

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Издаётся с 1947 г

Խ Մ Ր Ա Դ Ր Ա Կ Ա Ն Կ Ո Ջ Ե Գ Ի Ա

Կուսյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Ազոնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Ալեքսենյակի Վ. Վ., Անանյան Ա. Կ., Գորոյան Տ. Ա., Չաղոյան Մ. Ա., Կուզե-
րով Ա. Գ., Տեր-Ազարի Ի. Ա., Փինաճյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Պատասխանատու քարտուղար Ստեփանյան Զ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян А. В. (ответ. редактор), Азони Г. Т. (зам. ответ. редактора),
Алексеевский В. В., Анания А. К., Гороян Т. А., Забоян М. А., На-
заров А. Г., Пинаджян В. В. (зам. ответ. редактора), Тер-Азарьян М. А.
Ответственный секретарь Степанян З. К.

Խմբագրության հասցեն՝ Երևան-19, Բարեկամության փող. 24

Адрес редакции: Ереван-19, ул. Барекамутян, 24г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. К. РОСТОМЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕКСТИЛЬНОГО
 ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО
 МОДЕЛИРОВАНИЯ

Существенной особенностью современных методов исследования процессов функционирования текстильного оборудования является формализация их анализа при помощи статистических моделей, описывающих изменение состояния системы. Вид модели зависит не только от природы реального объекта, но и от тех задач, ради решения которых она создается [1]. Использование статистических моделей применительно к анализу процессов функционирования текстильного оборудования, в данном случае текстильно-отделочного оборудования, позволяет выявить оптимальные условия его работы. Более того, представляется возможным не только оптимально осуществлять сами процессы, но и управлять ими при нарушении режимов работы или изменении отдельных параметров [2].

В настоящей работе разработана статистическая модель, которая воспроизводит процесс-оригинал в смысле его функционирования во времени, причем, имитируются элементарные явления, составляющие производственный процесс с сохранением его логической структуры и последовательности протекания во времени.

Логическая схема модели (рис. 1) представляет собой совокупность блоков и счетчиков. Модель обладает блоком исходных данных, где хранятся нижние и верхние значения каждого из варьируемых параметров, а также степень их изменения. Каждой основной операции, совершаемой в реальных условиях, соответствует блок в модели, который хранит в себе определенные функциональные параметры, полученные при ее настройке. На вход блока поступает некоторая информация от других блоков. Внутри его на основании полученной информации, а также с помощью случайных чисел (если соответствующая операция не детерминирована) вырабатываются определенные числа, характеризующие выполнение данной операции. Иными словами, блоки воспроизводят элементарные акты во времени и моделируют работу обслуживающего и ремонтного персонала. Каждый оперативный блок содержит одну или несколько уставок. Информация может быть передана по другому адресу, если какая-либо из величин превышает соответствующую уставку.

Разработанная нами модель включает в себя 21 блок, часть которых моделирует работу отделочного агрегата, другая — нарушения нор-

мального течения процесса. Для моделирования случайных процессов в ней имеются блоки случайных чисел (БСЧ). Предусмотрены также 50 счетчиков, часть которых участвует в управлении работой модели, а в остальных накапливается информация об отдельных технико-экономических показателях процесса.

