

$$R_8 + R_7 = R_3 + R_4.$$

Аналогично при $U_y = 0$ и $U_x = 100$ в имеем:

$$R_3 + R_4 = R_6 + R_5; \quad (3)$$

$$R_1 + R_2 = R_8 + R_7.$$

И, наконец, желательно иметь:

$$R_1 = R_2; R_3 = R_4; R_5 = R_6; R_7 = R_8. \quad (4)$$

В результате, на основе соотношений — (2), (3) и (4), имеем:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_8. \quad (5)$$

Зависимость между напряжениями на входе и выходе блок-схемы множительного устройства (рис. 4) на основе уравнений токов для узловых точек и с учетом условия (5) можно после ряда преобразований представить так:

$$U_{\text{вых.}} = \frac{R_0}{\left(\frac{R_9 \cdot R_{10}}{R_9 + R_{10}} + R_B + \frac{R_1}{2} \right)} \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} \frac{|U_x + U_y|}{2} - \frac{R_0}{R_{11} + \frac{R_1}{R_2} + R_B} \frac{|U_x - U_y|}{2}. \quad (6)$$

Для установления значений R_1 , R_9 , R_{10} и R_{11} , добавочные сопротивления R_{g1} и R_{g2} обоих варисторов представим в виде суммы двух сопротивлений

$$R_{g1} = \frac{R_1}{2} + R_3; \quad (7)$$

$$R_{g2} = \frac{R_1}{2} + R_{11},$$

причем так, чтобы в написанных уравнениях первые слагаемые были бы равны между собой. Чтобы делитель напряжения, составленный из сопротивлений $R_1, R_2, \dots, R_9$, не представлял бы собой большую нагрузку для операционных усилителей ВМНД, величину сопротивления R_1 желательно выбрать в пределах $8 \div 30 \text{ к.ом.}$ После выбора величины сопротивления R_1 на основании (7) найдем R_{11} и R_3 .

Для определения R_9 и R_{10} напомним еще следующие соотношения;

$$R_3 = \frac{R_9 \cdot R_{10}}{R_9 + R_{10}}; \quad (8)$$

$$\frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} = \frac{K_{B1}}{K_{B2}} = p. \quad (9)$$

где K_{B1} и K_{B2} — соответственно коэффициенты первого и второго квадраторов. В цепь множительного устройства с делителем R_9 и R_{10} включается варистор с меньшим R_g .

Из совместного решения (8) и (9) найдем:

$$R_9 = \frac{R_3}{p} \quad \text{и} \quad R_{10} = \frac{R_3}{1-p}. \quad (10)$$

Рассмотрим в качестве примера расчет параметров множительного устройства, варисторы которого имеют следующие параметры:

Варистор (B_1) $R_{g_1} = 18,81$ ком. $K_{B_1} = 0,633$.

Варистор (B_2) $R_{g_2} = 22,7$ ком. $K_{B_2} = 0,894$.

В качестве сопротивлений $R_1, R_2, \dots, R_8$, отобрано 8 сопротивлений по 29,4 ком.

Тогда на основании (7) имеем:

$$R_{11} = 22,7 - \frac{29,4}{2} = 7,3 \text{ ком};$$

$$R_9 = 18,81 - \frac{29,4}{2} = 4,1 \text{ ком}.$$

Поскольку

$$p = \frac{K_{B_1}}{K_{B_2}} = \frac{0,633}{0,894} = 0,71,$$

то

$$R_9 = \frac{4,1}{0,71} = 5,8 \text{ ком};$$

$$R_{10} = \frac{4,1}{1-0,71} = 14 \text{ ком}.$$

С учетом вычисленных значений параметров была собрана схема множительного устройства, посредством которой найдены решения при различных значениях U_x и U_y . Максимальная величина погрешности составляет 0,7%. Аналогичный результат получен и в других примерах. Величина погрешности в значительной степени связана с изменением параметров варистора от изменения температуры. С целью уменьшения влияния температуры и влажности окружающей среды на точность решения, варисторы были покрыты гудроном толщиной слоя 2÷3 мм. Наблюдалось также некоторое изменение параметров варистора от проходящего через него тока. Последнее можно частично компенсировать установлением термосопротивления в обратную связь выходного усилителя множительного устройства.

Изготовленная в Институте энергетики АН Армянской ССР партия множительных устройств на варисторах предназначена для расширения возможностей вычислительной машины МПТ-9. Эти множительные блоки размещены в стойке блоков переменных коэффициентов, монтажная схема питания которой в связи с этим несколько переделана. Такая реконструкция позволит использовать машину МПТ-9, для решения дифференциальных уравнений с большим числом нелинейностей.

Институт энергетики
АН Армянской ССР

Поступило 3.V. 1963

Պ. Ա. ՄԱԹԵՎՈՍՅԱՆ

ՎԱՐԻՍՏՈՐՆԵՐՈՎ ՀԱՎԱՔՎԱԾ ԲԱԶՄԱՊԱՏԿՈՂ ՀԱՐՄԱՐԱՆՔ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հոգւածում դիտարկւում է ոչ գծային կիսահաղորդիչային դիմադրությունով հավաքած բազմապատկող հարմարանքի քառակուսային բնութագրի պարամետրերի ընտրման մեթոդը: Այն իրականացւում է անընդհատ գործող մաթեմատիկական մեքենայի վրա հավաքված սխեմայի օգնութեամբ:

Ի տարբերություն գոյութիւն ունեցող մեթոդներից, այս մեթոդով պարամետրերի ընտրումը կատարւում է շատ պարզ եղանակով: Այս դեպքում պահանջւում է քառակուսային բնութագրի համընկումը իդեալական պարաբոլայի հետ ոչ թե երեք կետում, այլ երկու կետում և մեկ կետում էլ մոտավոր համընկման պայմանով, որը իհարկե թույլատրելի է տված սահմաններում:

Բազմապատկող հարմարանքը օգտագործւում է անընդհատ գործող մաթեմատիկական մեքենաներում, որպէս առանձին բլոկ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Маслов А. А. Множительно-делительное устройство на тиритах. Журн. „Автоматика и телемеханика“. Т. XVIII, № 4, 1956.
2. Фицнер Л. Н. Блок произведения на тиритах. Журн. „Приборостроение“, № 4, 1956.
3. Бенин В. Ч. Ваттметр на карборундовых сопротивлениях. Журн. „Автоматика и телемеханика“. т. XVI, № 2, 1955.
4. Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. М., 1959.
5. Розенблат М. А., Седых О. А. Электрические свойства и применение карборундовых сопротивлений. Журн. „Автоматика и телемеханика“, т. XII, № 4, 1959.
6. Пасынков В. В., Савельев Г. А., Чиркин Л. К. Нелинейные полупроводниковые сопротивления и их применение. Судпромгиз. Л., 1962.

ЭНЕРГЕТИКА

В. Г. БЕГЛЯРОВ

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕРИРУЕМЫХ
МОЩНОСТЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С ГИДРОСТАНЦИЯМИ
МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОИСКА

Оптимальное распределение генерируемых мощностей в энергосистемах с гидростанциями (ГЭС), связанное с неизбежными колебаниями уровней воды в водохранилищах, описывается системами нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка [1, 2, 3]*, в общем случае неразрешимых в радикалах относительно второй производной. В силу этого классические численные методы решения дифференциальных уравнений в указанном случае использованы быть не могут. Кроме того сложность структуры большинства энергосистем с гидростанциями (каскадная связь ГЭС) и необходимость учета многих факторов, в том числе и учета граничных условий для функций также накладывает известные ограничения на применимость классических методов, не говоря уже о трудоемкости процесса представления исходных дифференциальных уравнений в явном виде относительно исходных функций и их производных.

Предлагаемая статья посвящена решению поставленной задачи с использованием принципов динамического программирования в сочетании с поисковыми методами решения экстремальных задач, рассматриваемыми в кибернетике и автоматике [4, 5, 6, 7].

Для решения поставленной задачи ниже предлагается метод динамического поиска, за отправную точку которого принято соображение о допустимости представления искомых функций линиями в последовательно делящемся пополам интервале времени, сущность которого станет понятной из дальнейшего изложения. Дана теоретикомножественная интерпретация предлагаемого метода, позволяющая наглядно представить характер процесса поиска.

Метод динамического поиска. Пусть задана энергосистема любой сложности с тепловыми станциями (ТЭС), объединяемыми в одну эквивалентную по уравнениям относительных приростов, с m гидростанциями. Известна характеристика затрат топлива эквивалентной ТЭС $B(P_T, t)$, в общем случае зависящая не только от нагрузки (мощно-

* Врожденной формой системы этих уравнений для частного случая постоянства уровней воды в водохранилищах ГЭС являются широко известные алгебраические уравнения относительных приростов.

сти) станции P_T , но и от времени t , например в связи с изменением состава работающего оборудования, выводом его в ремонт, резерв и т. п. Обозначим через $Q(t)^i$, где i — порядковый номер ГЭС ($i=1, m$) расход воды через турбины данной гидростанции для выработки электроэнергии, а через $V(t)^i$ соответственно объем сработки воды из водохранилища последней для выработки электроэнергии. При этом

$$V(t)^i = \int_0^t Q(t)^i dt;$$

$(0, t)$ расчетный период времени, внутри которого ищется оптимальный режим. Для ГЭС должны выполняться следующие граничные условия:

$$v_{\min}^i \leq v(t)^i \leq v_{\max}^i; \quad (1)$$

$$Q_{\min}^i \leq Q(t)^i \leq Q_{\max}^{i, **} \quad (2)$$

где v^i — объем воды в водохранилище i -ой ГЭС.

Разобьем рассматриваемый отрезок времени (расчетный период) $(0, t)$ на конечное число $K = 2^n$ элементарных отрезков Δt , где n — любое целое положительное число, и представим семейство непрерывных кривых $Q(t)^i$ для каждой ГЭС, т. е. для каждого i , семейством ступенчатых функций $Q^{i, k}$, удовлетворяющих изопериметрическому условию:

$$\sum_{k=1}^{t-k} \Delta t \cdot Q^{i, k} = V^{i, k}, \quad (3)$$

где $V^{i, k}$ — известный объем воды, подлежащий реализации из водохранилища i -ой ГЭС для выработки электроэнергии к концу отрезка времени $(0, t)$.

Если задана комбинация численных значений $Q^{i, k}$, то тем самым определен конкретный режим работы энергосистемы из множества режимов. Путем конечного числа операций, зная $Q^{i, k}$ и используя необходимые расчетные характеристики энергосистемы, может быть подсчитана величина оптимизируемой функции

$$R = R(Q^{i, k}), \quad (4)$$

которая может представлять собой, в частности, затраты топлива на

** Величину $Q_{\max}^{i, **}$ строго говоря, нельзя считать постоянной. Она изменяется в течение времени из-за изменения напора ГЭС и характер этого изменения определяется для каждого конкретного режима видом кривой $Q(t)^i$. Однако колебания величины $Q_{\max}^{i, **}$ относительно невелики и потому предположение о ее постоянстве вполне допустимо.

ТЭС за расчетный период или выработку электроэнергии в системе ГЭС.

В первом случае ищется минимум, во втором — максимум. Функция (4), аргумент $Q^{i,t}$ которой подчиняется условию (3), представляет собой некоторую $(m \cdot k + 1)$ -мерную кривую в пространстве $m \cdot k$ переменных. Нужно найти оптимальную комбинацию чисел $Q^{i,t}$ и соответствующих им кривых $V(t)^{i,t}$, дающих экстремум функции (4). Наличие условий (3) приводит к тому, что изменение величины любого $Q^{i,t}$ для данного i и t сопряжено с необходимостью одновременного изменения всех остальных $Q^{i,t}$ того же индекса i по тому или иному закону. Поступим следующим образом. Объединим расходы воды $Q^{i,t}$ в отдельные элементарные промежутки времени Δt для всех $t = \overline{1, k}$ для каждой i -ой ГЭС. В кортежи $g = k, \frac{k}{2}, \frac{k}{4}, \frac{k}{8}, \dots, 8, 4, 2, 1$ элементов различных индексов t , принимая численные значения $Q^{i,t}$ внутри них равными друг другу, а порядок следования в порядке возрастания индекса t . При этом кортежи, объединяющие одно и то же число элементов g , не должны пересекаться, т. е. не должны иметь элементов одного и того же индекса t . Принятая система деления отрезка $(0, t)$ позволяет укладывать в нем всегда целое и четное число таких объединений, равное $F = \frac{k}{g}$. Обозначим через h порядковый номер кортежа, объединяющего данное число элементов g , $h = \overline{1, F}$. Меньшие номера будем присуждать кортежам, объединяющим $Q^{i,t}$ меньших индексов t . Введем для кортежей символическое обозначение $\overline{mQ}^{g,i,h}$. Будем называть $Q^{i,t}$ и $Q^{i',t'} \in \overline{mQ}^{g,i,h}$ подобными, $Q^{i,t} - Q^{i',t'} \in \overline{mQ}^{g,i,h}$, если у них равны индексы i и t . Рассмотрим все возможные комбинации конечного числа дискретных значений $Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{g,i,h}$, но такие чтобы для всех $Q^{i,t}$, входящих во все кортежи $h = \overline{1, F}$ данных индексов g и i выполнялось условие (3). При этом множество R будет представлено своими подмножествами $R_g(\overline{mQ}^{h,i,h})$, причем

$$R_{g-k} \in R_{g=\frac{k}{2}} \subset R_{g=\frac{k}{4}} \subset \dots \subset R_{g=2} \subset R_{g=1} = R, \quad (5)$$

где $R_{g=k}$ — одноэлементно (элементы множеств будем обозначать соответствующими строчными буквами), так как представляет собой режим сработки воды из водохранилищ всех ГЭС с постоянным значением расхода через турбины $Q_{cp}^{g-k,i,h-1} = Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{g-k,i,h-1}$, определяемым однозначно условием (3). Упорядочим R , выделяя в нем некоторые совокупности элементов (области) $B_g^x(Q^{i,t})$, где x — номер

области данного индекса g , пробегающих ряд целых натуральных чисел $x = \overline{1, B}$. Области B_g^x должны быть такими, чтобы

$$\bigcup_x B_g^x = R, \quad (6)$$

а

$$\bigcup_x B_g^x = 0. \quad (7)$$

Кроме того, каждая из областей B_g^x данного индекса g должна содержать в себе только один элемент подмножества R_g того же индекса g . В рассматриваемом случае:

$$\bigcap_x B_g^x \cdot R_g^x = r_g^x, \quad r_g^x \rightarrow B_g^x, \quad (8)$$

т. е. число x областей B_g^x данного индекса g равно числу $r_g \in R_g$ того же индекса g . Причем верхнее значение $x = B$ не остается постоянным, а является функцией от g , $B(g)$. Для $g = k$ очевидно, что $B = 1$. Поэтому $B_{g=k}^{x=k} = R$. Из всех B_g^x , построенных в согласии с соотношением (8), условиям (6) и (7) удовлетворяют только такие $B_g^x(Q^{i,t})$, для которых $Q^{i,t} \sim Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{[g, i, k]}$ удовлетворяют соотношению

$$\sum_i Q^{i,t} = \sum_i (Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{[g, i, h]}). \quad (9)$$

В выражении (9) суммирование ведется по всем t для $\overline{mQ}^{[g, i, h]}$. Если для рассмотренной системы областей не выполнялось бы, например, условие (6), то следует к левой части равенства (6) прибавить некоторое множество, дополняющее его до R и для которого соотношение (9) не имеет места. Но такого дополнения не может быть, так как любая конечная совокупность ограниченных по своей величине чисел должна иметь конечную сумму. Это очевидно для бесконечных множеств. Плотность же рассматриваемых нами конечных множеств зависит от того, как много элементов пропускается при квантовании R_g . Поэтому здесь не рассматриваются все те возможные дополнения к левой части равенства (6), которые дают $\sum_i Q^{i,t}$ близкие, но не

равные $\sum_i (Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{[g, i, h]})$. Если бы не выполнялось условие (7), то

для одних и тех же ступенчатых функций $Q^{i,t}$, являющихся пересечением соответствующих областей B_g^x , существовало несколько значений сумм их ординат, что невозможно. Заметим, что среди элементов $B_{g=a}^x$, где $a = k, \dots, 8, 4, 2$ должны находиться, в частности, все $r_{g=\frac{a}{2}}^x \in R_{g=\frac{a}{2}}$, для которых сумма всех $Q^{i,t}$ данного i , входящих в два

смежных кортежа $\overline{mQ}^{[g=\frac{a}{2}, i, h]}$ нечетного и четного номера h , равна сумме подобных $Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{[g=a, i, h]}$, т. е.

$$\sum_t (Q^{i,t} \in \overline{mQ} |^{g=a, i, h_a}) = \sum_t (Q^{i,t} \in \overline{mQ} |^{g=\frac{a}{2}, i, h_{\frac{a}{2}} - 2h_a - 1} + \\ + Q^{i,t} \in \overline{mQ} |^{g=\frac{a}{2}, i, h_{\frac{a}{2}} - 2h_a}). \quad (10)$$

Суммирование ведется по всем t для $\overline{mQ} |^{g=a, i, h_a}$. Индекс a или $\frac{a}{2}$ при номере кортежа h введен, чтобы различить кортежи, соответствующие $g=a$ и $g=\frac{a}{2}$. Если к тому же принять во внимание включения (5), множество R можно представить системой вложенных друг в друга областей B_g^x так, как это изображено на рис. 1. На этом рисунке для конкретности принято, что каждая область $B_{g=a}^x$ включает в себя три области $B_{g=\frac{a}{2}}^x$. Если в упорядоченном таким образом множестве R любой элемент любой области B_g^x не имеет численных значений, заключенных между численными значениями любой пары элементов любой другой области B_g^x того же индекса g , то задача имеет единственное экстремальное решение, которое можно получить, перебирая элементы R_g , начиная с $g = k/2$ и выбирая то, численное значение которого удовлетворяет равенству

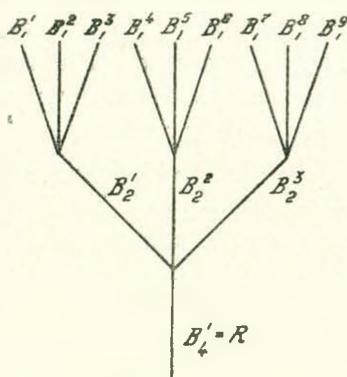


Рис. 1.

$$\Delta R_g = \sup (R_{\max} - R_g), \quad (11)$$

если ищется минимум, или

$$\Delta R_g = \sup (R_g - R_{\min}), \quad (12)$$

если ищется максимум. Здесь $R_{\max}$ и $R_{\min}$ предельно возможные наибольшее и наименьшее значения функции (4). В результате такого перебора мы находим наиболее оптимальную область $B_{g=a}^x$ определенного номера x , соответствующую данному $r_{g=a}^x$, и можем в дальнейшем проводить поиск уже внутри данной области, перебирая $r_{g=\frac{a}{2}}^x \in R_{g=\frac{a}{2}}$, а именно только те $r_{g=\frac{a}{2}}^x$, которые расположены внутри выбранной области $B_{g=a}^x$. В этом случае задача решена в математическом смысле, т. е. найден абсолютный экстремум. Если же элементы каких-либо областей B_g^x имеют численные значения, заключенные между численными значениями элементов каких-либо других областей B_g^x того же индекса g , структура оптимального поведения остается невыясненной и в решение задачи вносится элемент случай-

ности, так как рассматривая по одному элементу в каждой области и выбирая среди них „лучший“, мы не можем заведомо утверждать, что среди множества элементов тех областей, которые были нами отброшены, не будет самого оптимального. В этом случае возможно получение локального экстремума. Можно провести аналогию между рассмотренным методом и методом статистических испытаний (методом Монте-Карло), используемым при решении математических и физических задач с помощью многократных случайных испытаний. В данном случае источником случайных чисел являются подмножества R_g .

Перебор всех элементов R_g по вполне понятным причинам, связанным с необходимостью просмотра громадного числа комбинаций всевозможных численных значений $Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{g,i,h}$ для всех ГЭС одновременно, практически неосуществим. Поэтому поиск оптимальной точки подмножеств R_g должен производиться любым из известных в автоматике основных методов поиска экстремума функции многих переменных (Гаусса-Зейделя, градиентным, наискорейшего спуска). Практически процесс поиска экстремальной точки R_g , например, методом Гаусса-Зейделя осуществляется в области изменения некоторых обобщенных переменных $A_1^g, A_2^g, \dots, A_n^g$, каждая из которых ставится в соответствие паре кортежей $\overline{mQ}^{g,i,h}$ нечетного и четного номера h по порядку, начиная с $h=1$ для каждого i . Причем ни одна этих переменных не имеет смежных кортежей с любой другой. Для каждого g их число $j = i \cdot \frac{h}{2} = i \cdot \frac{F}{2} = i \cdot \frac{k}{2g}$. Изменение обобщенных переменных A_j^g производится с некоторым конечным шагом $\Delta Q^{g,i,h}$ изменение элементов $Q^{i,t}$ соответствующих им кортежей. Причем для каждой пары кортежей, соответствующей данной обобщенной переменной $\Delta Q^{i,g,h} + \Delta Q^{i,g,h+1} = 0$, в согласии с (10). Верхний и нижний пределы изменения $Q^{i,t}$ для любой пары кортежей, $Q_H^{i,h} = Q_B^{i,h+1}$ и $Q_H^{i,h} = Q_B^{i,h+1}$ определяются следующим образом.