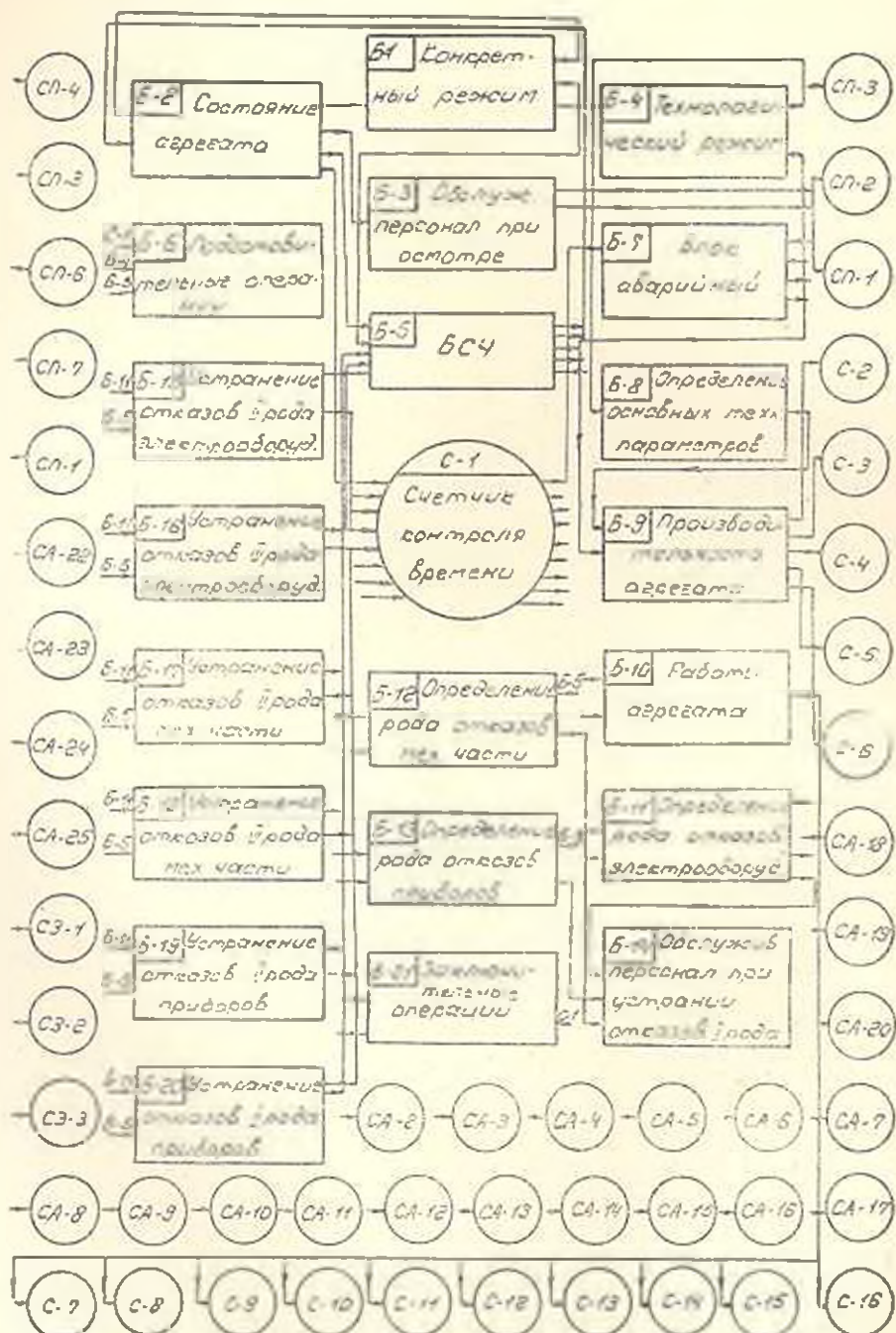


Рис. 1. Блок-схема математической модели функционирования отсечного агрегата.

Для наглядности рассмотрим модель со следующих позиций: 1) подготовительные операции; 2) рабочий процесс; 3) заключительные операции; 4) отклонения течения производственного процесса от нормального.

1. Составная часть модели, имитирующая подготовительные операции, состоит из блоков Б-1 (блок конкретного режима), Б-2 (состояния агрегата), Б-3 (обслуживающего персонала), Б-4 (технологического режима) и Б-6 (подготовительных операций), а также счетчиков СП-1—СП-7, где фиксируются затраты времени на подготовительные операции и восстановление работоспособности агрегата. Кроме того, для имитации работы этой части модели участвуют Б-5 (блок случайных чисел) и С-1 (счетчик контроля времени), которые являются общими для всей модели.

Команда запуска модели поступает в Б-1, который хранит в себе график работы агрегата при одно-двух-трех-сменном режиме работы с учетом капитальных, средних и текущих ремонтных работ. Там же хранятся данные о технологическом режиме работы и количестве обслуживающего и ремонтного персонала. Из Б-1 в Б-2 сообщается время начала работы и посылается запрос о состоянии агрегата. В Б-2 выясняется состояние агрегата, которое может быть рабочим (нормальным), нерабочим, когда простой может длиться до 0,2 смены, и нерабочим с длительностью простоя более смены. Для определения состояния агрегата из Б-2 идет запрос в Б-5 (БСЧ), где определяется какое из указанных состояний может иметь место в данном случае и сообщается Б-2. В первом случае информация «начало работы по графику» сообщается С-1 и Б-4, во втором случае информация из Б-2 идет по двум каналам: в С-1, где фиксируется время начала работы после простоя и далее в Б-1; одновременно идет сообщение в Б-3 о первичном состоянии агрегата и в СП-1 о затратах времени на восстановление работоспособности агрегата.

В третьем случае из Б-2 поступает информация в Б-1 с сообщением, что смена не состоится и запрашивается начало следующей смены и тот же цикл начинается заново. Другое сообщение идет в Б-3, где агрегат приводится в рабочее состояние, а значения затрат времени на этот тип простоя засылаются и накапливаются на СП-2.

В случае готовности агрегата информация об обрабатываемом материале и режиме работы поступает в Б-6 для подготовки обслуживающим персоналом агрегата к работе. Из Б-6 сообщения идут в С-1 и СП-4—СП-6 о затратах времени на выполнение подготовительных операций. В случае же отказа оборудования в С-1 и СЛ-1 (счетчик аварийный) поступает информация о времени возникновения отказа.

2. Для моделирования основной работы агрегата в Б-4 поступает информация из Б-1 о технологическом режиме агрегата в соответствии с артикулом материала и условиями работы. В этом блоке хранится информация о технологических параметрах (концентрация, температура, уровень раствора и т. д.) в каждой отдельно взятой коробке. Из Б-4 информация поступает в Б-8 (блок определения основных технологи-

ческих параметров агрегата), Б-9 (производительности агрегата) и Б-10 (работы агрегата), где определяются основные параметры агрегата, рассчитывается его производительность и определяется количество выпускаемой продукции. Счетчики С-1—С-16 регистрируют потери времени по организационным причинам, количество выпускаемой продукции, расход и стоимость пара, воды, электроэнергии, химматериалов, а также формируют среднюю скорость перемещения ткани по агрегату, среднюю производительность и коэффициент использования агрегата.

Вернемся к блоку Б-10, где выясняется, в каком состоянии находится агрегат. Выявление вероятности отказа при работе агрегата в Б-10 определяется следующим образом: из Б-10 идет запрос в БСЧ о выдаче случайного числа из указанных пределов. При аварийном положении информация через С-1 поступает в Б-7 (блок аварийный), а если же значение случайного числа находится вне этих пределов, то предполагается, что агрегат находится в нормальном (рабочем) состоянии.

3. Б-21 (блок заключительных операций) получает из счетчика С-1 сообщение об окончании работы и обслуживающий персонал приступает к выполнению заключительных операций. После окончания этих операций информация из Б-21 поступает в СЗ-1—СЗ-3 (счетчики заключительных операций), где фиксируются затраты времени на заключительные операции. В случае возникновения отказов информация передается СА-28 (счетчик учета отказов).

4. В модели приведена большая группа блоков и счетчиков, моделирующих нарушения нормального течения процессов. В случае отказа оборудования через С-1, фиксирующий время начала отказа, сообщение о нарушении нормального режима работы передается Б-7. Для прогнозирования эффективности отделочного агрегата предварительно проводился сбор статистических данных по надежности элементов оборудования.

Отделочный агрегат рассматривается как восстанавливаемая система, состоящая из трех подсистем или элементов: электрооборудования (Э), механической части (М), приборов и регуляторов (П), которые, в свою очередь, подразделяются на более мелкие и т. д.

Из Б-7 через БСЧ в соответствующие блоки Б-11, Б-12 и Б-13 (блоки определения рода отказов электрооборудования, механической части, приборов и регуляторов) посылается информация о типе отказавшего элемента. В упомянутых блоках делается классификация отказов на три рода в зависимости от длительности и характера ремонта. После определения рода отказов информация через БСЧ поступает, соответственно, в Б-14—Б-16 для подсистемы Э, в Б-14, Б-17, Б-18 для подсистемы М и в Б-14, Б-19, Б-20 для подсистемы П, где определяется время, затраченное обслуживающим и ремонтным персоналом на устранение отказов (ремонт) оборудования.