Для фиксированного $g = \frac{a}{2}$ находятся средние значения расхо-

$$\text{дов воды } Q_{cp}^{g=\frac{a}{2}, i, h} = Q_{cp}^{g=\frac{a}{2}, i, h} = Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{g-a, i, h}$$

Подсчитываются величины

$$\Delta Q_B^{g=\frac{a}{2}, i, h} = Q_{\max}^i = Q_{cp}^{g=\frac{a}{2}, i, h}$$

$$\Delta Q_H^{g=\frac{a}{2}, i, h} = Q_{cp}^{g=\frac{a}{2}, i, h} = Q_{\min}^i$$

Из значений ΔQ_B и Q_H выбирается наименьшее, ко-

торое обозначается буквой (Q') $g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a$. И, окончательно, пределы Q $g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a$ и $(Q')_H$ $g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a$ определяются из выражений

$$Q_B^{g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a} = Q_{cp}^{g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a} + (Q')^{g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a}$$

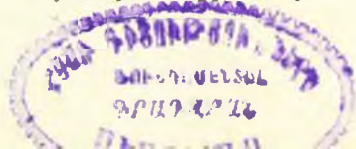
$$Q_H^{g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a} = Q_{cp}^{g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a} - (Q')^{g = \frac{a}{2}, i, h = 2h_a}$$

Фиксируя все A_i^g — кроме одной, будем рассматривать изменение каждой переменной с конечным шагом, осуществляя Б дискретных шагов, вычисляя соответствующие значения R_g и запоминая каждый раз наилучшее. После обхода всех переменных этот процесс (цикл) повторяется сначала, и так E раз в согласии с идеей метода Гаусса-Зейделя. Можно, не задавая числа E , сравнивать результаты расчета на двух смежных циклах и прекращать расчет, если разность между ними станет меньше наперед заданного числа ΔR . Текущий номер цикла будем обозначать строчной буквой e . Отметим, что решение данной задачи можно рассматривать и как решение нечетного числа. $N \equiv 2^n - 1$ сходных с ней задач, если для всех i ГЭС одновременно будем проводить расчет для каждой обобщенной переменной вне связи ее с другими переменными. Это означает, что найдя объемы сработки воды из водохранилищ ГЭС в первую и вторую половины рассматриваемого отрезка времени $[0, T]$, определяются в дальнейшем сработки воды в первую и вторую четверть, а затем третью и четвертую четверть того же отрезка времени и т. д. уже независимо друг от друга. Число шагов Б остается постоянным для любого значения g, i, h .

Однако, если желательно уменьшить число просматриваемых вариантов, следует задавать не число шагов Б, а оптимальную величину шага $\Delta Q_{\text{опт}}^{i, t}$ для $Q^{i, t}$. Тогда число шагов Б g, i, h для данных g, i и h или точнее для каждой пары $Q^{i, t} \in \overline{mQ}^{g, i, h}$ данного g и i нечетного и четного номера h определится делением отрезка $[Q_B^{g, i, h}, Q_H^{g, i, h}]$ на $\Delta Q_{\text{опт}}^{i, t}$ и округлением результата деления до ближайшего большего целого числа.

Гораздо более эффективным будет другой способ поиска экстремума функции R_g . Разобьем для каждого фиксированного i , отрезок $[Q_B^{g, i, h}, Q_H^{g, i, h}]$ на систему вложенных друг в друга вторичных отрезков делением первого последовательно на $\delta = 2, 4, 8, \dots, d$.

Рассматривая численные значения $Q^{i, t} \in \overline{mQ}^{g, i, h}$ в середине этих вторичных отрезков и, начиная с $\delta = 2$, будем отбирать отрезки, для которых численная величина R_g будет удовлетворять соотношениям (11) или (12). Причем каждую следующую пару вторичных отрезков



и соответствующие им значения $Q^{i,t} \in \overline{mQ}^{g,k,l,h}$ будем искать внутри ранее найденного и так до тех пор, пока δ не станет равным d . Такой перебор элементов R_g , назовем его условно Z -сканированием, обеспечивает более равномерный обзор этой гиперкривой, что очень важно, если последняя не является гладкой. Кроме того он дает значительное сокращение времени поиска. Если R_g не является гладкой, поиск экстремума может быть осуществлен также способом, предложенным в 8. На рис. 2 изображены кривые объемов сработки воды

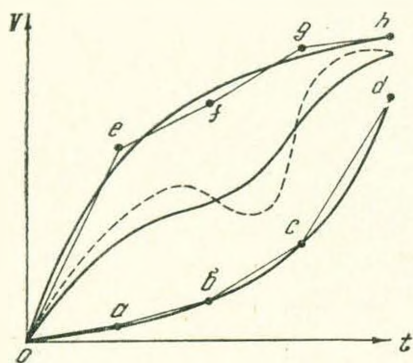


Рис. 2.

из водохранилища ГЭС в функции времени. Эти кривые представляют собой возрастающие от нуля функции (выпуклые или вогнутые), в общем случае с конечным числом точек перегиба. В случае насосно-аккумулирующих ГЭС они имеют конечное число экстремумов. При решении задачи эти кривые аппроксимируются сначала двумя линейными участками, затем четырьмя, восьмью и т. д. Отметим, что возможность нахождения абсолютного экстремума (выше она названа решением в математическом смысле) означает, что любой отрезок аппроксимирующей ломаной является хордой соответствующей искомой оптимальной кривой $V(t)^1$. На рис. 2 ломаная $oabcd$ соответствует абсолютному экстремуму, а ломаная $oefgh$ — локальному.

Для практической реализации изложенного выше метода при построении оптимальных режимов ниже приводятся два управляющих алгоритма, в функции которых входит формирование и выдача информации для расчета, сравнение результатов расчета и остановка процесса. Обзор элементов R_g производится в одном алгоритме методом Гаусса-Зейделя, в другом приемом Z -сканирования. Алгоритм для вычисления оптимизируемой функции R для каждой конкретной системы строится особо в соответствии с ее структурой и характером задачи, в то время как приводимые ниже управляющие алгоритмы не зависят от структуры системы и характера задачи. Принимаются известными величины $k, g = k, m, E, \Delta R, B = A \neq 0$, если задается число шагов, $B = A = 0$ и $\Delta Q_{\text{опт}}$, если задается оптимальная величина шага, или число d , если обзор элементов R_g производится приемом Z -сканирования. Также известны $Q_{\min}^i, Q_{\max}^i, Q_{\text{ср}}^{i,h-1} = Q_{\text{ср}}^{i,h-2} = Q_{\text{ср}}^{g,k,l,h-1}$ для $i = 1, \overline{m}, R_{np} = R_{\max}$, если в задаче ищется минимум, или $R_{np} = R_{\min}$, если в задаче ищется максимум. Характер и порядок операций управляющих алгоритмов следующий:

Обзор R_g методом Гаусса-ЗейделяОбзор R_g приемом Z -сканирования

1

2

- 1) $R_{np} \xrightarrow{\Phi} D_0$
- 2) $g: 2 \rightarrow g \downarrow^{35}$
- 3) $k: g \rightarrow F$
- 4) $Q_{cp}^{i,h} \rightarrow \overline{mQ}^{i,h} \quad i = \overline{1, m} \quad h = \overline{1, F}$
- 5) $0 \rightarrow e$
- 6) $e + 1 \rightarrow e \downarrow^{33}$
- 7) $0 \rightarrow i$
- 8) $i + 1 \rightarrow i \uparrow^{29}$
- 9) $0 \rightarrow h$
- 10) $h + 2 \rightarrow h \downarrow^{28}$
- 11) $0 \rightarrow \delta$
- 12) $\delta + 1 \rightarrow \delta \downarrow^{26}$
- 13) $\delta = 1 \uparrow^{21}$
- 14) $\overline{mQ}^{i,h-1} \rightarrow \alpha_1 \quad \overline{mQ}^{i,h} \rightarrow \alpha_2$
 $Q_{cp}^{i,h} - Q_{\min}^i \rightarrow \Delta Q_H$
 $Q_{\max}^i - Q_{cp}^{i,h} \rightarrow \Delta Q_B$
- 15) $\min \{ \Delta Q_B, \Delta Q_H \} \rightarrow Q'$
- 16) $Q_{cp}^{i,h} + Q' \rightarrow Q_B$
 $Q_{cp}^{i,h} - Q' \rightarrow Q_H$
- 17) $Q_B \rightarrow \overline{mQ}^{i,h-1} \quad Q_H \rightarrow \overline{mQ}^{i,h}$
- 18) $A = 0 \uparrow^{20}$
- 19) антье $[2 \cdot Q' : \Delta Q_{\text{отн}}] + 1 \rightarrow B$
- 20) $2 \cdot Q' : B \rightarrow \Delta Q \uparrow^{18}$
- 21) $\overline{mQ}^{i,h-1} - \Delta Q \rightarrow \overline{mQ}^{i,h-1} \downarrow^{23}$
 $\overline{mQ}^{i,h} + \Delta Q \rightarrow \overline{mQ}^{i,h}$
- 22) Вычисляется R
- 23) $R < \Phi \uparrow^{26}$ (поиск минимума R)
 $R > \Phi \uparrow^{26}$ (поиск максимума R)
- 24) *** $R \rightarrow \Phi$
 $P_T^t \rightarrow \gamma^t \quad t = \overline{1, k}$

- 1) $R_{np} \xrightarrow{\Phi} D_0$
- 2) $g: 2 \rightarrow g \downarrow^{35}$
- 3) $k: g \rightarrow F$
- 4) $Q_{cp}^{i,h} \rightarrow \overline{mQ}^{i,h} \quad i = \overline{1, m} \quad h = \overline{1, F}$
- 5) $0 \rightarrow e$
- 6) $e + 1 \rightarrow e \downarrow^{33}$
- 7) $0 \rightarrow i$
- 8) $i + 1 \rightarrow i \downarrow^{29}$
- 9) $0 \rightarrow h$
- 10) $h + 2 \rightarrow h \downarrow^{28}$
- 11) $1 \rightarrow \delta$
- 12) $\delta \cdot 2 \rightarrow \delta \downarrow^{27}$
- 13) $\delta = 2 \uparrow^{16}$
- 14) $\overline{mQ}^{i,h-1} \rightarrow \alpha_1 \quad \overline{mQ}^{i,h} \rightarrow \alpha_2$
 $Q_{cp}^{i,h} - Q_{\min}^i \rightarrow \Delta Q_H$
 $Q_{\max}^i - Q_{cp}^{i,h} \rightarrow \Delta Q_B$
 $\min \{ \Delta Q_B, \Delta Q_H \} \rightarrow Q'$
- 15) $Q_{cp}^{i,h-1} \rightarrow \overline{mQ}^{i,h-1}$
 $Q_{cp}^{i,h} \rightarrow \overline{mQ}^{i,h}$
- 16) $\overline{mQ}^{i,h-1} \rightarrow \tau_1 \quad \overline{mQ}^{i,h} \rightarrow \tau_2 \downarrow^{15}$
- 17) $Q' : \delta \rightarrow \Delta Q$
- 18) $-1 \rightarrow x \uparrow^{20}$
- 19) $+1 \rightarrow x \downarrow^{25}$
- 20) $\tau_1 | \Delta Q \cdot x \rightarrow \overline{mQ}^{i,h-1} \downarrow^{16}$
 $\tau_2 + \Delta Q \cdot x \rightarrow \overline{mQ}^{i,h} \downarrow$
- 21) Вычисляется R
- 22) $R < \Phi \uparrow^{25}$ (поиск минимума R)
 $R > \Phi \uparrow^{25}$ (поиск максимума R)
- 23)*** $R \rightarrow \Phi$
 $P_T^t \rightarrow \gamma^t \quad t = \overline{1, k}$
- 24) $\overline{mQ}^{i,h-1} \rightarrow \alpha_1 \quad \overline{mQ}^{i,h} \rightarrow \alpha_2$

*** P_T^t — тепловой станции в каждый из элементарных отрезков времени расчетного периода. P_T^t вычисляется вместе с вычислением R .

1	2
25) $\overline{mQ} ^{l, h-1} \rightarrow \alpha_1 \overline{mQ} ^{l, h} \rightarrow \alpha_2$	25) $x = 1 \quad \uparrow^{19} \quad \downarrow^{22}$
26) $\delta = B \quad \uparrow^{12} \quad \downarrow^{23}$	26) $\alpha_1 \rightarrow \overline{mQ} ^{l, h-1} \alpha_2 \rightarrow \overline{mQ} ^{l, h}$
27) $\alpha_1 \rightarrow \overline{mQ} ^{l, h-1} \alpha_2 \rightarrow \overline{mQ} ^{l, h}$	27) $\delta = d \quad \uparrow^{12}$
28) $h = F \quad \uparrow^{10}$	28) $h = F \quad \uparrow^{10}$
29) $i = m \quad \uparrow^8$	29) $i = m \quad \uparrow^8$
30) $\Phi \rightarrow D^e$	30) $\Phi \rightarrow D^e$
31) $D^{e-1} - D^e \rightarrow \rho$	31) $D^{e-1} - D^e \rightarrow \rho$
Печатать ρ	
32)**** $\rho > \Delta R \quad \uparrow^{34}$	32)**** $\rho > \Delta R \quad \uparrow^{34}$
33) $e = E \quad \uparrow^6$	33) $e = E \quad \uparrow^6$
34) $\overline{Qm} ^{i, h} \rightarrow Q_{cp}^{i, 2b-1} \quad i = \overline{1, m} \quad \downarrow^{32}$ $\searrow \quad Q_{cp}^{i, 2h}$	34) $\overline{mQ} ^{l, e} \rightarrow Q_{cp}^{l, 2h-1} \quad i = \overline{1, m} \quad \downarrow^{32}$ $\searrow \quad Q_{cp}^{l, 2h} \quad h = \overline{1, F}$
35) $g = 1 \quad \uparrow^2$	35) $g = 1 \quad \uparrow^2$
36) Печать $\overline{mQ} ^{l, h} \quad i = \overline{1, m} \quad h = \overline{1, F}$ Печать $\gamma^t \quad t = \overline{1, k}$	36) Печать $\overline{mQ} ^{l, h} \quad i = \overline{1, m} \quad h = \overline{1, F}$ Печать $\gamma^t \quad t = \overline{1, k}$

**** Если мы желаем осуществить фиксированное число циклов расчета E , то принимаем $\Delta R = 0$.

Институт энергетики
АН Армянской ССР

Поступило 3.V 1963

Վ. Կ. ԲԵԳԼՅԱՆՈՎ

ՀԻՒՐՈԿԱՅԱՆՆԵՐ ՈՒՆԵՅՈՂ ԷՆԵՐԳՈՍԻՍՏՆԵՐՈՒՄ ԳՆՆԵՐԱՅՎԱՄ
ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼ ԲԱՇԽՈՒՄԸ ԴԻՆԱՄԻԿ ՓՆՏՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Ա. Կ. Կ. Կ. Կ.

Հողավածը վերաբերվում է առաջադրված խնդրի լուծմանը, որտեղ օգտագործվող դինամիկական ծրագրման սկզբունքները համատեղվում են էքստրեմալ խնդիրների լուծման փնտրման մեթոդների հետ, որը դիտարկվում է կիրառական տեսությամբ և ավտոմատիկայով:

Դիտլած խնդրի լուծման համար առաջարկվում է դինամիկական փնտրման մեթոդ, որի համար որպես ելակետ ընդունվում է հնարավորությոն՝ փնտրելի ֆունկցիաները ներկայացնել որպես ժամանակի միջակայքում հաջորդաբար կրիստոլ ուղիղներ:

Տրված է մեթոդի տեսական-բազմության մեկնարանումը, որը պարզորեն ներկայացնում է փնտրման պրոցեսի բնույթը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Glimm A. F., Kirchmayer L. K. Economic Operation Variable-Head Hydroelectric Plants. Power Apparatus and Systems. № 39, 1958.
2. Бегляров В. Г. Оптимальные режимы энергосистем. Известия АН АрмССР, сер. ТН, т. XV, № 1, 1962.
3. Theilsieffe K. Ein Beitrag zur Theorie der wirtschaftlichen Ausnutzung großer speicherseen sur Energieerzeugung. Elektrotechnische Zeitschrift, Ausgabe A, 17, H. Berlin, 14, August, 1961.
4. Беллман Р. Теория динамического планирования. Современная математика для инженеров. Л.—М., 1958.
5. Фельдбаум А. А. Вычислительные устройства в автоматических системах. М., 1959.
6. Демидович Б. П., Маррон И. А. Основы вычислительной математики. М., 1960.
7. Моррей Ч. Б. Нелинейные методы. Современная математика для инженеров. М.—Л., 1958.
8. Бочаров И. Н., Фельдбаум А. А. Автоматический оптимизатор для поиска минимального из нескольких минимумов. Журн. "Автоматика и телемеханика", т. XXIII, № 3, 1962.

ЭНЕРГЕТИКА

Г. А. АЙРАПЕТЯН

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ НЕСИНХРОННЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ
ПОВТОРНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

При исследовании режимов энергосистем, связанных с несинхронными автоматическими повторными включениями (НАПВ) межсистемных электропередач в целом ряде случаев возникает необходимость представления системы схемой замещения с несколькими источниками э. д. с. и сохранением основных узлов нагрузок. В большинстве случаев несинхронные процессы в объединенных системах не могут быть сведены к работе двух станций и тем более к работе станций на шины бесконечной мощности. Оказывается необходимым выявить и оценить те факторы, которые в объединенных энергосистемах влияют на характер происходящих процессов. В чем же заключаются главные отличия процессов в объединенных энергосистемах от процессов при аналогичных исследованиях работы отдельных станций с мощными системами? Необходимо отметить, во-первых, возможность появления трех и более частот в процессе ресинхронизации, т. е. другими словами в любой из двух несинхронно вращающихся частях системы может иметь место выход из синхронизма части генераторов; во-вторых, малые величины скольжения и изменения скоростей генераторов при выпадении из синхронизма и при НАПВ, в-третьих, значительное влияние на ход процесса поведения нагрузок, потерь активной мощности от токов несинхронного включения и к.з. и др.

Данная работа посвящается рассмотрению методики определения структуры расчетных схем замещения и, связанным с этим, нахождением критериев допустимости несинхронного АПВ.

Выбор структуры расчетных схем замещения

В объединенных системах обычно сопротивления межсистемных электропередач оказываются соизмеримыми с сопротивлениями ветвей схемы замещения отдельных систем, входящих в объединение. Это приводит к тому, что часть станций систем активно участвуют в динамических процессах. Однако, степень участия отдельных станций неодинакова. Одной из задач при эквивалентировании сложных систем

* Работа выполнялась под руководством проф. Г. Т. Адонца.

является выявление групп станций, которые в исследуемом процессе работают синхронно, что дает возможность объединения их в одну эквивалентную станцию.

Заметим, что представление объединенных систем двумя станциями, широко применяемая в исследованиях для упрощения расчета, во многих случаях значительно искажает результаты расчета и приводит к ошибочным выводам. В ряде случаев, приемлемым является представление системы тремя станциями.

В Институте энергетики АН Армянской ССР с помощью модели сетей переменного тока (МСПТ)[1] и на вычислительных машинах непрерывного действия (ВМНД) были проведены исследования динамической устойчивости и несинхронного автоматического повторного включения межсистемных электропередач Закавказской объединенной энергосистемы, путем представления схемы замещения системы различным количеством станций, что позволило прийти к некоторым выводам.

Отметим некоторые положения теории параллельной работы синхронных машин. Известно следующее уравнение [2] равновесия моментов на валу ротора синхронной машины:

$$T \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - \Delta P_p - P_c - P_{ac}, \quad (1)$$

где P_T — вращающаяся мощность турбины, до изменения скорости;

ΔP_p — изменение вращающейся мощности турбины под действием регулятора скорости;

P_c — мощность, обусловленная током обмоток возбуждения и реакционным моментом;

P_{ac} — асинхронная мощность, обусловленная действием успокоительных обмоток;

T — постоянная инерции агрегата.

Входящая в уравнение (1) мощность P_c для случая системы, из трех генераторов, определяется следующим выражением:

$$P_m = E_m^2 y_{mm} \cos \varphi_{mm} + E_m E_n y_{mn} \cos (\delta_{mn} + \varphi_{mn}) + E_m E_l y_{ml} \cos (\delta_{ml} + \varphi_{ml}), \quad (m, n, l = 1, 2, 3); \quad (2)$$

где E — э.д.с. генераторов функция времени, определяемая переходными процессами в роторе и статоре машины.

Параметры y и φ , характеризующие собственные и взаимные сопротивления, оказываются зависимыми также от переходных процессов в нагрузках [3].

Для явнополюсной машины аналогичные выражения составляются для осей d и q . Однако, в ряде случаев для технических расчетов, в выражении (2) оказывается достаточным величины E , y и φ считать неизменными и ограничиться замещением машины в одной оси d . Это осуществляется путем введения понятия э.д.с. за переходным сопротивлением E' и сохранения этой величины, в динамических

процессах, неизменной, чем приближенно учитываются переходные процессы в роторе и работа регуляторов напряжения. Пренебрегая также активным сопротивлением статора, можно выразить выдаваемую мощность, как синусоидальную функцию от угла δ .

Для выявления физического смысла членов этого равенства приведем исследуемую схему замещения системы из пяти генераторов к виду рис. 1. Эта схема эквивалента исходной, если принять:

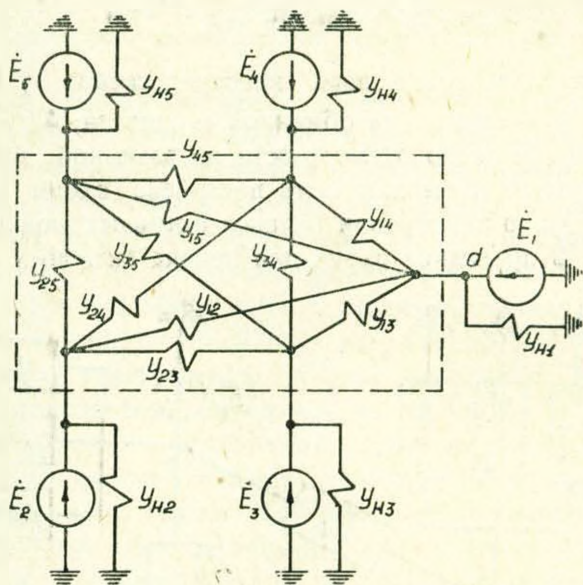


Рис. 1.

$$Y_{H1} = Y_{11} - Y_{12} - Y_{13} - Y_{14} - Y_{15};$$

$$Y_{H2} = Y_{22} - Y_{21} - Y_{23} - Y_{24} - Y_{25}, \text{ и т. д.}$$

где $Y_{11}, Y_{22}, Y_{12}, Y_{13}, \dots$ — собственные и взаимные проводимости исходной схемы. Тогда выражение мощности для случая работы двух генераторов записывается в следующем виде:

$$P_1 = E_1'^2 g_{H1} + E_1' E_2' g_{12} + E_1' E_2' b_{12} \sin \delta_{12} - E_1' E_2' g_{12} \cos \delta_{12}, \quad (3)$$

где g и b — соответственно активные и реактивные проводимости. Аналогично получаются выражения для схемы с тремя генераторами. В правой части выражения (3) первый член представляет из себя активную мощность, расходуемую на нагрузку, включенную к источникам э.д.с., третий член — обменную активную мощность, как функцию $\sin \delta$, а алгебраическая сумма второго и четвертого членов — приблизительно половину активных потерь во взаимном сопротивлении. Последнее видно из следующего: потери активной мощности во взаимном сопротивлении могут быть определены, как разность мощностей в начале и в конце взаимного сопротивления. Потери мощности во взаимном сопротивлении будут равны:

$$\Delta P = P_H - P_k = (E_1'^2 + E_2'^2) g_{12} - 2 E_1' E_2' g_{12} \cos \delta_{12}. \quad (4)$$

Действительно, из сопоставления (3) и (4) видно, что сумма второго и четвертого членов приблизительно равна половине потерь. Вторая половина потерь покрывается второй станцией.