В работе модели принимают участие аварийные счетчики СА-6, СА-7 и СА-12 (учет отказов электрооборудования I, II и III родов). От-

казы подсистемы М фиксируются, соответственно, в счетчиках СА-2, СА-3, СА-4, а подсистемы П—в СА-8, СА-9, СА-10.

Помимо указанных аварийных счетчиков необходимо отметить такие, в которых собирается суммарная информация об отказах и времени, затраченном на устранение отказов различного рода. В счетчиках А-14, СА-15 и СА-16 (общее количество отказов I, II и III родов) собирается информация на перечисленных выше счетчиках. Общее количество отказов подсчитывается в СА-17, в который информация поступает из СА-14—СА-16.

В счетчиках СА-21 и СА-15 собирается информация о суммарном времени на устранение отказов I, II и III родов.

Разработанная модель дает возможность исследовать процессы функционирования текстильного оборудования, а также перейти от описания процессов к прогнозированию качества их выполнения. Особый практический интерес представляет модель для разработки автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на основе оптимизации технологических и конструктивных параметров.

Ереванский филиал
ВИНИЛТЕКМАШ

Поступило 21.IV.1977.

Մ. Կ. ՌՈՍՏՈՅԱՆ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՍԱՐԳԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՓԱՐԱՄԵՏՐՆԵՐԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՎԻՃԱԿԱԿՐԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Ա մ փ ո փ ու մ

Տեքստիլ սարքավորման աշխատանքային պրոցեսները ուսումնասիրելու համար նկարագրվում է մաթեմատիկական մոդելի ստեղծման մի մեթոդ:

Ուսումնասիրվում է տեքստիլ սարքավորում, որի աշխատանքը կախված է մի շարք տեխնոլոգիական և կազմակերպական գործոններից: Նկարագրվում են մաթեմատիկական մոդելի բոլոր-սխեմաները և պարզարանվում մոդելի բլոկների ու հաշվիչների աշխատանքը: Մշակված մոդելը հնարավորություն է տալիս ոչ միայն ուսումնասիրել տեքստիլ սարքավորման աշխատանքային պրոցեսները, այլև այդ պրոցեսների նկարագրումից բացի, կանխորոշել նրանց իրականացման որակը և որոնել պրոցեսները ղեկավարող օրինաչափությունները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бусленко Н. И., Калашиников В. В., Коваленко И. И. Лекции по теории сложных систем. М., «Советское радио», 1973.
2. Бояринов А. И., Кафоров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. М., «Химия», 1969.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Н. В. ОЛЕПИШК, М. Г. СТАКЯН, С. А. ГАСПАРЯН

ВЫНОСЛИВОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ
НАГРУЖЕНИИ И ЗАДАННОМ СРОКЕ СЛУЖБЫ

Типичным нагружением для подавляющего большинства ответственных деталей машин является нестационарное нагружение, при котором меняются во времени максимальное и минимальное, а значит, среднее $\sigma_m (\bar{\sigma})$ и амплитудное $\sigma_a (\sigma_a)$ напряжения цикла. Поэтому дальнейшее совершенствование расчетов деталей при нестационарной нагруженности имеет важное практическое значение.

Чтобы расчет соответствовал современным требованиям (обеспечивал минимальную материалоемкость детали), необходимо исходить из уточненных представлений, по крайней мере, в трех направлениях: а) о спектре эксплуатационной нагруженности; б) о суммировании усталостных повреждений от нагрузок разного уровня и в) о повреждающем действии нагрузок малой величины (недогрузок), сочетающихся с большими нагрузками (перегрузками).

В данной статье затрагивается только последнее из указанных направлений. Вопрос о математическом описании спектров эксплуатационной нагруженности с учетом их случайного характера представляет собой самостоятельную задачу. Будем полагать, что в каждом конкретном случае расчет спектра нагрузок задан, что во времени он складывается из одинаковых, периодически повторяющихся частей (блоков) и что законы изменения нагрузок (напряжений) в блоке известны.

Не касаясь по существу второго направления, в качестве модели процесса накопления повреждений примем скорректированную линейную гипотезу [1, 2], хорошо зарекомендовавшую себя в инженерных расчетах, допускающую исчислять долговечности по исходной кривой усталости и в пределах мнимой ее части, лежащей ниже предела выносливости. Правомерность экстраполяции исходной кривой усталости в область недогрузок при подсчете слагаемых накопленного повреждения можно считать доказанной [2]. Особые случаи нестационарного нагружения, приводящие к детерминированным отклонениям предельного повреждения от единицы, исключим как имеющие подчиненное значение. В дальнейшем расчет будем проводить на примере нормальных напряжений σ .

Наклонную ветвь исходной средневероятной кривой усталости подчиним степенному уравнению

$$\sigma^m N = \sigma_{\text{пр}}^m N_0 = 10^{C_0} \quad \text{или} \quad Q^m N = Q_{\text{пр}}^m N_0 = 10^{C_0}, \quad (1)$$

где m — угловой коэффициент наклонных ветвей кривых усталости в двойных логарифмических координатах; C_s и C_Q — начальные абсциссы этих ветвей, построенных в напряжениях и соответствующих им нагрузках; $\sigma_{\text{пр}}$ и $Q_{\text{пр}}$ — предел выносливости и соответствующая ему предельная нагрузка; N_0 — абсцисса точки перелома кривых усталости, определяющая предельные величины $\sigma_{\text{пр}}$ и $Q_{\text{пр}}$ и положение горизонтальных участков этих кривых; σ , Q и N — текущие напряжения, нагрузка и число циклов до разрушения. Между параметрами C_Q и C_s существует очевидное соотношение

$$C_Q = C_s + m \lg q, \quad (2)$$

где q — множитель при напряжении, при помощи которого определяется нагрузка (например, при растяжении — сжатии это площадь, а при изгибе — момент сопротивления опасного сечения детали). Оставляя в стороне имеющий самостоятельное значение вопрос об эмпирическом построении кривых усталости, допускаем, что исходную кривую для рассматриваемой детали всегда можно построить.

Так как к проектному расчету детали задаются нагрузки, будем иметь в виду кривую усталости в нагрузках, понимая под ними силы или моменты, действующие в опасном сечении детали. Опираясь на линейную гипотезу суммирования повреждений, упорядочим график нагрузок от больших значений к меньшим и представим его в относительных координатах. График может быть ступенчатым (рис. 1) и плавным (рис. 2). Удобнее всего его относить к одному блоку нагрузки, как это и показано на рисунках. Но если принять, что расчетная долговечность N_p кратна числу циклов n_b в блоке (объему блока), что всегда приемлемо, и состоит из λ блоков, т. е. $N_p = \lambda n_b$, то такой график можно трактовать как график нагружения детали за весь ее срок службы в масштабе λ . Отношения нагрузок Q_i/Q_1 и длительностей их действия n_{i0}/n_b или функции $Q/Q_1 (n/n_b)$ определяются заданным спектром эксплуатационной нагруженности детали.

Как известно, кривая усталости при нестационарном нагружении в координатах «максимальная нагрузка — суммарное число циклов до разрушения» смещается вправо по отношению к исходной кривой, причем, это смещение будет тем больше, чем меньше длительность действия максимальной нагрузки [1]. При больших величинах $\alpha_1 = Q_1/Q_{\text{пр}}$ и малых величинах $\beta_1 = n_{10}/n_b$ смещение может характеризоваться увеличением долговечности по кривой усталости нестационарного нагружения на один-два порядка по сравнению с долговечностью N (по исходной кривой). Это означает, что расчетный срок службы N_p нельзя ограничивать долговечностью N_0 при определении коэффициента $K_1 = (N_p/N_0)^{1/m}$ срока службы [3] и выяснении того, относится ли данный конкретный расчет к расчету на ограниченную или неограниченную выносливость.

Выносливость детали будет ограниченной при всех значениях N_p , как бы велики они ни были, пока длительность n_1 действия максимальной нагрузки Q_1 за весь срок службы будет меньше абсциссы N_p , т. е. пока будет соблюдаться неравенство $n_1 = \lambda n_{10} = N_p \cdot n_{10} / n_0 < N_p$. При $n_1 \geq N_p$ нагрузка Q_1 должна стать равной Q_{np} (все другие нагрузки блока по-прежнему будут меньше Q_{np}), и расчет детали можно проводить без учета заданного срока службы N_p , т. е. на неограниченную выносливость. Далее будем иметь в виду только первый случай.