Окончательно выражение для мощности станции без учета успокоительных обмоток можно представить так:

$$P_c = P_{H1} + P_{\max} \sin \delta_{12} + \frac{\Delta P_{12}}{2}, \quad (6)$$

где P_{H1} — нагрузка, включенная непосредственно у источника э.д.с. $P_{\max} = E_1' E_2' b_{12}$ — амплитуда обменной мощности; $\Delta P = 2 E_{cp}'^2 g_{12} (1 - \cos \delta_{12})$ — потери активной мощности во взаимной проводимости Y_{12} . Согласно формуле (6) может быть построена схема замещения, действительная при рассмотрении баланса активных мощностей.

На рис. 2 приведена схема для потока активных мощностей, для

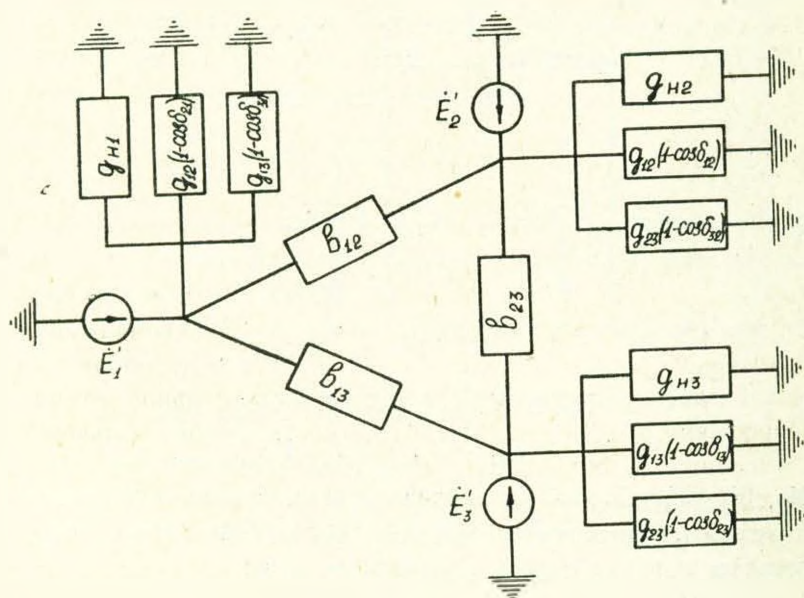


Рис. 2.

случая трех эквивалентных генераторов. Схема в таком виде удобна для нахождения критерия допустимости НАПВ.

Условие, исключающее появление третьей частоты в энергосистеме при ресинхронизации

Принято процесс ресинхронизации разбивать на несколько интервалов, каждый из которых характеризуется различным влиянием приложенных к ротору моментов. Так, на процесс ресинхронизации до подхода к подсинхронной скорости большое влияние оказывают

асинхронный момент и момент от действия регуляторов скорости, зависящие главным образом от скольжения и абсолютной скорости. В период же вхождения в синхронизм влияние этих факторов уменьшается.

В [4] описаны практические методы расчета времени и числа циклов до момента уменьшения скольжения до нуля с учетом указанных факторов. Такие процессы всегда могут быть исследованы по двухмашинной схеме замещения. Для такого исследования широко применяются аналоговые вычислительные машины или же аналитические расчеты.

Однако эти методы оказываются недостаточно приемлемыми для исследования процесса втягивания в синхронизм. Процесс ресинхронизации может оказаться неуспешным из-за возможности появления сильных синхронных качаний, внутри несинхронно вращающихся частей системы, что может привести к выходу из синхронизма других машин, помимо двух несинхронно вращающихся частей системы. Неуспешная ресинхронизация в этих случаях объясняется периодическими переходами кинетической энергии несинхронно вращающихся частей системы в кинетическую энергию, связанную с синхронными качаниями и несинхронным ходом других машин и обратно. Такое явление мешает погасить указанную энергию регулирующими устройствами, что приводит к затягиванию процесса ресинхронизации.

Таким образом, возникает необходимость исследования процесса не по двухмашинной схеме замещения, а по схеме с большим количеством станций. Увеличение числа станций очень осложняет расчеты на ВМНД, так как требует одновременного применения большого количества таких машин. Представляется более целесообразным применение для таких расчетов МСПТ в сочетании с одной-двумя машинами непрерывного действия. Необходимость учета большого количества генераторов возникает при исследовании процесса подхода к нулевому среднему скольжению. В этот период возможен выход из синхронизма других генераторов. Малые скольжения обуславливают большое влияние на процесс следующих факторов: взаимный момент; потери активной мощности; уменьшение потребляемой мощности из-за снижения напряжения на нагрузках. Влияние же асинхронного момента и регулирования скорости на процесс существенно не влияют. Рассмотрим схему из трех эквивалентных генераторов (рис. 2). Пусть требуется выяснить при каких условиях Γ_2 может выйти из синхронизма по отношению к Γ_3 , имея в виду, что Γ_1 вращается несинхронно относительно Γ_3 .

Рассмотрим 4 возможных случая несинхронного хода трехгенераторной системы:

1. Γ_1 вращается несинхронно с положительным скольжением ($S_1 > 0$) по отношению к Γ_2 и Γ_3 (т. е. Γ_1 ускоряется);
2. То же, но с отрицательным скольжением ($S_1 < 0$) т. е. Γ_1 замедляется;

3. Γ_1 и Γ_2 вращаются несинхронно (с $S > 0$) по отношению к Γ_3 , т. е. Γ_1 и Γ_2 ускоряются;

4. То же, что и п. 3, но с отрицательным скольжением ($S < 0$), т. е. Γ_1 и Γ_2 тормозятся.

Исследуем первый и второй случай. Заметим, что для того, чтобы Γ_2 вышел из синхронизма по отношению к Γ_3 , необходима определенная энергия, которая может быть передана Γ_2 только от Γ_1 , обладающего излишней энергией ($S > 0$). Односторонняя передача энергии может продолжаться до момента, когда вектора э.д.с. Γ_1 , с одной стороны, Γ_2 и Γ_3 с другой, окажутся в противофазе т. е. в неустойчивом равновесии. Случай, когда с достижением неустойчивого равновесия кинетическая энергия, полученная при возмущении, подходит к нулю, примем в качестве наиболее тяжелого случая с точки зрения выпадания из синхронизма других машин.

В данной работе рассматривается именно этот случай. Перед тем, как перейти к рассмотрению процесса выхода из синхронизма, примем следующие два условия: во-первых, генератором Γ_3 будем замещать мощную систему, момент инерции которой может быть принят равным бесконечности, т. е. $T_3 = \infty$; во-вторых, что во время движения генератора Γ_1 , в связи с медленным нарастанием скорости Γ_2 , последний, в начале не успевает сколько-либо заметно изменить свое положение по углу, т. е. угол δ_{023} остается неизменным; движение Γ_2 начинается в то время, когда Γ_1 уже медленно подходит к положению неустойчивого равновесия, истратив всю излишнюю энергию. Аналогично и при движении Γ_2 , Γ_1 не меняет своего положения.

Приняв это допущение, процесс как бы делим на два этапа: в первом этапе кинетическая энергия несинхронно вращающегося генератора Γ_1 переходит в потенциальную энергию системы: во втором этапе, потенциальная энергия системы переходит в кинетическую энергию движения Γ_2 .

Считая рассматриваемый поворот ротора Γ_1 последним перед вхождением в синхронизм, полагаем, что Γ_1 , обладая еще запасом энергии, может задержаться некоторое время в положении неустойчивого равновесия к Γ_3 . Это время может оказаться достаточным, чтобы Γ_2 сам подошел к положению неустойчивого равновесия относительно Γ_2 и Γ_3 .

Происходит как бы захват генератором Γ_1 генератора Γ_2 . Возможен случай, когда на Γ_2 , при неустойчивом положении равновесия Γ_1 , будет действовать момент против направления движения Γ_1 , что означает невозможность захвата, т. е. выхода из синхронизма Γ_2 . Таким образом, для нахождения условия выхода из синхронизма Γ_2 при несинхронном движении Γ_1 , необходимо определить угол δ'_{13} , соответствующий положению неустойчивого равновесия Γ_1 относительно Γ_2 и Γ_3 при неизменном угле δ_{23} , равном δ_{023} ; затем определить знак момента, действующего на Γ_2 , при неизменном угле между Γ_1 и Γ_3 , равном δ'_{13} . Если этот момент действует в том же направлении, в кото-

ром движется генератор Γ_1 , то необходимо дальнейшее исследование для выяснения возможности выхода из синхронизма Γ_2 , если же в противоположном, то выход из синхронизма Γ_2 исключается. Таким образом первым достаточным условием невозможности выхода из синхронизма Γ_2 будет:

$$\begin{aligned} P_{20} > 0 \text{ при } S_1 < 0; \\ P_{20} < 0 \text{ при } S_1 > 0. \end{aligned} \quad (10)$$

При несоблюдении этого условия, необходимо обратиться ко второму условию. Для нахождения его необходимо, приняв угол δ_{13} неизменным, определить угол δ_{23} , соответствующий положению неустойчивого равновесия Γ_2 относительно Γ_3 и Γ_1 ; далее выяснить достаточно ли запасенная в системе потенциальная энергия для обеспечения движения генератора Γ_2 от δ_{023} до δ_{23} , иначе говоря необходимо определить знак энергии движения Γ_2 . Несовпадение знака энергии Γ_2 со знаком момента, действующего на Γ_2 в положении, соответствующем углу δ_{023} , будет означать недостаток энергии для выхода из синхронизма, а совпадение — о излишке энергии, т. е. о возможности выхода из синхронизма.

Таким образом, вторым достаточным условием, исключающим выход из синхронизма Γ_2 будет условие:

$$\text{Sgn } \gamma_2 \neq \text{Sgn } P_{20}. \quad (11)$$

Несоблюдение условия (11) означает, что выход из синхронизма Γ_2 возможен, но при неблагоприятном характере протекания процесса. Здесь имеется ввиду, как угол несинхронного включения Γ_1 , так и угол, при котором скольжение становится равным нулю. Таким образом задача сводится к определению углов δ_{13} , δ_{23} , а также знака энергии γ_2 и момента P_{20} . Расчетные формулы для определения указанных величин будут даны в следующей статье автора по затронутому вопросу.

Институт энергетики
АН Армянской ССР

Поступило 22.VI.1963

Դ. Ա. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱՆԱԴՐՈՐՄԱՆ ՈՉ ՄԻՆԻՐՈՆ ՄԻՋՄԻՍՏԵՄԱՅԻՆ ԳԾԵՐԻ
ԱՎՏՈՄԱՏ ԿՐԿԵԱԿԻ ՄԻԱՅՄԱՆ ՈՐՈՇ ՀԱՐՅԵՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Էլեկտրահաղորդման գծերում ոչ սինխրոն ալտոմատ կրկնակի միացման (ՈԱԿՄ) հնարավորությունը պարզելու համար անհրաժեշտ է լինում ուսումնասիրել ուսինխրոնիզացիայի պրոցեսը: Այդ ուղղությամբ կատարված են մի շարք աշխատանքներ այնպիսի դեպքի համար, երբ էներգոսխտեմը բաղկացած է 2 համարժեք գեներատորային կայաններից: Նման դեպքը հնարավորություն չի

տալիս վերջնական եզրակացություն կատարել ՌԱԿՄ-ի կիրառման հնարավորության վերաբերյալ, քանի որ էներգոսխտեմում ռեսինխրոնիզացիայի պրոցեսում հնարավոր է սինխրոնիզմի խախտում մյուս մեքենաների կողմից:

Սույն աշխատանքը նվիրված է միացյալ էներգոսխտեմների ՌԱԿՄ-ի հետադոմանը, երբ սխտեմը ներկայացված է 3 համարժեք գեներատորներով:

Հոդվածում մշակված են կրիտերիաներ, որոնք բացատրում են մյուս մեքենաների սինխրոնիզմից դուրս գալու հնարավորությունը: Ապացուցված է, որ այդ կրիտերիաները միաժամանակ հանդիսանում են ՌԱԿՄ-ի թուլատրելիության կրիտերիաներից մեկը: Այդ կրիտերիաների օգտագործումը պրակտիկայում հնարավորություն է տալիս նախնական եզրակացության գալ, թե ինչպիսի հաղորդման հզորությունների դեպքում տվյալ էլեկտրահաղորդման գծում ՌԱԿՄ-ի կիրառումը ապահովում է հաջող ռեսինխրոնիզացիա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адонц Г. Т., Акобджанян Г. Д., Гамбуриян К. А., Мартиросян М. А. Модель сетей переменного тока АН Армянской ССР. Известия АН Армянской ССР, № 6, 1961.
2. Лебедев С. А., Жданов П. С. Устойчивость параллельной работы электрических систем, Энергоиздат, М., 1934.
3. Адонц Г. Т. Теория многополюсников. Изд. АН Армянской ССР (находится в печати).
4. Информационный материал. Ресинхронизация в энергосистемах после несинхронного АПВ. Всесоюзный НИИ электроэнергетики. М., 1959.

В. С. ХАЧАТРЯН

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В существующих формулах потерь активной мощности в высоковольтных сетях фигурируют так называемые сетевые коэффициенты, или коэффициенты формулы потерь, число которых в общем случае зависит как от числа электрических станций, так и от числа нагрузочных подстанций [1—5]. С целью сокращения числа этих коэффициентов принимается ряд допущений, в том числе замена отдельных нагрузок суммарной нагрузкой системы. В случае такого допущения число сетевых коэффициентов оказывается зависящим только от числа электрических станций. При этом принимается, что каждый ток индивидуальной нагрузки является фиксированной долей тока суммарной нагрузки [6—8]. В [1] дана формула для расчета потерь с использованием наименьшего числа сетевых коэффициентов. Данное предположение [6—8] очень ограничивает применение формулы потерь и в некоторых случаях приводит к грубым ошибкам. Исследование этих коэффициентов показало, что они не являются постоянными и изменяются при изменении режима рассматриваемой энергосистемы [9].

Целью настоящей статьи является разработка такого подхода к построению формулы потерь, который предполагает непрерывный учет изменения мощности в нагрузочных узлах. Непрерывный учет изменения нагрузки при определении коэффициентов формулы потерь повышает точность и строгость формулы потерь.

Формула потерь активной мощности

Для вывода формулы потерь мощности в сетях наиболее удобным является представление схемы замещения системы в форме многополюсника, на входных зажимах которого действуют эквивалентные источники э.д.с. системы, а на выходных—эквивалентные нагрузки, как показано на рис. 1 [1].

После выбора базисного узла, энергосистема характеризуется следующим уравнением, записанным в матричной форме.

$$\vec{U} = \vec{U}_i - \vec{U}_b = Z\vec{I}, \quad (1)$$

где $\vec{U}$ —многомерный вектор комплексных напряжений в узлах энергосистемы относительно базисного напряжения $\vec{U}_b = U_b$;

- $\vec{I}$ — многомерный вектор комплексных токов для всех узлов энергосистемы, за исключением тока базисного узла;
- Z — неособая, квадратичная симметричная матрица комплексных сопротивлений узлов энергосистемы относительно базисного узла.

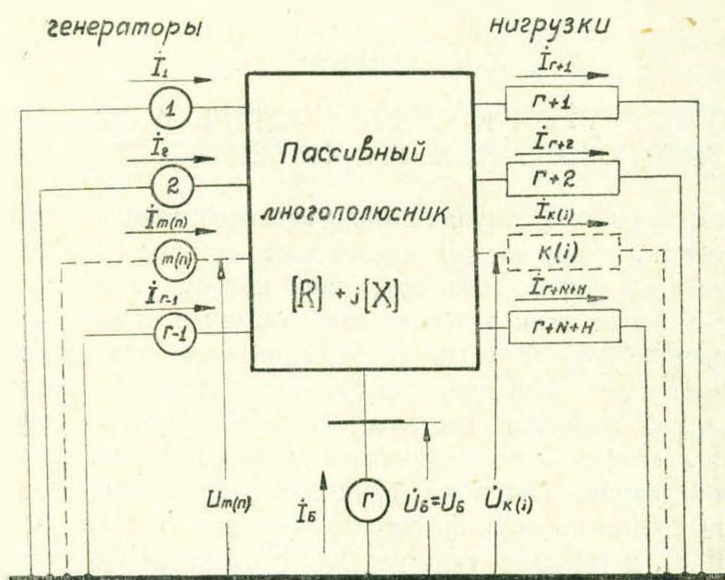


Рис. 1. Изображение энергосистемы в виде многополюсника.

В дальнейшем изложении принимается следующая система индексов: $m, n = 1, 2, \dots, \Gamma$ — индексы станционных узлов схемы замещения, Γ — число электрических станций.

В состав этих индексов включаются и индексы узлов синхронных компенсаторов, которые рассматриваются как электрические станции с нулевой активной мощностью.

$k, j = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N, \Gamma + N + 1, \dots, \Gamma + N + H$ — индексы нагрузочных узлов,

$N + H$ — число нагрузок.

Индексы нагрузочных узлов приняты двух типов:

$k, j = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \dots, \Gamma + N$ — индексы тех нагрузочных узлов, в которых мощности остаются постоянными по времени;

N — число соответствующих узлов;

$k, j = \Gamma + N + 1, \dots, \Gamma + N + H$ — индексы тех нагрузочных узлов, в которых мощности изменяются в течение времени;

H — число данных узлов.

В качестве базисного узла выбрана электрическая станция с индексом Б. В соответствии с принятой системой индексов, многомерный вектор $\vec{U}$ может быть выражен в виде двух составляющих многомерных

векторов: вектора $\dot{U}_{мБ}$ — для станционных узлов и $\dot{U}_{кБ}$ — для нагрузочных узлов:

$$\dot{U} = (\dot{U}_{мБ}, \dot{U}_{кБ}) = (\dot{U}_м - \dot{U}_Б, \dot{U}_к - \dot{U}_Б). \quad (2)$$

Одновременно матрицу Z делим на четыре блока в соответствии с многомерными векторами токов стационарных и нагрузочных узлов. Тогда вместо (1) получаем:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_{мБ} \\ \dot{U}_{кБ} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{mn} & Z_{mk} \\ Z_{ja} & Z_{jk} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{I}_k \end{vmatrix}. \quad (3)$$

После разделения станционных и нагрузочных узлов производим эквивалентирование всех нагрузок в одну суммарную, т. е. вместо отдельных нагрузочных узлов рассматриваем один узел эквивалентной

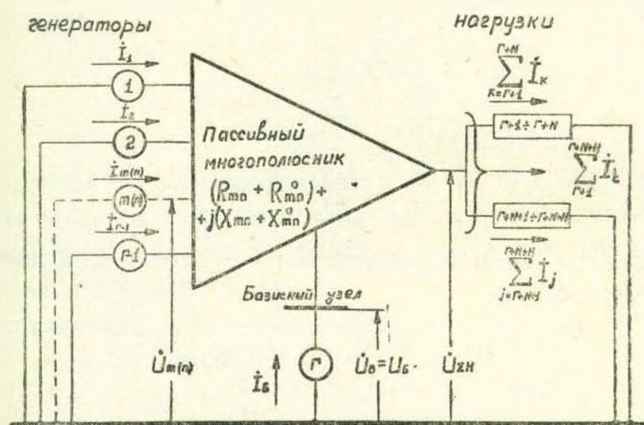


Рис. 2. Изображение энергосистемы с двумя суммарными нагрузочными узлами.

нагрузки (рис. 2). Следует отметить, что в отличие от существующих методов эквивалентирование отдельных нагрузок в одну при решении такого рода задач [6—8] здесь производится по совершенно иной методике, которая обеспечивает достаточную точность и строгость.

Матричное уравнение, характеризующее преобразованную систему, будет иметь следующий вид:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_{мБ} \\ \dot{U}_{кБ} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_{mn} & Z_{m, \Sigma H} \\ Z_{\Sigma H, n} & Z_{\Sigma H, \Sigma H} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{I}_n \\ \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Здесь $\dot{U}_{кБ}$; $\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k$ — комплексные напряжения и ток для узла эк-

вивалентной нагрузки;

$Z_{m, \Sigma H}$, $Z_{\Sigma H, n}$ — взаимные комплексные сопротивления между узлами станций и эквивалентной нагрузкой;

$Z_{\Sigma H, \Sigma H}$ — собственное комплексное сопротивление узла эквивалентной нагрузки.

Значения этих сопротивлений определяются из условия инвариантного преобразования схемы замещения рассматриваемой энергосистемы. Величина $Z_{m, \Sigma H}$ определяется из условия

$$\sum_{m=1}^{\Gamma} (P_m + jQ_m) = \sum_{m=1}^{\Gamma} (P'_m + jQ'_m). \quad (5)$$

Условие (5) учитывает инвариантность генерируемых мощностей до (P_m, Q_m) и после (P'_m, Q'_m) преобразования схемы и в раскрытом виде будет

$$\dot{I}_m \left(\sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{I}_n Z_{nm} + \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k Z_{mk} \right) = \dot{I}_m \left(\sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{I}_n Z_{nm} + \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k Z_{m, \Sigma H} \right).$$

Откуда

$$Z_{m, \Sigma H} = \frac{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k Z_{mk} \dot{I}_j}{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k \dot{I}_j}. \quad (6)$$

Значения $Z_{\Sigma H, n}$ и $Z_{\Sigma H, \Sigma H}$ определяются из условия инвариантности нагрузочных мощностей:

$$\sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} (P_j + jQ_j) = P_{\Sigma H} + jQ_{\Sigma H}, \quad (7)$$

где $P_{\Sigma H}$, $Q_{\Sigma H}$ — активная и реактивная мощности эквивалентной нагрузки.

Откуда для каждого $n = 1, 2, 3, \dots, \Gamma$, находим

$$Z_{\Sigma H, n} = \frac{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k Z_{jn} \dot{I}_j}{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k \dot{I}_j}; \quad (8)$$

$$Z_{\Sigma H, \Sigma H} = \frac{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k Z_{kj} \dot{I}_j}{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k \dot{I}_j}. \quad (9)$$

Нетрудно заметить, что сопротивления (6), (8) и (9) зависят только от нагрузочных токов. Следовательно, эти сопротивления необходимо вычислять для каждого режима.

Таким образом, для каждого режима можно однозначно определить величины сопротивлений (6), (8) и (9), после чего, зная токи в станционных узлах по (4) можно определить напряжения станционных узлов и эквивалентного нагрузочного узла:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{m\delta} &= \sum_{n=1}^{\Gamma-1} Z_{mn} I_n + Z_{m, \Sigma H} \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k; \\ \dot{U}_{\Sigma H, \delta} &= \sum_{n=1}^{\Gamma-1} Z_{\Sigma H, n} I_n + Z_{\Sigma H, \Sigma H} \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Общие потери в сетях при этом будут:

$$P_n + jQ_n = \Delta \dot{U}_{m\Sigma H} \cdot \dot{I}_m, \quad (11)$$

где

$$\Delta \dot{U}_{m, \Sigma H} = \dot{U}_{m\delta} - \dot{U}_{\Sigma H, \delta} = \dot{U}_m - \dot{U}_{\Sigma H}. \quad (12)$$

Учитывая, что сумма токов, входящих в систему (с учетом тока базисного узла) и выходящих из нее, равно нулю, получим

$$P_n + jQ_n = \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} I_n Z_{m-n} \dot{I}_m, \quad (13)$$

где

$$Z_{m-n} = Z_{mn} + Z_{mn}^0. \quad (14)$$

В (13) индексы m и n равноправны и пробегают все значения от 1 до Γ , включая и индекс базисного узла. Но следует отметить, что в матрице Z_{mn} элементы строки и столбца, соответствующие номеру базисного узла, равняются нулю.

Сопротивление Z_{mn}^0 определяется по формуле:

$$Z_{mn}^0 = \frac{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} I_k (R_{kj} - R_{mk} - R_{jn}) \cdot \dot{I}_j}{\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \dot{I}_k \dot{I}_j}. \quad (15)$$

Потери активной мощности находим из (13):

$$P_n = \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} [(I_{am} I_{an} + I_{pm} I_{pn}) R_{m-n}^0 + (I_{am} I_{pn} - I_{pm} I_{an}) X_{m-n}^0]. \quad (16)$$

Формула (16) дает возможность определить потери активной мощности, когда известны активные и реактивные составляющие токов $(I_{am}, I_{an}, I_{pm}, I_{pn})$ во всех узлах данной системы.

В формуле (16)

$$R_{m-n}^0 = R_{mn} + \alpha \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} [(I_{ak} I_{aj} + I_{pk} I_{pj}) (R_{kj} - R_{mk} - R_{jn})]; \quad (17)$$

$$X_{m-n}^0 = \alpha \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} [(I_{ak} I_{pj} - I_{pk} I_{aj}) (R_{kn} - R_{mk})]; \quad (18)$$

где

$$\alpha = 1 : \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N+H} (I_{ak} I_{aj} + I_{pk} I_{pj}); \quad (19)$$

Для определения переменных сопротивлений нужно знать активные и реактивные составляющие токов в нагрузочных узлах. Для определения этих токов необходимо в свою очередь знать активные и реактивные мощности и комплексные напряжения в соответствующих узлах.

Определение значений сопротивлений R_{m-n}^0 и X_{m-n}^0 для каждого режима связано с громоздкими вычислениями. Поэтому, для сокращения числа вычислительных операций производится следующее. В выражениях сопротивлений, определяющихся по формулам (17) и (18), отделяются два типа узла. Первый тип узлов включает в себя узлы тех нагрузок, которые работают в постоянном режиме, т. е. мощности этих узлов в течение времени не изменяются (индексы $\Gamma+1, \Gamma+2, \dots, \Gamma+N$). Второй тип узлов включает в себя узлы тех нагрузок, мощности которых изменяются в течение времени — индексы $(\Gamma+N+1, \Gamma+N+2, \dots, \Gamma+N+H)$.

Отметим, что в состав узлов первого типа можно включить и станционные узлы, которые работают в базисе графика нагрузки, так как мощности их поддерживаются постоянными. Это в свою очередь также приводит к уменьшению числа сетевых коэффициентов. В соответствии с этим разделением и принятой системой индексов сопротивления определяются следующими формулами:

$$R_{m-n}^0 = R_{mn} + \alpha \left\{ \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+N+1}^{\Gamma+H+H} (I_{ak} I_{aj} + I_{pk} I_{pj}) (R_{kj} - R_{mk} - R_{jn}) + \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} [I_{ak} (V_{ak}^{mn})_j + I_{pk} (V_{pk}^{mn})_l] + \Pi_1^{mn} \right\};$$

$$X_{m-n}^0 = \alpha \left\{ \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} (I_{ak} I_{pj} - I_{pk} I_{aj}) (R_{nk} - R_{mk}) + \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} [I_{ak} (V_{pk}^{(mn)})_l + I_{pk} (V_{ak}^{(mn)})_j] + \Pi_2^{mn} \right\}, \quad (20)$$

где

$$\alpha = 1: \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} (I_{ak} I_{aj} + I_{pk} I_{pj}) + \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} (I_{ak} V_{aj} + I_{pk} V_{pj}) + \Pi_3. \quad (21)$$

$$\Pi_1^{mn} = \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} [(I_{ak} I_{aj} + I_{pk} I_{pj}) (R_{kj} - R_{mk} - R_{jn})];$$

$$\Pi_2^{mn} = \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} [(I_{ak} I_{pj} - I_{pk} I_{aj}) (R_{nk} - R_{mk})];$$

$$\Pi_3 = \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} (I_{ak} I_{aj} + I_{pk} I_{pj}). \quad (22)$$

$$\begin{aligned} (V_{ak}^{mn})_j &= \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} I_{aj} (2R_{kj} - R_{mk} - R_n - R_{mj} - R_{nj}); \\ (V_{pk}^{mn})_j &= \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} I_{pj} (2R_{kj} - R_{mk} - R_{nk} - R_{mj} - R_{nj}); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} (V_{ak}^{(mn)})_j &= \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} I_{aj} (R_{nj} - R_{mj} - R_{nk} + R_{mk}); \\ (V_{pk}^{(mn)})_j &= \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} I_{pj} (R_{nk} - R_{mk} - R_{nj} + R_{mj}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} V_{aj} &= 2 \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} I_{aj}; \\ V_{pj} &= 3 \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} I_{pj}. \end{aligned} \quad (25)$$

Величины, определяющиеся по формулам (22)–(25), являются постоянными слагающими, и их необходимо вычислять для рассматриваемой энергосистемы только один раз. Переменные слагающие необходимо определять для каждого режима.

Представление формулы потерь через мощности

Практическое использование формулы потерь, выраженной через узловые токи, встречает затруднения. Это объясняется тем, что в экономических расчетах искомыми величинами являются мощности станций при заданных мощностях нагрузок. Поэтому, практически более употребительным является формула потерь, выраженная через активные мощности и комплексные напряжения узлов. Известно, что

$$\begin{aligned} I_{ai} &= \frac{1}{U_i} (P_i \cos \psi_i + Q_i \sin \psi_i); \\ I_{pi} &= \frac{1}{U_i} (P_i \sin \psi_i - Q_i \cos \psi_i), \end{aligned} \quad (26)$$

где индекс i пробегает все значения от 1 до $(\Gamma + N + H)$. После подстановки (26) в (16) и (20)–(25) получены следующие выражения.

Потери активной мощности:

$$P_n = \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} P_m B_{mn} P_n. \quad (27)$$

Здесь

$$B_{mn} = K_{mn} R_{m-n}^0 + H_{mn} X_{m-n}^0 \quad (28)$$

$$K_{mn} = \frac{1}{U_m U_n} \cdot \frac{\cos \theta_{mn}}{\cos \varphi_m \cos \varphi_n}; \quad (29)$$

$$H_{mn} = K_{mn} \operatorname{tg} \theta_{mn}. \quad (30)$$

В выражениях (29) и (30)

$$\theta_{mn} = \varphi_m - \varphi_n - \psi_m + \psi_n; \quad (31)$$

$$\varphi_m = \operatorname{arctg} \frac{Q_m}{P_m}; \quad \varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{Q_n}{P_n}. \quad (31a)$$

Сопротивления R_{m-n}^0 и X_{m-n}^0 определяются по следующим формулам

$$\begin{aligned} R_{m-n}^0 &= R_{mn} + \alpha \left(\sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} P_k B_{kj}^{mn} P_j + \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} P_k B_{k0}^{mn} + \Pi_1^{mn} \right); \\ X_{m-n}^0 &= \alpha \left(\sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} P_k C_{kj}^{mn} P_j + \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} P_k C_{k0}^{mn} + \Pi_2^{mn} \right); \\ \alpha &= 1: \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} \sum_{j=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} P_k K_{kj} P_j + \sum_{k=\Gamma+N+1}^{\Gamma+N+H} P_k K_{k0} + \Pi_3. \end{aligned} \quad (32)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Pi_1^{mn} &= \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} P_k B_{kj}^{mn} P_j; \\ \Pi_2^{mn} &= \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} P_k C_{kj}^{mn} P_j; \\ \Pi_3 &= \sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} P_k K_{kj} P_j; \\ B_{kj}^{mn} &= (R_{kj} - R_{mk} - R_{jn}) K_{kj}; \\ C_{kj}^{mn} &= (R_{nk} - R_{mk}) H_{kj}; \end{aligned} \quad (33)$$

$$K_{kj} = \frac{1}{U_k U_j} \cdot \frac{\cos \theta_{kj}}{\cos \varphi_k \cos \varphi_j}; \quad (35)$$

$$H_{kj} = K_{kj} \operatorname{tg} \theta_{kj}; \quad (36)$$

где

$$\theta_{kj} = \varphi_k - \varphi_j - \psi_k + \psi_j; \quad (37)$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{Q_k}{P_k}; \quad \varphi_j = \operatorname{arctg} \frac{Q_j}{P_j}. \quad (38)$$

Величины B_{k0}^{mn} , C_{k0}^{mn} , и K_{k0}^{mn} определяются по следующим формулам:

$$B_{k0}^{mn} = \frac{1}{U_k} \cdot \frac{(V_{\alpha k}^{mn})_i \cos \theta_k - (V_{\beta k}^{mn})_i \sin \theta_k}{\cos \varphi_k}; \quad (39)$$

$$C_{k0}^{mn} = \frac{1}{U_k} \frac{(V_{pk}^{1(mn)})_i \cos \theta_k - (V_{\alpha k}^{1(mn)})_i \sin \theta_k}{\cos \varphi_k}; \quad (40)$$

$$K_{k0} = \frac{1}{U_k} \cdot \frac{V_{aj}^* \cos \theta_k - V_{pj}^* \sin \theta_k}{\cos \varphi_k}. \quad (41)$$

В выражениях (39), (40), (41)

$$(V_{ak}^{mn}) = \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} P_j \cdot \frac{2R_{kj} - R_{mk} - R_{nk} - R_{mj} - R_{nj}}{U_j} \cdot \frac{\cos \theta_j}{\cos \varphi_j}; \quad (42)$$

$$(V_{pk}^{mn})_i = - \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} P_j \cdot \frac{2R_{kj} - R_{mk} - R_{nk} - R_{mj} - R_{nj}}{U_j} \cdot \frac{\sin \theta_j}{\cos \varphi_j}; \quad (43)$$

$$(V_{uk}^{(mn)})_j = \sum_{i=\Gamma+1}^{\Gamma+N} P_i \cdot \frac{R_{nj} - R_{mj} - R_{nk} + R_{mk}}{U_j} \cdot \frac{\cos \theta_j}{\cos \varphi_j}; \quad (44)$$

$$(V_{pk}^{(mn)})_i = - \sum_{j=\Gamma+1}^{\Gamma+N} P_j \cdot \frac{R_{nk} - R_{mk} - R_{nj} + R_{mj}}{U_j} \cdot \frac{\sin \theta_j}{\cos \varphi_j}; \quad (45)$$

$$V_{aj}^* = 2 \sum_{i=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \frac{P_i}{U_j} \cdot \frac{\cos \theta_i}{\cos \varphi_j}; \quad (46)$$

$$V_{pj}^* = -2 \sum_{i=\Gamma+1}^{\Gamma+N} \frac{P_i}{U_j} \cdot \frac{\sin \theta_i}{\cos \varphi_j}; \quad (47)$$

$$\theta_j = \varphi_j - \psi_j. \quad (48)$$

Следует отметить, что величины, определяющиеся по формулам (33), (42)–(47), являются постоянными слагающими и для рассматриваемой энергосистемы определяются всего один раз. Переменные слагающие требуется определять для каждого режима. Необходимые данные, характеризующие режимы (P , Q , U , ψ_u), определяются после установления потокораспределения для рассматриваемой энергосистемы. При этом принимаются заданными активные и реактивные мощности в нагрузочных узлах. Однако, для определения сопротивлений R_{m-n}^0 и X_{m-n}^0 необходимо также знание комплексных напряжений в соответствующих узлах. Для некоторого облегчения решения вопроса можно принять, что напряжения в нагрузочных узлах не зависят от режима. Это допущение относится только к нагрузочным узлам второго типа. Данное допущение дает возможность независимо от станционных узлов определить переменные сопротивления (при заданных активных и реактивных мощностях в соответствующих узлах).

При этом формула потерь представляется в зависимости только от характеризующих величин станционных узлов.

Վ. Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԷՆԵՐԳՈՍԻՍՏԵՄԻ ԲԱՐՁՐԱՎՈՂՏ ԶԱՆՅՈՒՄ ՀՂՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍԻ
ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում տրված է էներգոսիստեմի բարձրավոլտ ցանցում գոյություն ունեցող հզորության կորուստի հաշվման մեթոդ: Մինչ հզորության կորուստի որոշումը անհրաժեշտ է գտնել, այսպես կոչված, ցանցային B_{mn} գործակիցները: Կատարված հետազոտությունները ցույց տվեցին, որ այդ գործակիցները սեփական փոփոխության հետ փոփոխվում են և սովալ էներգոսիստեմի համար նրանց միարժեք որոշումը ճիշտ չէ: Այդ իսկ պատճառով, հողվածում կառուցված է հզորության կորուստի հաշվման այնպիսի մի բանաձև, որը հնարավորություն է տալիս հաշվի առնել B_{mn} ցանցային գործակիցների հետ տեղի ունեցող փոփոխությունները: Այդ նպատակով ենթակայանային (բեռային) հանգույցները բաժանվում են երկու խմբի. առաջին խումբն իր մեջ ընդգրկում է այն հանգույցները, որոնցում հզորությունները (ակտիվ ու ռեակտիվ) ժամանակի ընթացքում մնում են հաստատուն, իսկ երկրորդ խումբը՝ բոլոր ժամանակի փոփոխվող հզորություն ունեցող հանգույցները:

Պայմանավորված հանգույցների այդպիսի բաժանումով, R_{m-n}^0 և X_{m-n}^0 դիմադրությունները ներկայացվում են որպես հաստատուն և փոփոխական բաղադրիչների գումար:

Դիտարկվող էներգոսիստեմի համար դիմադրության մեջ մտնող հաստատուն բաղադրիչը անհրաժեշտ է հաշվել մեկ անգամ, իսկ փոփոխական բաղադրիչը՝ միայն սեփական փոփոխման դեպքում: Ցանցում առաջացող հզորության կորուստի հաշվումն համար, այդպիսի բանաձևի կառուցումը ապահովում է անհրաժեշտ ճշտություն և իշեցնում է հաշվային աշխատանքների ծավալը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адоңц Г. Т. К методам расчета потерь мощности в электрических сетях энергосистемы. Журн. "Электричество", № 11, 1962.
2. Мельников Н. А. Учет потерь в сети при определении наивыгоднейшего режима энергосистемы. Журн. "Электричество", № 2, 1960.
3. Маркович И. М. Общая формула потерь мощности в сетях и вычисление удельных приростов потерь. Журн. "Электричество", № 2, 1962.
4. George E. E., Intrasytem transmission losses, AIEE Trans., vol. 62, March 1943, p. 153—158.
5. Ward J. B., Eutson J. R. and Hale H. W., Total and incremental losses in power transmission networks, AIEE Trans., vol. pt. I, 1950, p. 626—632.
6. Kron G., Tensorial analysis of integrated transmission Systems, Part I. The six basic reference frames. AIEE Trans. vol. 70, 1951, p.p. 1239—48.
7. George E. E., A new method of making transmission loss formulas by means of eigenvalues and modal matrices, Power App. and Systems, 1960, № 48.
8. Kirchmayer L. K., Economic operation of power Systems, (book), New York, 1958.
9. Хачатрян В. С., Методика расчета потерь мощности в сетях энергосистемы. "Известия АН Армянской ССР" (серия Т. Н.), № 1, 1962.

ЭНЕРГЕТИКА

Л. А. АГАСЯН

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВНУТРЕННЕЙ РЕГУЛИРОВКИ
СВОБОДНОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Свободнопоршневые генераторы газа входят в состав газотурбинных установок в качестве источников горячих, сжатых газов с требуемыми параметрами для питания газовой турбины. Параметры генерируемого газа свободнопоршневого генератора газа (СПГГ) должны соответствовать выбранному проходному сечению соплового аппарата турбины на всех режимах работы установки. Поэтому вопросы обеспечения наивыгоднейших условий совместной работы турбины и СПГГ приобретают существенное значение. Решение этой задачи сводится к внутренней регулировке СПГГ.

В порядке первого приближения условие совместимости режимов работы турбины и СПГГ можно записать в виде следующего равенства:

$$\frac{G_r \sqrt{T_r}}{P_r} = \text{const}, \quad (1)$$

где G_r , T_r и P_r — соответственно секундный расход, температура и давление выхлопных газов.

Большинство современных газогенераторов выполнено по схеме с внутренним расположением компрессоров и с буферами низкого давления, позволяющей выполнить газогенератор наименьшего габарита и веса. Отметим, что здесь имеется в виду газогенератор только указанного типа. Изменение режима работы в СПГГ достигается посредством изменения трех основных параметров: количества топлива за цикл, подаваемого в цилиндр двигателя, давления выхлопных газов, регулируемого сечением выхлопа, уровня буферов (массы воздуха, содержащейся в буфере). При изменении одного из этих параметров в СПГГ устанавливаются новые, отличные от расчетного, режимы работы, которые принято называть переменными режимами.

Известно, что для прямого хода поршня [1]:

$$L_k^{nx} + L_g + L_k^{ox} = L_b; \quad (2)$$

для обратного хода поршня

$$L_n^{nx} + L_k + L_g^{ox} = L_b, \quad (3)$$

где L_k — работа компрессора за цикл;

$L_k^{n,x}$ — работа расширения в компрессоре;

L_g — работа двигателя за цикл;

$L_g^{o,x}$ — работа сжатия в двигателе;

L_b — работа сжатия или расширения в буфере.

Из сопоставления уравнений (2) и (3) имеем:

$$L_g = L_k, \quad (4)$$

т. е. энергия, воспринятая компрессором, равна энергии, развитой двигателем. Это значит, что генератор газа—система автоматически устойчивая.

При переходе СПГГ на частичные нагрузки ход поршней мало изменяется по сравнению с другими параметрами (так, например, у генератора GS—34 в интервале нагрузок 100—40% ход поршня уменьшается на 24%). Однако относительно малое изменение величины хода поршня играет решающую роль при работе СПГГ на переменных режимах. С изменением хода поршня меняется не только число циклов СПГГ, но и относительный объем вредного пространства компрессора, производительность, а также время—сечение распределительных окон двигателя. Поэтому, весьма важно установить, как же влияют главные параметры СПГГ на ход поршней.

Если подача топлива увеличена, а другие параметры (давление выхлопных газов, уровень буферов) остаются постоянными, работа цикла двигателя L_g увеличивается. Из уравнения (4) работа цикла компрессора L_k тоже увеличивается, значит, ход увеличивается. Таким образом, величина подачи топлива задает размеры хода поршней.

Если уровень буферов увеличивается, а другие параметры остаются постоянными (подача топлива, давление выхлопных газов), L_b увеличивается. При этом, как видно из уравнения (2), только $L_g^{o,x}$ может увеличиваться, так как L_g и $L_k^{n,x}$ по условию остаются постоянными. С другой стороны, из уравнения (4) следует, что L_k остается постоянным. Следовательно внутренняя мертвая точка (ВМТ) и наружная мертвая точка (НМТ) должна приближаться к центру. Значит уровень буферов дает позицию хода поршней. Давление выхлопных газов, выданных на турбину, определяется сечением выхлопа и производительностью СПГГ. При постоянной производительности СПГГ давление в продувочном ресивере зависит только от величины сечения выхлопа. При увеличении давления в продувочном ресивере работа цикла компрессора L_k должна увеличиться. Согласно уравнения (4) $L_k = \text{const}$ при $L_g = \text{const}$. С другой стороны, увеличение давления в продувочном ресивере сначала увеличивает работу сжатия в двигателе $L_g^{o,x}$, но так как ход и диаграмма буфера уменьшаются, из уравнения (2) $L_g^{o,x}$ уменьшается с увеличением ВМТ. Диаграммы циклов двигателя и компрессора изменяют вид, но остаются постоянными.

ми по площадям. Изменение давления продувочного ресивера изменяет размеры и позицию хода.

Из рассмотрения влияния основных параметров СПГГ приходим к выводу, что изменение проходного сечения выхлопа изменяет ход поршней, который определяется подачей количества топлива, а уровень буферов определяет их позицию.