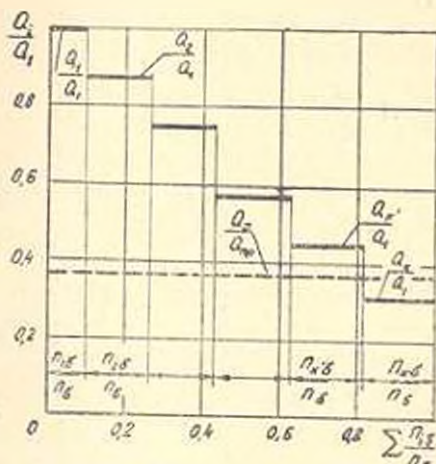


Рис. 1. Блок нагружения со ступенчатым изменением нагрузки (k' — число ступеней нагрузки до нижней границы).

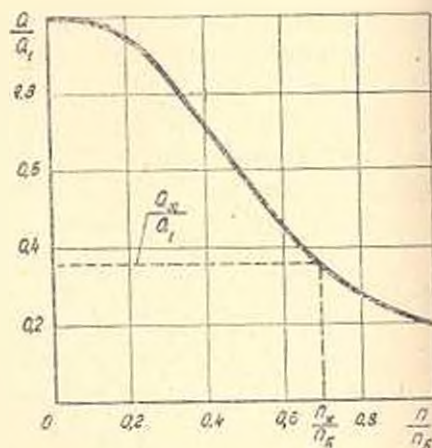


Рис. 2. Блок нагружения с плавным изменением нагрузки (n_1 — число циклов в блоке, соответствующее нижней границе).

Покажем теперь, что при наличии в спектре сильно отличающихся нагрузок те из них, которые меньше нижней границы повреждающих нагрузок [4] и практически не вызывают повреждения материала детали, могут быть отброшены на стадии проектного расчета. Обозначим Q_x нагрузку нижней границы, а $x = Q_x/Q_{np}$ — относительную ее величину, которую будем полагать зависящей от эксплуатационного спектра нагруженности n , следовательно, в начале расчета неизвестной. Принимая ее в первом приближении равной нулю, заменим действительный спектр эквивалентной ему нагрузкой Q_x . Под последней будем понимать такую постоянную нагрузку, отнесенную к исходной кривой усталости, которая за тот же срок службы N_p , что и действительные нагрузки, вызывает одинаковое с ними повреждение материала детали. Тогда условие эквивалентности для ступенчатого блока с ступенями n блока с плавным изменением нагрузки примет вид [1]

$$Q_x = Q_1 \left[\sum_{i=1}^n (Q_i/Q_1)^m (n_{i0}/n_0) \right]^{1/m}, \quad (3)$$

$$Q_0 = Q_1 \left[(1/n_0) \int_0^{n_0} (Q/Q_1)^m dn \right]^{1/m} \quad (4)$$

Выражения в квадратных скобках представляют собой коэффициенты переменности нагружения [3,4]

$$K_Q = \left[\sum_{i=1}^k (Q_i/Q_1)^m (n_{i0}/n_0) \right]^{1/m} \quad (5)$$

$$K_0 = \left[(1/n_0) \int_0^{n_0} (Q/Q_1)^m dn \right]^{1/m} \quad (6)$$

Коэффициенты K_Q при заданном блоке нагрузки не зависят от срока службы N_p . Не зависит от него и эквивалентная нагрузка

$$Q_e = Q_1 \cdot K_Q \quad (7)$$

От срока службы зависит лишь предельная нагрузка Q_{np} по исходной кривой усталости, которая при постоянной нагрузке Q , будет тем меньше, чем меньше величина N_p

$$Q_{np} = Q_1 (N_p/N_0)^{1/m} = Q_1 K_r \quad (8)$$

Следовательно, если долговечность N_p мала, то и предельная нагрузка мала, а соотношение между Q_1 и Q_{np} значительно, и для детали можно применить материал низкой прочности. Как видно из выражения (8), при $N_p < N_0$ эквивалентная нагрузка больше, а при $N_p > N_0$