Установим предельные положения мертвых точек. Перемещения ВМТ к центру и от центра машины ограничены соответственно максимальным и минимальным давлением сжатия в цилиндре двигателя. Максимальное давление сжатия в осуществленных типах СПГГ до-

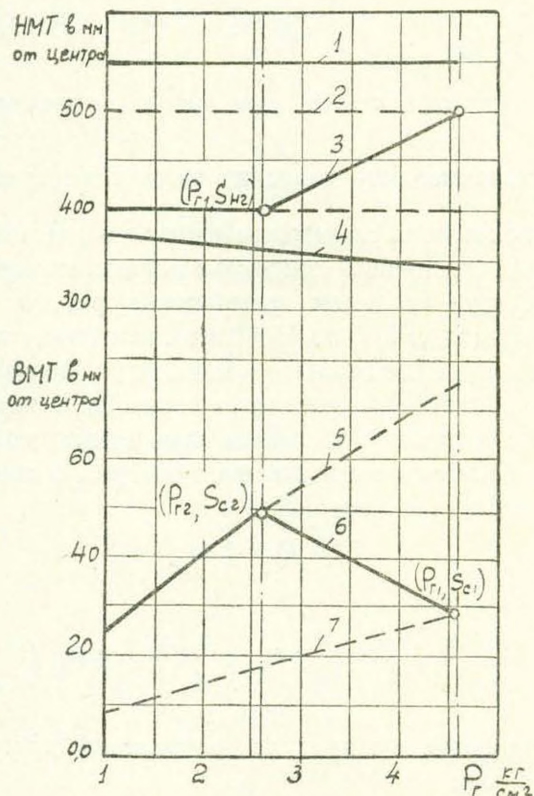


Рис. 1. Границы устойчивой работы СПГГ GS-34: 1. Положение НМТ, соответствующее упору поршней в крышке буфера; 2. Максимально допустимое расстояние НМТ от центра; 3. Положение НМТ при работе СПГГ с турбиной; 4. Предел устойчивости по положению НМТ; 5. Предел устойчивости по положению ВМТ; 6. Положение ВМТ при работе СПГГ с турбиной; 7. Минимально допускаемое расстояние ВМТ от центра.

стигает до $100 \frac{кг}{см^2}$. Для обеспечения самовоспламенения топлива, минимальное давление сжатия в двигателе, при нормальных условиях окружающей среды, должно быть равно $25 \frac{кг}{см^2}$. На рис. 1 показан

характер изменения максимальных и минимальных расстояний ВМТ от центра в функции давления газа. При этом использованы следующие расчетные формулы:

$$S_c^{\max} = S_c \cdot \left(\frac{P_r}{P_c^{\min}} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (5)$$

$$S_c^{\min} = S_c \cdot \left(\frac{P_r}{P_c^{\max}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (6)$$

Численные значения параметров, входящих в формулы (5) и (6), были приняты:

$S_c = 263 \text{ мм}$ — расстояние внутренней кромки выхлопных окон от центра;

$P_c^{\min} = 25 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ — минимальное давление сжатия в цилиндре двигателя;

$P_c^{\max} = 100 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ — максимальное давление сжатия в цилиндре двигателя;

$n = 1,35$ — показатель политропы сжатия в двигателе.

НМТ сверху ограничена контактом поршня компрессора с крышкой буфера, а снизу — условием устойчивой работы СПГГ (рис. 1). Условие устойчивости СПГГ по НМТ можно сформулировать так: для данного давления газа предельным является то положение НМТ, при котором работа компрессора достигает своего минимального значения. Действительно, для данного давления газа работа компрессора будет минимальной при минимальном давлении воздуха в продувочном ресивере. Но давление в ресивере [2]

$$P_s = P_r + \Sigma \Delta P,$$

где P_r — давление газа;

$$\Sigma \Delta P = \left(\frac{\gamma_n}{\gamma} \right) \cdot \left(\frac{g_{\text{кн}}}{g_{\text{к}}} \right)^2 \left[\Delta P_{\text{вн}} \left(\frac{A_{\text{вн}}}{A_{\text{в}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{пн}} \left(\frac{A_{\text{пн}}}{A_{\text{п}}} \right)^2 \right].$$

Здесь γ — удельный вес воздуха в цилиндре двигателя в начале сжатия;

$A_{\text{в}}, A_{\text{п}}$ — сечение выпускных и впускных окон;

$\Delta P_{\text{вн}}, \Delta P_{\text{пн}}$ — потери давления в выпускных и впускных окнах на номинальном режиме.

Индексом n обозначены параметры СПГГ на номинальном режиме. На основании приведенных уравнений на рис. 2 построена зависимость $\Sigma \Delta P$ от положения НМТ при различных значениях производительности компрессора за цикл. В соответствии с этими кривыми на том же рисунке даны кривые изменения давления в продувочном ресивере. Если справа от точки, соответствующей минимальному значению давления в продувочном ресивере, произошло временное уменьшение НМТ, давление в продувочном ресивере уменьшается, что приводит к перемещению НМТ до своей первоначальной позиции, т. е. СПГГ на-

ходится на автоматически устойчивом режиме. В случае, когда слева от этой точки произойдет временное уменьшение НМТ, давление в продувочном ресивере увеличивается, что приводит к новому умень-

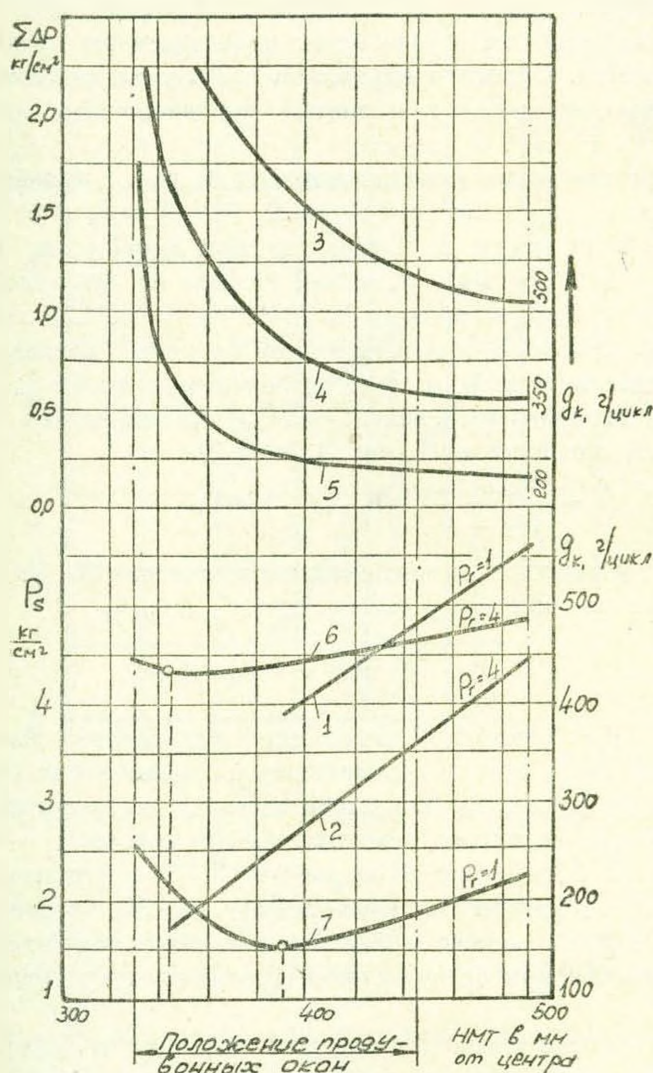


Рис. 2. Характеристики СПГГ GS-34 по положению НМТ. 1 и 2—производительность компрессоров за цикл при различных давлениях газа; 3, 4 и 5—суммарные потери давления в окнах при различных производительностях компрессоров; 6—7—давление в ресивере при различных давлениях газа.

шению НМТ, следовательно, и к увеличению давления в продувочном ресивере. После нескольких ходов с НМТ, уменьшающейся с каждым циклом, генератор останавливается вследствие недостаточной продувки. Точки, соответствующие минимальным значениям давления в продувочном ресивере, определяют переход СПГГ с зоны автомати-

чески устойчивого режима в зону неустойчивых режимов. Эти точки соответствуют минимальным расстояниям НМТ от центра. Так как для высоких значений давления газов производительность компрессоров за цикл ниже, чем для низких давлений (для данной НМТ), то эта точка в рассматриваемом случае будет находиться на меньшем расстоянии от центра. Отсюда следует, что предельные устойчивые НМТ будут приближаться к центру с ростом давления газов на выходе (рис. 1).

Диапазон изменения производительности газа, вырабатываемого СПГГ, зависит от пределов изменения S_c (ВМТ) и S_n (НМТ). Максимальная производительность получается при $S_c = S_{c1}$ и $S_n = S_{n1}$, а минимальная — при $S_c = S_{c2}$ и $S_n = S_{n2}$. Исходя из этих соображений, можно наметить закон изменения S_c (ВМТ) и S_n (НМТ) при изменении нагрузки установки, обеспечивающей широкий диапазон изменения производительности. Для этого необходимо, чтобы S_n увеличивался от минимального значения S_{n2} до S_{n1} по линейному закону в зависимости от давления газа (рис. 1, поз. 3):

$$S_n = \frac{S_{n2} - S_{n1}}{P_{r2} - P_{r1}} (P_r - P_{r1}) + S_{n1}, \quad (7)$$

а S_c (ВМТ) уменьшался от максимального значения S_{c2} до минимального S_{c1} тоже по линейному закону (рис. 1, поз. 6)

$$S_c = \frac{S_{c2} - S_{c1}}{P_{r2} - P_{r1}} (P_r - P_{r1}) + S_{c1}. \quad (8)$$

При работе СПГГ с турбиной внутренняя регулировка должна обеспечить изменение S_n и S_c в соответствии с уравнениями (7) и (8). В приведенных формулах S_{c2} и S_{c1} определяются из формул (5) и (6). Величина P_{r1} характеризует перегрузочный режим, а P_{r2} — минимальное давление газа при совместной работе СПГГ и турбины. Из конструктивных соображений определяется S_{n1} , а S_{n2} задается. В порядке первого приближения за S_{n2} можно принять такой ход, при котором поршень перекрывает продувочные окна цилиндра двигателя примерно на 40%.

Закономерность изменения среднего давления в буфере в зависимости от давления наддува, необходимая для получения требуемой степени сжатия двигателя на переменных режимах, достигается выбором дифференциального поршня и подбором соответствующей затяжки пружины стабилизатора, а изменение S_n по заданному закону (7) — изменением подачи топлива. Зависимость изменения подачи топлива и среднего давления в буфере описывается выражениями:

$$g_r = \frac{P_{ik}}{P_{ik_0}} \cdot \frac{S}{S_0} \cdot \frac{\eta_{ls}}{\eta_l} \cdot g_{r_0}; \quad (9)$$

$$P_s = \frac{F_k}{F_0} \cdot P_{ik}^c + \frac{F_g}{F_0} P_{ig}^c + P_m^{\alpha s}, \quad (10)$$

где F_k , F_b и F_g — соответственно площадь поршня компрессора, буфера и двигателя;

P_{ik}^c , P_{ig}^c и P_{τ}^{ox} — соответственно средние индикаторные давления в компрессоре, двигателе и механических потерь за обратный ход;

η_i — индикаторный к.п.д. двигателя.

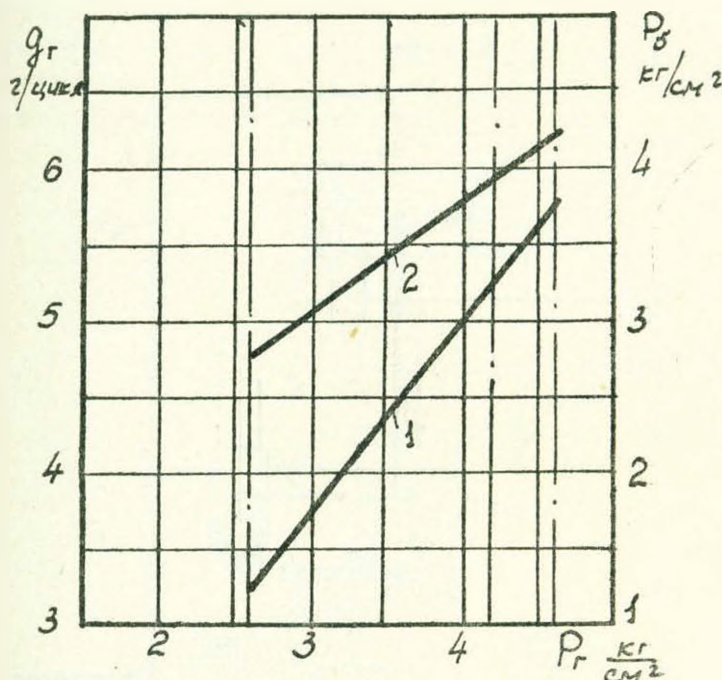


Рис. 3. Зависимость подачи топлива и среднего давления в буфере от давления газа при работе СПГГ GS-34 с турбиной.

Графики изменения относительных величин подачи топлива и среднего давления в буфере в функции давления газа представлены на рис. 3. Остальные параметры определяются по методике, изложенной в работе [1].

Таким образом, имеем необходимые законы изменения ВМТ и НМТ по режимам при работе СПГГ с турбиной (рис. 1). Кроме того, из уравнений энергетических балансов СПГГ устанавливается, что полученные закономерности изменения мертвых точек можно обеспечить одновременным изменением подачи топлива и среднего давления буферов согласно рис. 3. Практически это осуществляется системой внутренней регулировки СПГГ, главными элементами которой является стабилизатор и топливный насос (рис. 4): принцип работы стабилизатора подробно изложен [3].

Рассмотрим работу одного и того же СПГГ со стабилизатором, находящимся под средним давлением воздушной подушки, и со стабилизатором с отбором давления. На рис. 4 изображено устройство для предварительного отбора давления из буферных цилиндров. От-

крытие золотника происходит при достижении движущимися частями середины пути и длится только на небольшой части его хода. При работе СПГГ со стабилизатором со средним давлением, стабилизатор постоянно связан с буферными цилиндрами, а пульсации воздуха

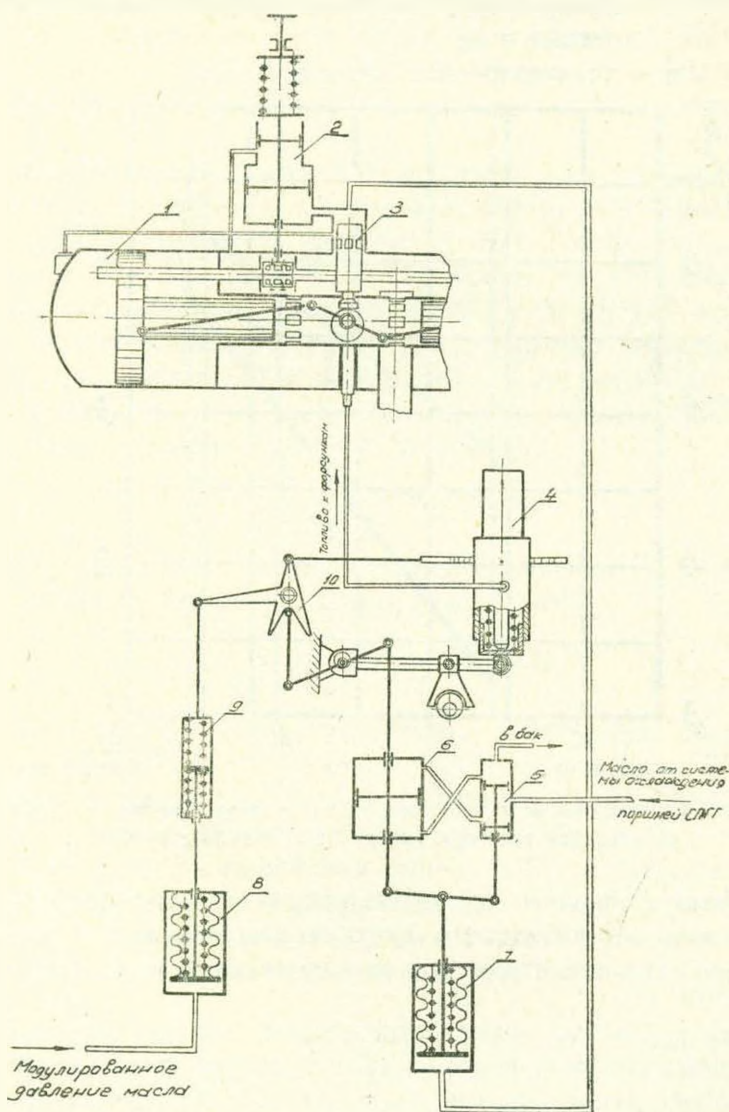


Рис. 4. Принципиальная схема внутреннего регулирования СПГГ. 1—СПГГ; 2—стабилизатор; 3—клапан отбора давления; 4—топливный насос; 5—золотник; 6—сервомотор; 7—чувствительный элемент; 8—сервомотор подачи топлива; 9—ограничитель усилия; 10—кулачок ограничения подачи топлива.

амортизируются глушителем, включенным в этот трубопровод. При работе СПГГ со стабилизатором, управляемым средним давлением буферов, стабилизатор поддерживает определенное среднее давление в буфере независимо от длины хода. Если, например, ход удлиняется

вследствие более сильного впрыскивания горючего, среднее давление воздушной подушки увеличивается и поршень стабилизатора перемещается вверх, воздух уходит из воздушной подушки до момента, пока не восстановится первоначальное среднее давление. При работе со стабилизатором с предварительным отбором давления количество воздуха в буферном цилиндре не зависит от длины хода и при данном рабочем давлении мы получаем кривую давления в зависимости от вполне определенного хода. Удлинение хода, следовательно, выражается увеличением среднего давления воздушной подушки.

На рис. 5 показано изменение давления в буфере в зависимости

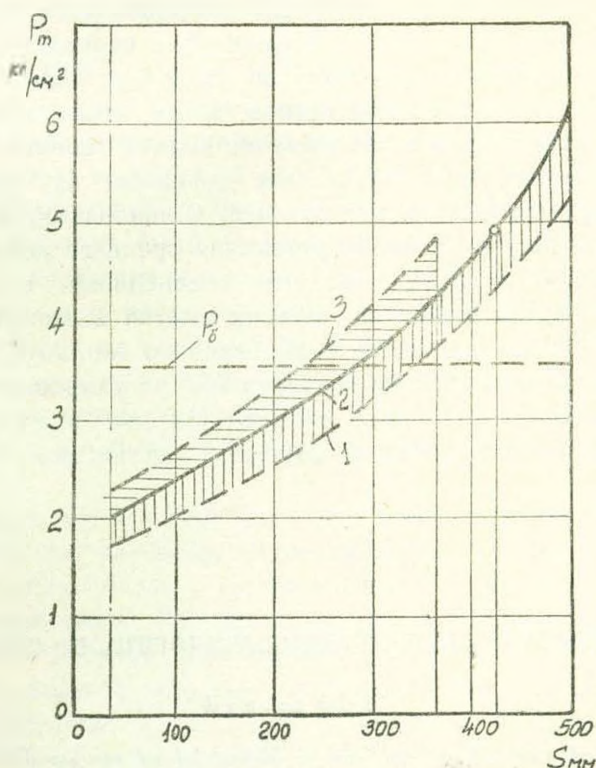


Рис. 5. Диаграмма буферных цилиндров СПГГ GS-34: непрерывная черта — для стабилизатора с отбором давления; пунктирная черта — для стабилизатора со средним давлением. S — ход в мм; P_m — мгновенное давление в буферных цилиндрах; $P_ср$ — среднее давление в буферных цилиндрах; 1, 2 и 3 — давление в буферных цилиндрах при длинном, среднем и коротком ходе поршня.

от хода со стабилизатором с отбором давления и со стабилизатором со средним давлением. Если допустить, что для среднего хода графики давления будут одинаковыми для обоих типов стабилизатора, то при использовании стабилизатора с отбором давления получим увеличение работы обратного хода в случае удлинения пути (поверхность 4. ТН, № 5

заштрихована вертикально) и, наоборот, уменьшение работы обратного хода при более коротком пути движения поршня (поверхность заштрихована горизонтально). Следовательно, при работе СПГГ с стабилизатором с отбором давления увеличение нагрузки СПГГ сопровождается увеличением уровня буферов. При рассмотрении влияний основных параметров автором установлено, что увеличение уровня буферов при прочих равных условиях приводит к увеличению степени сжатия в двигателе. Значит, стабилизатор с отбором давления обеспечивает необходимый закон изменения ВМТ, а топливный насос—соответствующую длину хода. Импульс изменения числа оборотов турбины модулированным давлением масла воспринимается сифонным чувствительным элементом (рис. 4, позиция 8) и передается через рычажную систему топливному насосу 4 на изменение подачи топлива. Это вызывает изменение всех параметров, в том числе и уровня буфера. Сервомотор опережения и ограничения подачи топлива 7 воспринимает сигнал от буферов через отобранное давление на соответствующее изменение опережения подачи топлива. Стабилизатор 2 на рис. 4 поддерживает необходимый закон изменения среднего давления в буфере в зависимости от давления газа, что обеспечивает в свою очередь необходимый закон изменения степени сжатия в двигателе. Позиция НМТ регулируется количеством подаваемого топлива за цикл.

Таким образом, органы внутренней регулировки с изменением подачи топлива устанавливают соответствующие позиции мертвых точек и обеспечивают широкий диапазон изменения мощности установки.

АФВНИИЭМ

Поступило 3 IV 1963

ԱՉԱՏ-ԿՆՈՅԱՅԻՆ ՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ՄԻ ՔԱՆԻ ՀԱՐՅՈՐ

Ա. մ փ ո փ ու մ

Հողվածում ուսումնասիրության է ենթարկվում աղատ մխոցային շարժիչների կարգավորման սխեման: Յուրյ է տրված, որ աղատ մխոցային շարժիչների հիմնական պարամետրները հանդիսանում են վառելիքի ջիլլային ծախսը, բուֆերի միջին ճնշումը և արտաթվող գազերի խողովակի կտրվածքի մեծությունը: Ուսումնասիրված է նաև աղատ մխոցային շարժիչի համատեղ աշխատանք տուրբինի հետ: Առաջարկվում է աղատ մխոցային շարժիչով ուժային սարքավորման հիմնական պարամետրների հաշվարկման ինժեներական մեթոդ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Елистратов Ф. М., Колуюко В. М., Томилиа М. С. Силовые установки со свободнопоршневыми генераторами газа, Л. 1959.
2. Шелест П. А. Безвальные генераторы газов, М., 1960.
3. Кошкин В. К. и Левин Б. Ф. Двигатели со свободно движущимися поршнями, М., 1954.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Л. С. ВЛАСОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОСТИ
КЕРАМЗИТОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ
ДЕЙСТВИИ НАГРУЗКИ

В течении 1958—1961 гг. в Грузинском политехническом институте им. В. И. Ленина автором, под руководством проф. М. А. Якубовича, были проведены эксперименты по исследованию изменения во времени жесткости изгибаемых керамзитожелезобетонных балок длиной 220 см прямоугольного сечения размером 8×14 см. Испытанию длительной нагрузкой было подвергнуто 12 балок: 4 керамзитожелезобетонные на керамзитовом песке (серии К-1-С и К-2-С), 4 керамзитожелезобетонные на кварцевом песке (серии К-1-Р и К-2-Р) и, для сравнения, 4 балки из тяжелого железобетона (серии О-1-Б и О-2-Б). В каждую из указанных серий входило по две балки-близнеца. Балки из каждого вида бетона принимались с двумя процентами армирования $\mu = 1,04\%$ и $\mu = 2,46\%$ (на это указывает второй индекс в наименовании серий).

С целью выявления жесткости изгибаемых керамзитожелезобетонных элементов при наиболее неблагоприятных условиях их работы, армирование всех балок осуществлялось вязаными каркасами из круглой гладкой стали. Рабочая арматура балок с $\mu = 1,04\%$ — $2\varnothing 8$ мм ($\sigma_T = 2160$ кг/см²), балок с $\mu = 2,46\%$ — $3\varnothing 10$ мм ($\sigma_T = 3070$ кг/см²). Средняя треть каркаса выполнялась без хомутов.

Режим хранения балок до их загрузки — воздушно-сухой при относительной влажности воздуха 50—80%. Одновременно с изготовлением балок были изготовлены из тех же замесов бетона кубики, восьмерки и призмы. Методика проведения эксперимента преследовала цель выявить изменение во времени прогибов, а также деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры.

Подготовленные к испытанию балки устанавливались на опоры (по схеме свободно лежащей балки) и ступенчато загружались двумя равными сосредоточенными грузами P , приложенными в третях пролета. Величина длительно действующей нагрузки составляла примерно 0,5 от разрушающей и равнялась 1000 кг для балок с $\mu = 2,46\%$ и 370 кг для балок с $\mu = 1,04\%$. При этих нагрузках во всех балках трещины уже имелись. Установка балок на опоры и загрузка их производилась в возрасте бетона 60—70 дней. К этому времени прочность на сжатие всех видов бетона составляла в среднем 200 кг/см², а на

растяжение — 14 кг/см^2 . Модули упругости при сжатии оказались равными: для керамзитобетона на керамзитовом песке $E=135000 \text{ кг/см}^2$, для керамзитобетона на кварцевом песке $E=160000 \text{ кг/см}^2$, для тяжелого бетона $E=220000 \text{ кг/см}^2$.

Измерение прогибов производилось переносными индикаторами часового типа (мессурами) с ценой деления $0,01 \text{ мм}$ в трех местах по длине элемента: над грузами f_{II} и f_{IV} и в середине пролета f_{III} . Кроме этого, такими же мессурами производилось измерение осадки опор f_I и f_V . Относительные деформации сжатого бетона и растянутой арматуры определялись постоянно закрепленными на балках мессурами с базой измерения 500 мм — компараторами. На каждую балку устанавливались 4 компаратора — 2 на сжатый бетон и 2 на растянутую арматуру.

Показания приборов снимались: во время приложения нагрузки, через 10 мин после приложения полной нагрузки, затем — в течение недели — ежедневно, а в дальнейшем еще реже. Одновременно велись наблюдения за появлением и раскрытием трещин. В дни взятия отсчетов по приборам производилось измерение температуры и относительной влажности воздуха в помещении, представляющем собой закрытый неотапливаемый зал. Ниже приводятся результаты по годичным наблюдениям.

Были определены мгновенные экспериментальные прогибы в середине пролета $f^{\text{эк}}$ (соответствующие замерам через 30 минут после приложения нагрузки), приращение прогибов при выдерживании балок под нагрузкой $\Delta f^{\text{эк}}$, полные прогибы $f_n^{\text{эк}} = f^{\text{эк}} + \Delta f^{\text{эк}}$ и коэффициенты возрастания прогибов $\beta = \frac{f_n^{\text{эк}}}{f^{\text{эк}}}$.

На рис. 1 приводятся экспериментальные кривые приращения во времени прогибов балок в середине пролета, а также кривые температуры и относительной влажности воздуха. Как видно из этого рисунка при высокой температуре и низкой относительной влажности воздуха нарастание прогибов происходит быстрее, чем при низкой температуре и высокой относительной влажности воздуха. Из этого же рисунка видно, что затухание прогибов в осенне-зимний период 1960—1961 гг. является кажущимся, поскольку с наступлением сухой и теплой погоды вновь обнаруживается тенденция к более интенсивному нарастанию прогибов.

В связи с годичным возрастом бетона усадочные деформации были малы и поэтому изменение интенсивности роста прогибов с изменением температурно-влажностных условий среды было обусловлено, в основном, ползучестью бетона.

Из рис. 1 видно, что кривые приращения прогибов всех испытанных балок спустя 50—70 дней располагаются в дальнейшем почти параллельно друг другу.

В табл. 1 приводятся данные по изменению прогибов в середине пролета опытных балок.

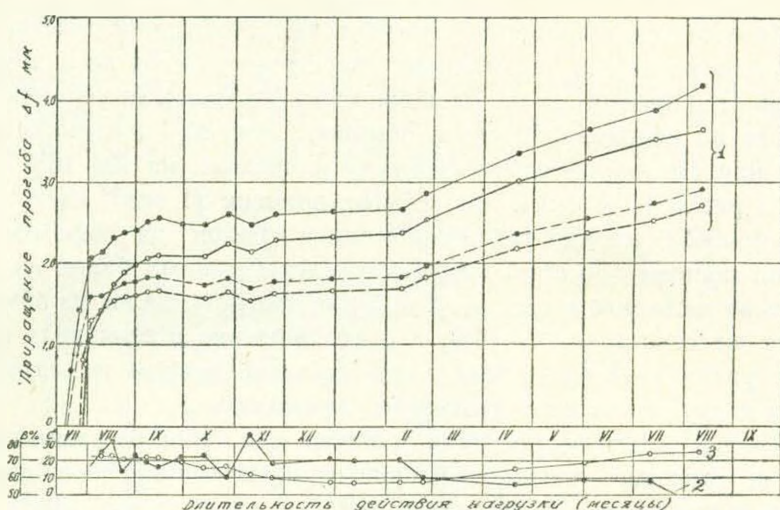


Рис. 1. Кривые приращения стрел прогибов балок в зависимости от температуры и влажности воздуха. 1—кривые приращения прогибов балок с $\mu = 2,46\%$ (верхние кривые) и с $\mu = 1,04\%$ (нижние кривые); 2—кривые относительной влажности воздуха; 3—кривые температуры воздуха.

Таблица 1

Номер балок	Процент армирования $\mu\%$	Мгновенный экспериментальный прогиб $f^{\text{эк}}$ мм	Мгновенный прогиб по СНиП (II—В.1-62) f мм	Приращение экспериментального прогиба от длительной нагрузки $\Delta f^{\text{эк}}$ мм	Полный экспериментальный прогиб $f_p^{\text{эк}} = f^{\text{эк}} + \Delta f^{\text{эк}}$	Коэффициент возрастания прогиба $\beta = \frac{f_p^{\text{эк}}}{f^{\text{эк}}}$
К-1-С	1,04	3,4	3,5	2,9	6,4	1,9
К-1-Р	1,04	3,2	3,2	2,7	5,9	1,8
О-1-Б	1,04	3,1	2,9	2,7	5,8	1,9
К-2-С	2,46	5,5	6,6	4,3	9,9	1,8
К-2-Р	2,46	5,4	6,1	3,8	9,2	1,7
О-2-Б	2,46	4,8	5,2	3,6	8,5	1,7

На основании приведенных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Величины мгновенных экспериментальных прогибов керамзитожелезобетонных балок как на керамзитовом, так и на кварцевом песках относительно хорошо согласуются с данными, вычисленными по СНиП II—В. 1—62.

2. Наибольший мгновенный прогиб наблюдается у керамзитожелезобетонных балок на керамзитовом песке при обоих, принятых в данной работе, процентах армирования. Превышение прогиба этих балок над прогибом керамзитожелезобетонных балок на кварцевом песке составляет в среднем 5%, а над прогибом балок из обычного тяжелого железобетона 10—15%.

3. Наибольшее приращение прогибов при длительном действии нагрузки имеет место для керамзитожелезобетонных балок на керамзитовом песке. Оно превышает приращение прогибов балок из керамзитожелезобетона на кварцевом песке и обычного тяжелого железобетона, у которых приращение прогибов примерно одинаково, на 10—16%.

4. За рассматриваемый промежуток времени (1 год), превышение полного прогиба керамзитожелезобетонных балок на керамзитовом песке над полным прогибом керамзитожелезобетонных балок на кварцевом песке составило в среднем 8%, а над прогибом балок из обычного тяжелого железобетона 10—16%, т. е. соотношения в величинах прогибов для рассматриваемых балок при кратковременном и длительном действии нагрузки остаются примерно одинаковыми.

5. Коэффициенты возрастания прогибов для балок из разных видов бетона, но имеющих одинаковый процент армирования, колеблются в незначительных пределах—от 1,80 до 1,90 для балок с $\mu = 1,04\%$ и от 1,70 до 1,80 для балок с $\mu = 2,46\%$.

6. Основной причиной роста прогибов при длительном действии нагрузки является ползучесть бетона, остальные факторы имеют второстепенное значение. Это видно из того, что изменение процента армирования почти в два с половиной раза приводит лишь к незначительному (6—8%) изменению коэффициента возрастания прогибов.

7. На интенсивность роста прогибов значительное влияние оказывает температурно-влажностный режим среды, в которой находятся элементы. Это в равной степени относится к элементам как из легкого, так и из тяжелого железобетона и было ранее отмечено в [1].

Учитывая выводы 3 и 6, можно заключить, что керамзитобетон на кварцевом песке обладает примерно такой же ползучестью, как и обычный бетон (в сопоставимых условиях), а ползучесть керамзитобетона на керамзитовом песке превышает ползучесть обычного тяжелого бетона примерно на 20%. О том, что керамзитобетон обладает обычной ползучестью, указывает и Ф. Леонгардт [2], используя данные американских опытов с напряженно армированными керамзитобетонными балками, пролетом 6 м. Объясняется это видимо тем, что прочность растворной части в керамзитобетоне гораздо выше, чем в обычном бетоне той же марки.

На рис 2. представлены кривые изменения во времени средних относительных деформаций растянутой арматуры — ϵ_{ac} , крайнего волокна сжатой зоны бетона ϵ_{bc} и отношения $\epsilon_{ac}/\epsilon_{bc}$ в испытанных балках. Из рисунка видно, что во всех балках при обоих процентах армирования деформации крайнего волокна сжатой зоны бетона, как и средние деформации растянутой арматуры, вообще говоря, возрастают. При этом скорость нарастания деформаций крайнего волокна сжатой зоны бетона намного превышает скорость нарастания деформаций растянутой арматуры, вследствие чего отношение $\epsilon_{ac}/\epsilon_{bc}$ во времени уменьшается. К возрасту загрузки 100—120 дней рост деформаций арматуры прак-

тически прекращается. Аналогичные явления находят отражение и в литературе [3, 4, 5].

Годичному изменению деформаций ϵ_{bc} в 1,9—2,35 раза соответствует изменение деформаций ϵ_{ac} в 1,1—1,4 раза. При этом в балках с меньшим процентом армирования наблюдается большее изменение как ϵ_{bc} так и ϵ_{ac} .

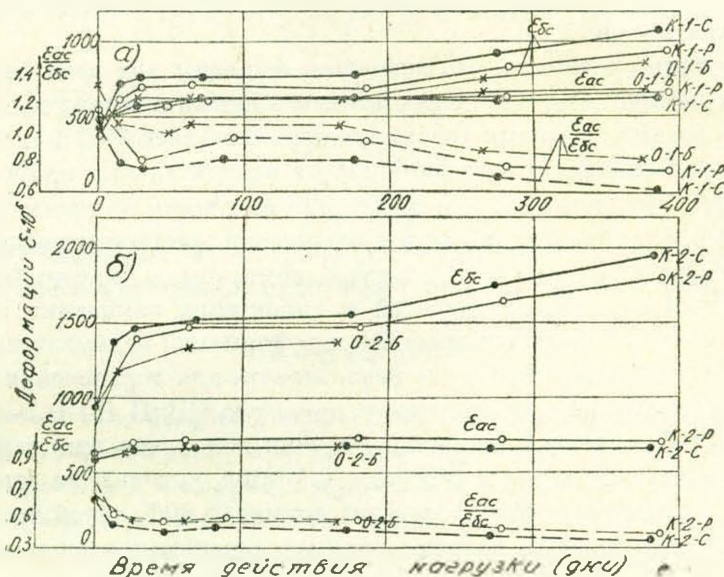


Рис. 2. Кривые изменения во времени средних относительных деформаций растянутой арматуры — ϵ_{ac} , крайнего волокна сжатой зоны бетона — ϵ_{bc} и отношения $\epsilon_{ac}/\epsilon_{bc}$ в балках: а) при $\mu = 1,04\%$; б) при $\mu = 2,46\%$.

Из всего сказанного выше в отношении изменения деформаций растянутой арматуры и сжатого бетона следует, что падение жесткости при длительном действии нагрузки происходит как за счет изменения упруго-пластических свойств бетона в сжатой зоне, когда увеличивается λ (коэффициент пластичности бетона при сжатии), так и за счет выключения бетона между трещинами из работы на растяжение, когда увеличивается ψ_a (коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона на участках между трещинами). Следовательно, вывод сделанный Я. М. Немировским [3, 6] в отношении изменения под длительной нагрузкой жесткости изгибаемых элементов из тяжелого железобетона, справедлив и для изгибаемых элементов из керамзитожелезобетона.

За год нахождения балок под нагрузкой значения λ , практически, независимо от процента армирования, увеличились в 1,4—1,5 раза и составили $0,84 \div 0,86$ ($\nu = 1 - \lambda = 0,16 \div 0,14$) для балок с $\mu = 1,04\%$ и $0,78 - 0,75$ ($\nu = 0,22 \div 0,25$) для балок с $\mu = 2,46\%$. В отношении же ψ_a выявлено, что этот коэффициент находится в явной зависимости

от процента армирования. Для балок с $\mu = 1,04\%$ значения ϕ_a увеличились в среднем в 1,25 раза, тогда как для балок с $\mu = 2,46\%$ они увеличились лишь в 1,07 раза. Отсюда следует, что преобладающее значение в падении жесткости при длительном действии нагрузки принадлежит ползучести бетона сжатой зоны. Таким образом, в данном эксперименте выявлена полная идентичность в характерах изменения во времени деформаций ϵ_{ac} и ϵ_{bc} для изгибаемых элементов из керамзитового и тяжелого железобетонов.

Необходимо отметить, что значения кривизны для всех балок, вычисленные по прогибам и по деформациям в любой промежуток времени оказались весьма близкими (расхождение составляет 3—7%), что говорит о согласованной и достоверной работе измерительных приборов.

Выводы, сделанные выше в отношении жесткости по прогибам, остаются полностью справедливыми и в отношении жесткости рассматриваемых балок по деформациям растянутой арматуры и сжатого бетона.

Идентичность закономерностей в характерах изменения под действием длительной нагрузки прогибов и деформаций керамзитового и тяжелого железобетонов позволяет использовать для определения жесткости керамзитожелезобетона методику, принятую СНиП II—В.1—62.

Поскольку основной причиной падения жесткости при длительном действии нагрузки является ползучесть бетона, которая, за год нахождения балок под нагрузкой, достигает примерно 80% своей предельной величины, сопоставление величин полных экспериментальных прогибов $f_n^{эк}$ производилось с величинами $0,8 f_n$, где f_n — полный прогиб, вычисленный по СНиП при $\nu = 0,15$ (нормальный режим). Сопоставление приводится в табл. 2.

Таблица 2

Балки						
Прогибы	К-1-С	К-1-Р	О-1-Б	К-2-С	К-2-Р	О-2-Б
$f_n^{эк} \text{ мм}$	6,43	5,96	5,84	9,91	9,22	8,51
$0,8 f_n \text{ мм}$	5,97	5,42	4,64	12,8	11,9	9,20
$\frac{f_n^{эк}}{0,8 f_n}$	1,08	1,10	1,25	0,77	0,77	0,93

Как видно из приведенной таблицы, формула СНиП для расчета жесткости при длительном действии нагрузки дает вполне удовлетворительные результаты и может быть применима к изгибаемым элементам из керамзитожелезобетона как на керамзитовом, так и на кварцевом песках.

Наряду с этим необходимо подчеркнуть, что жесткость элементов с большим процентом армирования этой формулой несколько недооценивается, т. е. фактическая жесткость керамзитожелезобетонных элемен-

тов с $\mu = 2,46\%$ получается больше вычисленной. Это объясняется тем, что значения γ при одном и том же температурно-влажном режиме для балок с большим процентом армирования по нашим экспериментам получаются на 20—40% больше, чем для таких же балок с меньшим процентом армирования. Принятые в СНиП значения γ независимо от процента армирования очевидно требуют уточнения, что может быть осуществлено по мере накопления экспериментальных данных.

ГПН им. В. И. Ленина

Поступило 5. IX. 1962

Լ. Ս. ՎԱՍՈՎ

ԿԵՐԱՄԶԻՏԱՆԵԼԿԵԶՈԲԵՏՈՆԻ ՀԵՄԱՆՆԵՐԻ ԿՈՇՏՈՒԹՅԱՆ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՐԿԱՐԱՏԵՎ ԲԵՌՆԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊԳՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում նկարագրվում է ուղղանկյուն կտրվածք ունեցող երկաթբետոնի հեծանների երկարատե բեռնվածության տակ կոշտության փոփոխության փորձարկման եղանակը և ստացված արդյունքները: Փորձարկման են ենթարկվել տարբեր տոկոսի ամրանավորմամբ ($\mu = 1,4$ և $\mu = 2,46$) կերամզիտի և կվարցի ավազով իրականացված կերամզիտաերկաթբետոնային հեծաններ, ինչպես և ծանր բետոնով հեծաններ: Որոշվել են ձկվածքի, սեղմված բետոնի և ձկված ամրանի ըստ ժամանակի տեղի ունեցած փոփոխությունները: Հեղինակը գալիս է այն եզրակացության, որ բեռնվածքի մոմենտային և երկարատե աղդեցության դեպքում փորձից ստացված ձկվածքի մեծությունները լավ համաձայնեցում են գտնում СНиП II-B-1-62 միջոցով հաշված մեծությունների հետ, ըստորում կերամզիտի ավազով պատրաստված կերամզիտաերկաթբետոնի հեծանների համար ձկվածքները ստացվել են ամենամեծը:

Նշվում է, որ ձկվածքների ըստ ժամանակի ունեցած աճի համար հիմնական գործոն է հանդիսանում բետոնի սողքը, իսկ մյուս գործոնները երկրորդական դեր են կատարում: Այսպես օրինակ՝ կտրվածքի ամրանավորման տոկոսի 2,5 անգամ ավելացումը բերում է ձկվածքի փոփոխմանը ընդամենը 6—8 % չափով: Նշված է ձկվածքի մեծության վրա ջերմա-խոնավային ռեժիմի զգալի աղդեցությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карцивадзе Г. Н., Квицаридзе О. И., Сагателова Е. С., Гвелесиани Л. О. Влияние температурно-влажностных условий на нарастание прогибов изгибаемых железобетонных элементов при длительном действии нагрузки, Журн. «Бетон и железобетон», № 1, 1960.
2. Леонгардт Ф. Напряженно-армированный железобетон, Госстройиздат, М., 1957.
3. Немировский Я. М. Жесткость железобетонных конструкций при длительном нагружении, Сб. «Теория расчета и конструирования железобетонных конструкций», Госстройиздат, М., 1958.

4. Лачинов Б. В. Расчет прогибов железобетонных элементов от длительных нагрузок. Журн. «Бетон и железобетон», № 8, 1960.
5. Фигаровский В. В. Увеличение прогибов железобетонных балок при длительном действии нагрузки. Журн. «Бетон и железобетон», № 11, 1962.
6. Немировский Я. М. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов и раскрытие трещин в них. Сб. «Исследования обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций». Госстройиздат, М., 1949.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

В. В. ВАРДАНЯН

К РАСЧЕТУ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛИТ НА УПРУГОМ
ОСНОВАНИИ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ

В [1] изложен прием определения значений двух коэффициентов упругого основания, входящих в выражение упругого отпора

$$q = k w - 2 t \Delta^2 w,$$

для осесимметрично нагруженной круглой плиты. В данной заметке этот прием распространяется на случай цилиндрического изгиба прямоугольной плиты, лежащей на упругом основании. Другими словами, дается способ определения коэффициентов k и t для полосы в условиях плоской деформации. Рассмотрим прямоугольную полосу с размерами $2b \times 2l$, когда вдоль оси y на участке $-b \leq y \leq b$ действует постоянная нагрузка P на единицу длины (рис. 1).

Прогиб произвольной точки $A(x, y)$ поверхности основания определится формулой:

$$w(x, y) = \frac{P(1 - \mu_0^2)}{\pi E_0} \ln \frac{b - y + \sqrt{(b - y)^2 + x^2}}{-b - y + \sqrt{(b + y)^2 + x^2}}, \quad (1)$$

где E_0 и μ_0 соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона основания. Из этой формулы следует, что прогибы точек, расположенных на прямой, отстоящей от оси y на расстоянии x , образуют плавную кривую с максимумом в середине:

$$w(x, 0) = \frac{2P(1 - \mu_0^2)}{\pi E_0} \ln \frac{\sqrt{b^2 + x^2}}{x}. \quad (2)$$

Сравнивая эти прогибы со средним прогибом, равным:

$$w_{cp} = \frac{1}{2b} \int_{-b}^b w dy = \frac{2P(1 - \mu_0^2)}{\pi E_0} \left(\ln \frac{b + \sqrt{b^2 + 0,25x^2}}{x} + \ln 2 - \frac{\sqrt{4b^2 + x^2} - x}{2b} \right) \quad (3)$$

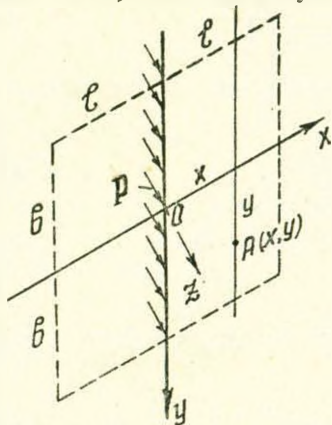


Рис. 1.

приходим к заключению, что если плита загружена как указано на рис. 1, и $b/l \geq 3$, то можно выделить вдоль оси x полосу и рассматривать ее как балку, лежащую на упругом основании, в условиях плоской деформации. При этом для прогибов вместо (2) можно пользоваться формулой:

$$w(x) = \frac{2P(1-\mu_0^2)}{\pi E_0} \ln \frac{2b}{x}. \quad (4)$$

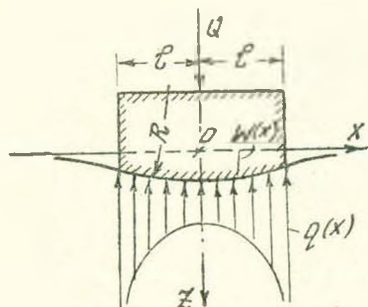


Рис. 2.

Рассмотрим теперь круговой цилиндрический жесткий штамп с большим радиусом R , шириной $2l$, вдавливаемый в упругую полуплоскость силой Q (рис. 2). При полном контакте, когда отпор грунта $q(x)$ на краях штампа получает бесконечное значение, имеем [2]:

$$q(x) = \frac{Q}{\pi \sqrt{l^2 - x^2}} + \frac{E_0}{4R(1-\mu_0^2)} \cdot \frac{l^2 - 2x^2}{\sqrt{l^2 - x^2}}. \quad (5)$$

Осадка грунта определяется формулой:

$$w(x) = w_0 - \frac{x^2}{2R}. \quad (5)$$

Пользуясь обозначениями

$$\xi = \frac{x}{l}; \quad \delta = \frac{\pi E_0 l^2}{4QR(1-\mu_0^2)}; \quad k_0 = \frac{\pi E_0}{4l(1-\mu_0^2)}; \quad p_0 = \frac{Q}{2l}, \quad (7)$$

(5) можем переписать в следующем виде:

$$q(\xi) = \frac{2p_0}{\pi} \left(\frac{1-\delta}{\sqrt{1-\xi^2}} + 2\delta \sqrt{1-\xi^2} \right). \quad (8)$$

Прогиб w_0 в центре штампа в силу (4) и (8) будет равен:

$$w_0 = \frac{2p_0}{\pi k_0} \int_0^1 \left(\frac{1-\delta}{\sqrt{1-\xi^2}} + 2\delta \sqrt{1-\xi^2} \right) \ln \frac{2b}{l\xi} d\xi = \frac{p_0}{k_0} \left(\ln \frac{4b}{l} + \frac{\delta}{2} \right). \quad (9)$$

Из (7) и (9) для осадки плиты получим формулу:

$$w(\xi) = \frac{p_0}{k_0} \left(\lambda + \frac{\delta}{2} - \xi^2 \right), \quad (10)$$

где

$$\lambda = \ln \frac{4b}{l}. \quad (11)$$

Если балка длиной $2l$ и жесткостью $D = \frac{E h^3}{12(1-\mu^2)}$ будет лежать на упругой полуплоскости, сверху будет загружена поперечной

нагрузкой $p(\xi)$, данной по закону (8), а к ее обоим концам будут приложены изгибающие моменты $M_1 = M_2 = \frac{D}{R}$, то прогиб балки определится формулой (10).

Предположим теперь, что балка лежит не на упругой полуплоскости, а на основании, характеризуемом двумя коэффициентами k и t (рис. 3).

Пользуясь выражением (10), для упругого отпора $q = kw - 2t w''$ получим выражение:

$$q(\xi) = p_0 \left(\lambda x + \frac{x\delta}{2} + 4\tau\delta - x\delta\xi^2 \right), \quad (12)$$

где

$$x = \frac{k}{k_0}; \quad \tau = \frac{t}{k_0 l^2}. \quad (14)$$

Поскольку $p(\xi) - q(\xi) \neq 0$, балка будет изгибаться. Определим значения коэффициентов x и τ из условия минимума потенциальной энергии изгиба балки от нагрузки $p(\xi) - q(\xi)$. Задача приводится к решению уравнения

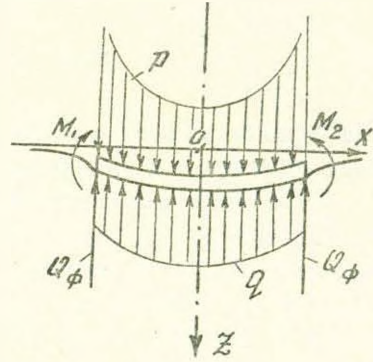


Рис. 3.

$$\frac{d^4 w}{d\xi^4} = \frac{p_0 l^4}{D} \left[\frac{2(1-\delta)}{\pi \sqrt{1-\xi^2}} + \frac{4\delta}{\pi} \sqrt{1-\xi^2} + x\delta \xi^3 - \left(\lambda x + \frac{x\delta}{2} + 4\tau\delta \right) \right], \quad (14)$$

при граничных условиях

$$\left(\frac{d^3 w}{d\xi^3} \right)_{\xi=0} = \left(\frac{dw}{d\xi} \right)_{\xi=0} = \left(\frac{dw}{d\xi} \right)_{\xi=1} = (w)_{\xi=1} = 0. \quad (15)$$

Из (14) и (15) определив w , находим значение потенциальной энергии изгиба:

$$U = \frac{D}{2l^3} \int_{-1}^1 \left(\frac{d^2 w}{d\xi^2} \right) d\xi = U(x, \tau). \quad (16)$$

Значения x и τ , соответствующие экстремумам $U(x, \tau)$ удовлетворяют уравнениям:

$$\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial \tau} - \frac{\partial U}{\partial \tau} - \frac{\partial F}{\partial x} = 0; \quad F(x, \tau) = 0, \quad (17)$$

где функцией $F(x, \tau)$ устанавливается зависимость между x и τ на основании условия равновесия $\Sigma Z = 0$. В развернутом виде уравнения (17) записываются так:

$$(ax + b\tau - c)N \sqrt{\frac{x}{2\tau}} - (bx + e\tau - f) \left(M + \frac{N}{2} \sqrt{\frac{2\tau}{x}} \right) = 0; \quad (18)$$

$$x \left(M + N \sqrt{\frac{2\tau}{x}} \right) = 1,$$

где

$$a = \frac{\lambda^2}{45} + \frac{\lambda\delta}{63} + \frac{163\delta^2}{56700}; \quad e = \frac{16}{45}\delta^2; \quad b = \frac{4}{45}\delta\left(\lambda + \frac{5}{14}\delta\right);$$

$$f = \frac{\delta}{16}\left(1 + \frac{2}{3}\delta\right); \quad c = \frac{\lambda}{64} + \frac{\lambda\delta}{96} + \frac{\delta}{180} + \frac{29\delta^2}{7680};$$

$$M = \lambda + \frac{\delta}{6}; \quad N = \lambda - \frac{\delta}{2}. \quad (19)$$

Найденные из (18) и (19) коэффициенты κ и τ зависят от безразмерных величин δ и λ , определяемых формулами (7) и (11).

Пределы изменения δ можно установить, исходя из следующих соображений: $\delta_{\min}$ соответствует случаю, когда $q(0) = 0$, что дает $\delta_{\min} = -1$; $\delta_{\max}$ соответствует случаю, когда $\tau = 0$ (гипотеза Винклера), причем $\delta_{\max}$ зависит от λ . О пределах изменения λ можно сказать, что $\lambda_{\min} = \ln 12 \approx 2,5$, когда $(b/l)_{\min} = 3$. $\lambda_{\max}$ устанавливается практически соображениями о допускаемом максимальном отношении размеров плиты $(b/l)_{\max}$. Например, если мы примем $(b/l)_{\max} = 20$, то получим

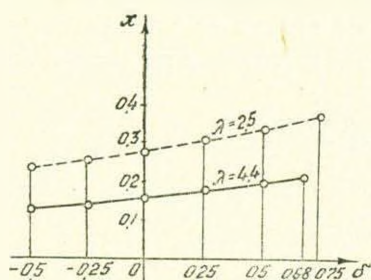


Рис. 4.

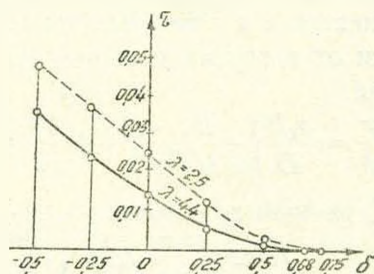


Рис. 5.

$\lambda_{\max} = 4,4$, значит параметр λ изменяется от 2,5 до 4,4. Исходя из (18), построены кривые, выражающие зависимости κ и τ от δ для значений $\lambda = 2,5$ и $\lambda = 4,4$ (рис. 4 и 5).

Найденные таким образом κ и τ относятся к частной задаче об изгибе балки при нагрузках, изображенных на рис. 3. Если балка будет находиться под действием произвольной симметричной относительно середины нагрузки p , то величины κ и τ могут быть определены следующим образом. Полагая $p = p_0 \cdot f(\xi)$, где p_0 — среднее значение нагрузки, $f(\xi)$ — безразмерная функция, будем аппроксимировать изгиб балки от нагрузки p ближайшим чистым изгибом. Это означает, что изгиб балки сопоставляем с чистым изгибом при отпоре основания по (12) и прогибе по (10), в которых параметр δ выбираем в зависимости от нагрузки p надлежащим образом. Если δ получает приращение $d\delta$, то по принципу возможных перемещений

$$dA_p + dA_q - dU = 0, \quad (20)$$

где dA_p — элементарная работа внешней нагрузки p , dA_q — элементарная работа упругого отпора, $-dU$ — элементарная работа внутрен-

них сил балки, равная приращению потенциальной энергии с обратным знаком.

Имеем

$$dA_p = l \int_{-1}^1 (p d\omega) d\xi; \quad dA_q = -l \int_{-1}^1 (q d\omega) d\xi,$$

где из (10):

$$d\omega = \frac{p_0}{k_0} \left(\frac{1}{2} - \xi^2 \right) d\xi.$$

Потенциальная энергия воображаемого чистого изгиба равна

$$U = 2 \cdot \frac{1}{2} M_0 \varphi_0,$$

где

$$M_0 = \frac{D(1+\mu)}{R}; \quad \varphi_0 = \frac{l}{R}.$$

Учитывая зависимость (7) между R и δ , из (20) находим:

$$\delta = \frac{4}{1 + \frac{16}{\sigma}} \int_0^1 f(\xi) \left(\frac{1}{2} - \xi^2 \right) d\xi, \quad (21)$$

где σ — относительная гибкость балки, определяемая формулой:

$$\sigma = 3 \pi \cdot \frac{E_0}{E} \cdot \frac{1-\mu}{1-\mu_0^2} \cdot \frac{l^3}{h^3} \approx 10 \cdot \frac{E_0}{E} \cdot \frac{l^3}{h^3}. \quad (22)$$

При сосредоточенных силах интеграл в правой части (21) нужно понимать в смысле Стильбеса, т. е. если кроме нагрузки p имеются еще силы P_i , приложенные в точках $\xi = \xi_i$, то (21) примет вид:

$$\delta = \frac{4}{1 + \frac{16}{\sigma}} \left[\int_0^1 f(\xi) \left(\frac{1}{2} - \xi^2 \right) d\xi + \frac{1}{2p_0 l} \sum P \left(\frac{1}{2} - \xi^2 \right) \right]. \quad (23)$$

Таким образом, задача определения двух коэффициентов k и t упругого основания при произвольной симметричной нагрузке осуществляется следующим образом. По заданным размерам плиты и нагрузке находим λ из (11), δ из (21) или (23). Далее, из (18) находим параметры α и τ , а по формулам (14) — коэффициенты k и t . Если построить семейства кривых $\beta_1 = \tau \alpha = \varphi_1(\lambda, \delta)$ и $\beta_2 = \lambda \alpha = \varphi_2(\lambda, \delta)$, то оказывается, что в интервале от $\delta = -0,5$ до $\delta = +0,75$ эти кривые образуют пучки близко расположенных линий (рис. 6 и 7), которые при изменении λ от $\lambda = 2,5$ до $\lambda = 4,4$ практически не зависят от λ и с достаточной точностью могут быть аппроксимированы при помощи формул:

$$\beta_1 = \tau \alpha = 0,19 \delta^2 - 0,261 \delta + 0,0893; \quad (24)$$

$$\beta_2 = \lambda \alpha = 0,12 \delta^2 + 0,3 \delta + 0,703, \quad (25)$$

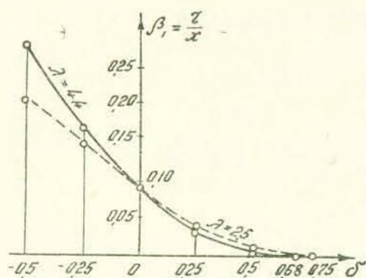


Рис. 6.

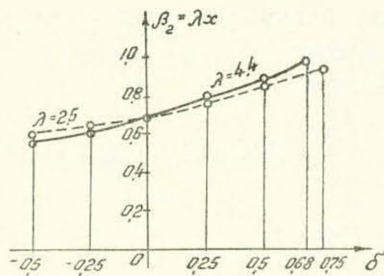


Рис. 7.

в которых числовые коэффициенты определены методом наименьших квадратов. На основании (24) и (25) для основных коэффициентов получим следующие значения:

$$k = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{E_0}{1-\mu_0^2} \frac{1}{l\lambda} \beta_1^2; \quad t = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{E_0}{1-\mu_0^2} \frac{1}{\lambda} \beta_1 \beta_2. \quad (26)$$

Из (26) следует, что оба коэффициента k и t обратно пропорциональны величине λ , характеризующей протяженность плиты в направлении оси y . Это означает, что абсолютные прогибы w будут пропорциональны λ . Однако все остальные расчетные величины—изгибающие моменты, поперечные силы, упругие отпоры, относительные прогибы

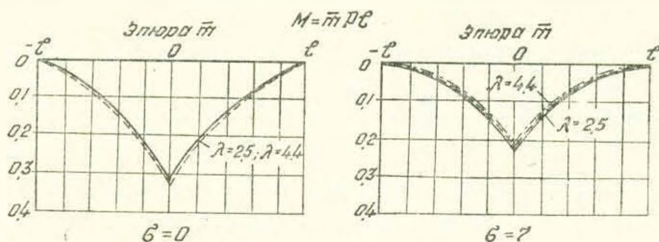


Рис. 8.

и углы наклона практически мало зависят от λ , так как в выражениях названных величин λ будет участвовать в виде произведения λx . На рис. 9 приведены эпюры изгибающего момента для балки, в середине пролета которой приложена сосредоточенная сила P , при $\lambda = 2,5$ и $\lambda = 4,4$; $\sigma = 0$ и $\sigma = 7$. Расчеты проведены для значений x и τ , взятых из рис. 4 и 5. Сплошными линиями воспроизведены эпюры, построенные по данным М. И. Горбунова-Посадова [3].

Ер. ПИ им. К. Маркса

Поступило 5. II. 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Варданян В. В. К теории расчета плит на упругом основании. Сб. тр. IV Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин, Ереван, 1963.
2. Галин Л. А. Контактные задачи теории упругости. Гостехиздат, Москва, 1953.
3. Горбунов-Посадов М. И. Расчет конструкций на упругом основании, Стройиздат, М., 1953.

Э. А. АТАЯН

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА
НА ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ БАСЕЙНА РЕКИ АРАКС

Сток с территории верховьев реки Аракс до Маркары, ниже впадения реки Севджур, происходит в сложных природных условиях. Кроме климатических факторов, значительную роль в формировании стока рассматриваемой территории играет геологическое строение водосбора. Климат территории континентальный, сухой с небольшим количеством осадков, в основном, выпадающих в весенний период. Зимние осадки составляют от 10 до 20% годовых, за исключением небольшой вершинной части гор, где твердые осадки достигают 60—70%. Однако, эффект в формировании стока твердых осадков, выпадающих на средних высотах, значителен, так как таяние аккумулярованного за зиму снега происходит в продолжении короткого времени, весной, при влажной почве, поэтому доля испарения и инфильтрации сводится к минимуму.

На всей рассматриваемой территории осадки подчиняются одной общей закономерности: они хорошо увязываются с высотой местности, причем, в средних высотах градиент значительный, а в нижних (до 1000 м) и верхних (выше 2500 м) он резко уменьшается и почти доходит до нуля.

Другим решающим фактором в формировании стока, в данных условиях, является геологическое строение водосбора. Оно может в корне изменить перераспределение стока.

Влияние геологического фактора усиливается на западном и южном склонах массива Арагац. На этих склонах, в полосе от 3000 до 2000 м выходят многочисленные родники. Как правило, они группируясь становятся истоком малых водотоков, как-то: Талышский лог, Нарышт-дере, Ашнак-дереси, Талинский лог, Селав-Мастара и др. Однако, все эти водотоки, за исключением Селава Мастара до реки Севджур не доходят. Дебит этих родников невелик, большая часть влаги на этих склонах инфильтруется по трещинам коренных пород андезитов и андезито-базальтов, или исчезает в каменных россыпях. Таким образом все лога в большую часть года сухие, в них появляется вода только при таянии снегов и сильных ливней. Только наибольший из водотоков Селав-Мастара, круглый год несет родниковые воды, с почти постоянным дебитом 84 л/сек.

Для выявления закономерностей формирования и распределения стока в верховьях реки Аракс, в бассейне Ахуряна и на Арагацском массиве, использованы данные гидрологических наблюдений по 26 пунктам. Установлена связь стока со средне-взвешенной высотой водосбора. Она характеризуется кривой, показанной на рис. 1.

При одинаковых геологических условиях распределение стока в рассматриваемом бассейне зависело бы только от распределения осадков и несколько от других климатических характеристик. Однако,

5. ТН, № 5

различие в геологическом строении бассейна по своему влияет на перераспределение его стока. Вследствие этого, на одних частях территории он меньше чем должен быть, а в других больше нормы. Поэтому нижняя часть графика, ниже отметки 2700 м имеет две ветви,

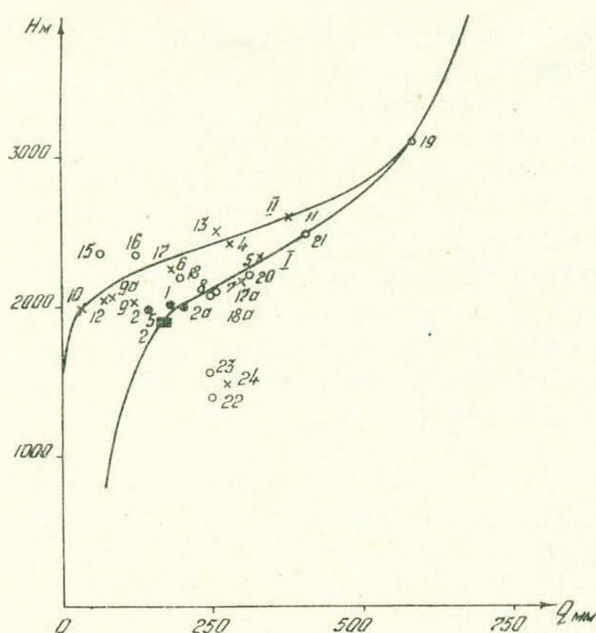


Рис. 1. Кривая зависимости стока от средней взвешенной высоты водосбора.

На рис. 1 точки 5, 7 и 8 относятся к верхнему течению реки Ахурян, до ее выхода на Ширакскую равнину. Все три точки почти лежат на первой ветви кривой $q = f(H_{\text{ср}})$, где q — слой стока в м.м. От этой кривой отклонилась точка, соответствующая створу Гукасына. Следует полагать, что отклонение этого створа от общего положения точек, вызвана непродолжительностью наблюдений.

Ниже села Ахурик река Ахурян выходит на Ширакскую равнину, где в русле и на пойме теряется значительная часть стока. Здесь река принимает ряд притоков, которые, протекая на большом расстоянии по аллювиям, сливаются с рекой Ахурян, также теряя в свою очередь значительное количество воды.

Все точки, соответствующие реке Ахурян ниже Ахурика до устья: Карангу (точка 20), Карсчай (точка 22), Гарновит (точка 13), Мастара (точка 14), легли на графике значительно левее, составляя новую ветвь. Указанная зона интенсивной инфильтрации охватывает не только аллювиальную равнину, но и области распространения сильно трещиноватых андезито-базальтов, покрытых мощным слоем каменных россыпей. К последним относятся бассейны рек Гарновит и Мастара. Точка 9, соответствующая гидрологическому посту Айкандзор, легла между двумя ветвями; это объясняется тем, что водосбор этого поста состоит из двух видов областей питания: слабый

и интенсивной инфильтрации. Если исключить из водосбора площадь до поста Ахурик и соответственно уменьшить сток, то точка 9а, соответствующая стоку с оставшейся площади, значительно ближе ко второй ветви кривой. Модуль стока реки Касах со средне-взвешенной высотой находится в обратной связи. Иначе говоря, с повышением местности модуль стока уменьшается. Это парадоксальное явление вызвано тем, что в пределах Апаранского плато река Касах протекает по наносному дну бывшего озера, теряя значительную часть стока, пришедшего сюда с северной части горы Арагац. Далее, с увеличением площади водосбора, уменьшается влияние этой отдачи в грунт, поэтому точки 15—18 лежат (по высоте) в убывающем порядке. Нетрудно заметить, что при исключении водосбора и соответствующего стока до Апарана из данных гидрологических постов Зовуни (точка 17а) и Аштарак (точка 18а), эти точки попадают на первую ветвь кривой. Очевидно, с этой части бассейна имеет место нормальное для района стокообразование.

Еще сложнее обстоит дело со стоком реки Севджур. Она принимает начало в Араратской долине, из многочисленных групп мощных родников, фактически не имеющих собственного водосбора. Если приписать всю безводную область западного и южного склонов Арагацкого массива к общей площади 2620 км^2 у водомерного поста Зейва, расположенного почти у истоков, то точки, соответствующие постам на реке Севджур лягут значительно правее, резко выделяясь от всех остальных точек на графике.

Имеется предположение, что в районе Севджура выклиниваются также и воды, инфильтрующиеся в пределах Ширакской равнины (точки 10, 11) и в бассейне р. Карсчай (точка 12). Это можно усмотреть и на графике $q = f(H_{cp})$, где точка 2, соответствующая стоку поста Аракс-Каракала, отклонилась от кривой влево на 15%. При учете стока реки Севджур у устья последней (с. Ранчлар), точка 2а попадает на кривую. Таким образом становится очевидным, что реки Аракс, Ахурия и Севджур, включая также весь Арагацкий массив, имеют один общий подземный бассейн. Суммарный сток с этой территории, с площади 24940 км^2 , равен $129 \text{ м}^3/\text{сек}$, или $5,2 \text{ л/сек}$ с квадратного километра.

В бассейне Касаха не вся площадь водосбора реки подчиняется полученной закономерности распределения стока. Апаранское плато и приустьевой участок бассейна реки не только не участвуют в образовании стока, но и поглощают значительную часть его, пришедшего со склонов Арагаца и с возвышенностей Памбакского хребта. Поэтому при подсчете стока по предложенной кривой $q = f(H_{cp})$, следует исключить площадь до гидрометрического створа Апаран. Здесь сток следует брать по данным поста. Исходя из этого в рассматриваемом случае получено $q = 226 \text{ мм}$. Что касается стока до поста Апаран, то, надо полагать, что на склонах гор формирование стока подчинено той же закономерности, что и на соответствующих высотных зонах осталь-

ной части бассейна Касаха. Но в силу интенсивной инфильтрации на Апаранском плато, размеры и характер которой не изучен, для данной водосборной площади следует исходить из показаний поста Апаран. Средний многолетний расход здесь равен 26,1 млн. м³ (0,83 м³/сек). Таким образом сток со всего бассейна реки Касак будет 269 млн. м³ ($q = 184$ мм). Годовые осадки в этом бассейне составляют 827 млн. м³ ($q = 559$ мм). Следовательно коэффициент стока получится $\eta = 0,33$. Коэффициент стока реки Касак, при исключении стока и площади водосбора до Апарана, будет равен $\eta = 0,44$. При сравнении расчетных данных с показаниями водомерных постов имеем следующую картину. Суммарный сток по постам Касак — Аштарак, Амберд — Бюракан и Шахверд — Парби будет 8,59 м³/сек, что соответствует годовому стоку 270 млн. м³. Отклонение расчетного расхода от наблюдаемого составляет 0,9 млн. м³ или 0,3%. Вся остальная территория Арагацкого массива, площадью 3620 км² в формировании стока подчиняется второй ветви кривой $q = f(H_{\text{ср}})$. Как усматривается из рис. 1, в зоне выше 2700 м образование стока на всех склонах горного массива совершенно одинаково. Ниже этой полосы, модуль стока западного склона резко падает и с высоты 1900 м стокообразование почти прекращается. Здесь выпавшие осадки почти полностью просачиваются или испаряются.

По указанному графику определен предполагаемый сток, который имел бы место при отсутствии интенсивной инфильтрации. В этом случае годовой сток со всей территории был бы равен 200 млн. м³ ($Q = 6,37$ м³/сек, $q = 51$ мм). Фактически здесь стекает р. Карангу, средний многолетний сток которой у устья (с. Гарибджанян) составляет всего лишь 35 млн. м³. По кривой же получен 113 млн. м³, т. е. модуль стока вместо фактически наблюдаемого 1,1 должен быть 3,5, или вместо фактического 34 мм слоя стока, должно быть 111 мм. До выхода на Ширакскую равнину река Карангу действительно имеет водность, соответствующую графику, об этом свидетельствуют ее притоки речки Гехадзор, модуль которой равен $\mu = 3,3$ л/сек км² и Гарновит ($\mu = 8,2$ л/сек км²). Учитывая общий дебит родников, выходящих на западном и южном склонах горного массива Арагац, его водный баланс будет иметь вид:

$$W_{\text{с}} = W_{\text{к}} + W_{\text{зю}} - W_{\text{кар}} - W_{\text{родн}} \pm \Delta W,$$

где W — объем стока, а индексы С, К, ЗЮ, КАР и Р, соответственно означают Севджур, Касак, Западный и Южный склоны Арагаца, Карангу и родники. Подставляя численные значения получим:

$$\Delta W = 328 \text{ млн. м}^3.$$

В эту величину вошли воды, возвратившиеся из полей орошения. Однако, как показывает сравнение данных рек Аракс и Севджур, рассматривать сток каждой из них в отдельности будет неправильно. При этом, по результатам исследований, проведенных и в Институте водных

проблем АН Армянской ССР, возвратные воды с этой территории составляют 100—120 млн. м³. Таким образом, по приближенным расчетам в р. Севджур поступают извне воды порядка 200 млн. м³.

ИВП АН Армянской ССР

Поступило 5.II, 1963

Б. С. ГУКАСЯН

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РЕЗЦА НА УЗЛЫ ТОКАРНОГО СТАНКА

Процесс резания часто протекает весьма неустойчиво вследствие возникновения вибраций системы станок-деталь-инструмент. Вибрации отрицательно влияют на точность обработки, на качество обрабатываемой поверхности, на стойкость режущего инструмента и на производительность станка.

Вибрации, влияющие на состояние резца, могут быть следствием собственных колебаний узлов станка, индуктивных колебаний от работы соседних станков, вынужденных колебаний от работы механизмов станка и, наконец, автоколебаний, свойственных процессу резания. В этой заметке освещаются исследования автора в отношении характера распространения колебаний резца на узлы токарного станка.

Резец был закреплен на трехкомпонентном токарном динамометре. В качестве электроизмерительного средства была использована аппаратура отличающаяся высокой чувствительностью и стабильностью показаний. Она состояла из приемного и преобразующего устройства, месдозы, трехканального усилителя типа ПЭТ-3В-М, регистрирующего устройства, осциллографа Н-102-Т, соединительных экранированных проводов. Месдоза представляла собой стальной стакан из стали марки 65Г, внутри которого устанавливался чувствительный элемент — стальная мембрана диаметром 23 мм, толщиной 0,5 мм, со штоком диаметром 2 мм, длиной 10 мм (рис. 1).

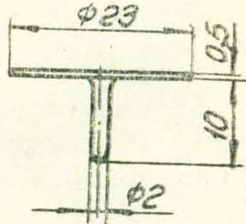


Рис. 1. Конструкция мембраны месдозы.

Стакан прикрывался конусной крышкой полусферической формы. На мембране были установлены проволочные датчики с сопротивлением 200 ом с базой 10 мм. Дно стакана имело разную толщину (d) в зависимости от требуемого диапазона действия силы (рис. 2).

Необходимую толщину дна подбирали опытным путем, по величине отклонения луча осциллографа. В опытах автора (d) изменялась в пределах от 0,8 до 1,5 мм. Для регистрации положительных и отрицательных перемещений, мембране 5 был дан предварительный упругий прогиб натяжением гайки 4 и контргайки 3. Тарировка датчиков производилась на специальном тарировочном стенде, при помощи кольцевых динамометров.

проблем АН Армянской ССР, возвратные воды с этой территории составляют 100—120 млн. м³. Таким образом, по приближенным расчетам в р. Севджур поступают извне воды порядка 200 млн. м³.

ИВП АН Армянской ССР

Поступило 5.II, 1963

Б. С. ГУКАСЯН

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ РЕЗЦА НА УЗЛЫ ТОКАРНОГО СТАНКА

Процесс резания часто протекает весьма неустойчиво вследствие возникновения вибраций системы станок-деталь-инструмент. Вибрации отрицательно влияют на точность обработки, на качество обрабатываемой поверхности, на стойкость режущего инструмента и на производительность станка.

Вибрации, влияющие на состояние резца, могут быть следствием собственных колебаний узлов станка, индуктивных колебаний от работы соседних станков, вынужденных колебаний от работы механизмов станка и, наконец, автоколебаний, свойственных процессу резания. В этой заметке освещаются исследования автора в отношении характера распространения колебаний резца на узлы токарного станка.

Резец был закреплен на трехкомпонентном токарном динамометре. В качестве электроизмерительного средства была использована аппаратура отличающаяся высокой чувствительностью и стабильностью показаний. Она состояла из приемного и преобразующего устройства, месдозы, трехканального усилителя типа ПЭТ-ЗВ-М, регистрирующего устройства, осциллографа Н-102-Т, соединительных экранированных проводов. Месдоза представляла собой стальной стакан из стали марки 65Г, внутри которого устанавливался чувствительный элемент — стальная мембрана диаметром 23 мм, толщиной 0,5 мм, со штоком диаметром 2 мм, длиной 10 мм (рис. 1).

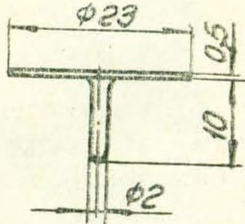


Рис. 1. Конструкция мембраны месдозы.

Стакан прикрывался конусной крышкой полусферической формы. На мембране были установлены проволочные датчики с сопротивлением 200 ом с базой 10 мм. Дно стакана имело разную толщину (d) в зависимости от требуемого диапазона действия силы (рис. 2).

Необходимую толщину дна подбирали опытным путем, по величине отклонения луча осциллографа. В опытах автора (d) изменялась в пределах от 0,8 до 1,5 мм. Для регистрации положительных и отрицательных перемещений, мембране 5 был дан предварительный упругий прогиб натяжением гайки 4 и контргайки 3. Тарировка датчиков производилась на специальном тарировочном стенде, при помощи кольцевых динамометров.

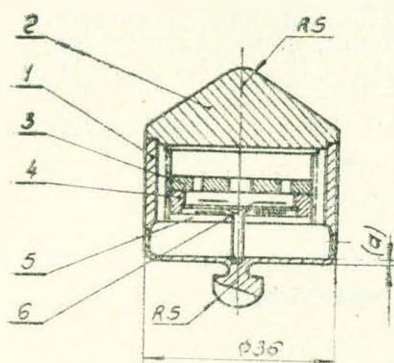


Рис. 2. Поперечный разрез мездозы:
1—стакан; 2—конусная крышка;
3—контргайка; 4—гайка; 5—мем-
брана; 6—датчики сопротивления.

Тарировкой датчиков было установлено, что между усилиями и прогибами имеется линейная зависимость.

Электротензометрический преобразователь состоял из стабилизированного выпрямителя и трехканального усилителя. Прибор позволял измерять относительные деформации в трех точках в пределах $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-5}$ до $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ с плавной регулировкой чувствительности по диапазону.

Диапазон частот регистрируемых деформаций колебался в пределах от 0 до 1500 герц.

Характеристика примененных в опытах вибраторов приводится в табл. 1

Таблица 1

№№ комплекта	Тип вибратора	№ датчика	№ вибратора	Чувствительность вибратора в мм/ма	Частота собственных колебаний вибратора в герцах
1	VIII МОБ2	X ₁	67667	13,7	1200
		Y ₁	67721	13,7	1200
		Z ₁	37798	13,7	1200
2	V МОБ2	X ₂	66105	2,7	2000
		Y ₂	66205	2,7	2000
		Z ₂	32486	2,5	2000

С целью обеспечения плотного прилегания датчика к вибрирующим узлам станка мездоза пригружалась стальной болванкой весом 15 кг (рис. 3). При записи вертикальных или горизонтальных колебаний мездозы с пригрузом ставились вертикально или горизонтально. В процессе исследований частота ν колеблющегося узла всегда была ниже собственной частоты колебаний b вибратора ($0 < \nu/b < 0,7$).

На трехкомпонентном токарном динамометре был установлен электровибратор, возбуждающий в резце колебания по вертикали с постоянной частотой 100 герц (рис. 4). Изменением зазора между электромагнитным сердечником вибратора и резцом, можно было создавать возбуждающее периодическое вертикальное усилие от 5 до 40 кг. Создавая постоянные вертикальные колебания резца, были записаны осциллограммы колебаний узлов станка: при его полной остановке; при вращении электродвигателя; при вращении шпинделя; при перемещении каретки.

До начала опытов были определены характер и частота собствен-

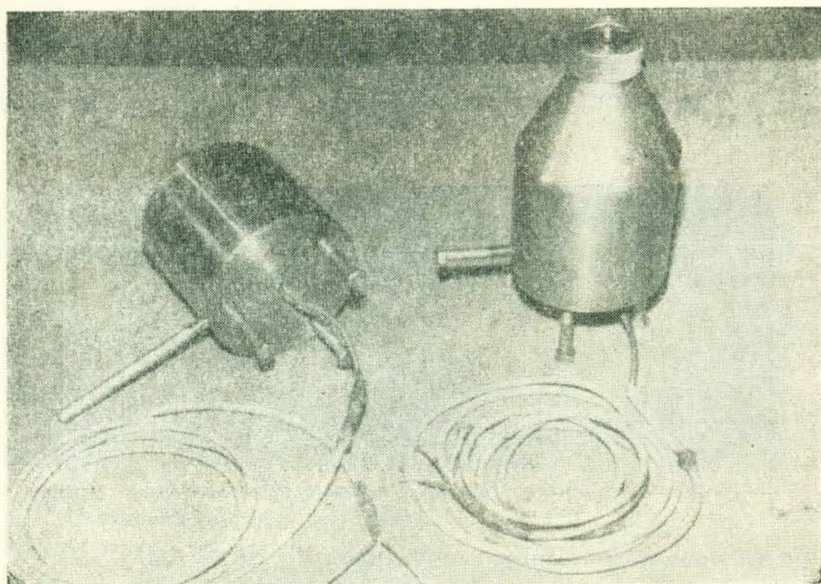


Рис. 3. Общий вид мессдозы с пригрузом весом 15 кг

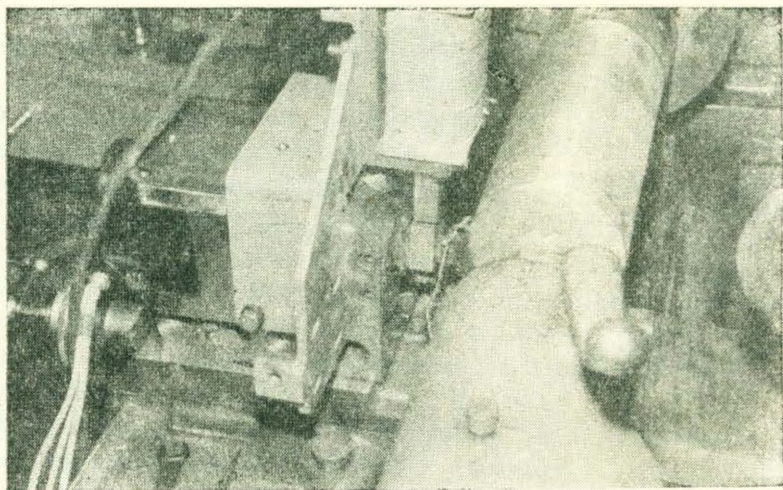


Рис. 4. Общий вид трехкомпонентного токарного динамометра с установленным на нем электровибратором.

ных колебаний отдельных узлов станка, путем резкого вывода их из состояния равновесия. Были определены частоты собственных колебаний шпинделя, станины, корпуса задней бабки и каретки с суппортом.

На рис. 5 показана осциллограмма собственных вертикальных колебаний станины и станка.

Частота собственных колебаний определялась на основании осциллограммы по следующей формуле:

$$\nu = \frac{f \cdot n}{t}, \quad (1)$$

где f — частота отметчика времени (в опытах $f = 500$ герц), t — число полных периодов отметчика времени, n — число колебаний за время t .

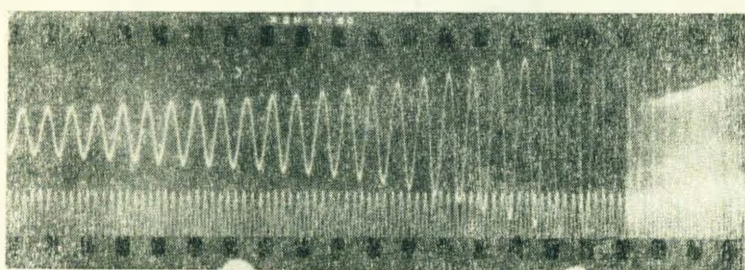


Рис. 5. Осциллограмма собственных вертикальных колебаний станины.

Коэффициент затухания вычислялся по формуле:

$$\gamma = \nu \ln \frac{x_n}{x_{n+1}}, \quad (2)$$

где x_n, x_{n+1} — значение смещения на один полный условный период времени.

По опыту для станины станка (рис. 5) $n = 30, t = 100$ и согласно (1) частота колебаний $\nu = 150$ герц.

Коэффициент затухания колебаний по осциллограмме (рис. 5) оказался равным $\gamma = 13,7 \text{ сек}^{-1}$; время затухания $\tau_\gamma = 0,073 \text{ сек}$.

Частотные характеристики узлов исследуемого станка типа 1К62, полученные на основании осциллограмм, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Частота колебаний	Шпиндель	Станина	Задняя бабка	Суппорт
	В герцах			
Вертикальных (ν_z)	256—260	150—155	150—160	110—115
Горизонтальных (ν_y)	185—190	120—125	80—85	65—70

Автором была проведена другая серия испытаний с целью изучения влияния вынужденных колебаний резца (резкодержателя) на колебания узлов станка в случае: работы вибратора; одновременной работы вибратора с электродвигателем станка; одновременной работы вибратора, электродвигателя и шпинделя станка. В процессе этих испытаний были записаны порядка 70 осциллограмм вертикальных и горизонтальных колебаний узлов станка. Для иллюстрации на рис. 6 показана осциллограмма вынужденных колебаний (горизонтальная компонента) станины, шпинделя и резкодержателя.

Из анализа осциллограмм видно, что от вращения электродвигателя создаются дополнительные вынужденные колебания, влияющие на основное колебание в особенности на шпиндельном узле. Частота колебания от двигателя станка лежит в пределах $220-240$ герц, амплитуда не превышает 3 микрона, частота горизонтальных колебаний составляет $200-250$ герц.

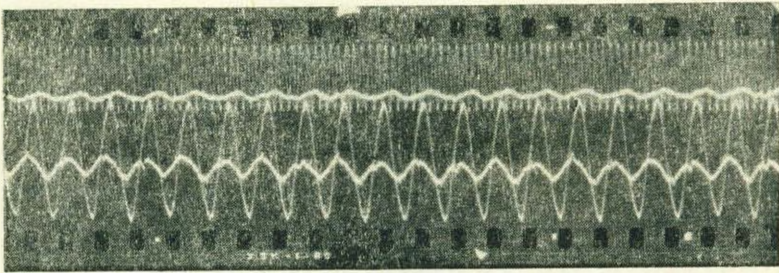


Рис. 6. Осциллограмма вынужденных колебаний резцодержателя, станины, шпинделя станка. Источник вынужденных колебаний — электровибратор с вертикальным колебанием частотой 100 герц.

Анализ результатов проведенных экспериментальных работ позволяет сделать следующие выводы:

1. Вынужденные колебания, возникающие на резцодержателе, распространяются на остальные узлы станка, в основном сохраняя характер первоначального колебания, причем частота колебаний передается без изменений, а амплитуда зависит от величины энергии, возбуждающего колебания;

2. Вынужденные колебания резцодержателя по вертикальному направлению возбуждают в остальных узлах колебания не только по вертикальному, но и по горизонтальному направлению. Наблюдаемый некоторый сдвиг фаз объясняется демпфированием стыковых соединений узлов станка. Амплитуда колебания в горизонтальном направлении в основном уменьшается, однако находится в определенной зависимости от жесткости узлов;

3. Вынужденные колебания в отдельных узлах, возникающие от различных факторов (электродвигатель, шпиндель, каретка, процесс резания и т. д.) могут сложиться, и вследствие малой разницы частот создать эффект биения, что зачастую вредно влияет на работу станка.

Анализ осциллограмм подтвердил, что частота вынужденных колебаний отдельных узлов станка при разных условиях его работы не совпадает с частотами собственных колебаний узлов станка.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Էջ

Հաւսնդական տեղեկագրեր

Պ. Ա. Մարտոսյան. Վարդապետներով հաղորդված բազմաթիվ հարցեր . . . 3

Էներգետիկա

Վ. Գ. Բեգլարով. Հիդրոէլեկտրակայանների ունեցող էներգետիկայի մեծածախ հաշվարկ-
ման օպերատիվ բաշխումը գինարկի փոխարժեքի մեթոդով . . . 11

Գ. Ա. Հայրապետյան. Էլեկտրահաղորդման ոչ սինխրոն միջխառնման ղեկավարման
տեխնիկական կարգի միջոցառումները հարցեր . . . 23

Վ. Ս. Նաչատրյան. Էներգետիկայի բարձրագույն դասն ունեցող հիդրոէլեկտրակայան կորուստի
որոշման հարցի վերաբերյալ . . . 31

Լ. Ա. Աղաջյան. Աղտա-մխոցային շարժիչների կարգավորման մի քանի հարցեր . . . 41

Շինարարական կոնստրուկցիաներ

Լ. Ս. Վլասով. Կերամիկ տանիքախճուղիների հեծանների կոշտությունից փորձնական ու-
սումներով թյունը երկարատև բեռնվածությունից դեպքում . . . 51

Գիտական հոդվածներ

Վ. Վ. Վարդանյան. Առաձգական հիմքի վրա ուղղանկյուն սալերի ղեկավարման ծնունդի
հաշվարկի վերաբերյալ . . . 59

Լ. Ա. Արսյան. Արաքսի վերին հոսանքի ավազանի հոսքի ձևավորման և տեղաբաշխ-
ման աստիճանական թյունները . . . 65

Բ. Ա. Վուկասյան. Կտրիչի ստիպողական տատանումների տարածումը խառնարանի
հատուկ միջավայրում . . . 69

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Вычислительная техника

<i>П. А. Матевосян.</i> Множительное устройство на варисторах	3
---	---

Энергетика

<i>В. Г. Бегляров.</i> Оптимальное распределение генерируемых мощностей в энергосистемах с гидростанциями методом динамического поиска	11
<i>Г. А. Айрапетян.</i> Некоторые вопросы несинхронных автоматических повторных включений межсистемных линий электропередач	23
<i>В. С. Хачатрян.</i> К вопросу об определении потерь мощности в высоковольтных сетях энергосистемы	31
<i>Л. А. Агасян.</i> Некоторые вопросы внутренней регулировки свободнопоршневых двигателей	41

Строительные конструкции

<i>Л. С. Власов.</i> Экспериментальное исследование жесткости керамзитожелезобетонных балок при длительном действии нагрузки	51
--	----

Научные заметки

<i>В. В. Варданян.</i> К расчету прямоугольных плит на упругом основании при цилиндрическом изгибе	59
<i>Э. А. Атаян.</i> Особенности формирования и распределения стока на верхней части бассейна реки Аракс	65
<i>Б. С. Гукасян.</i> Распространение вынужденных колебаний резца на узлы токарного станка	69

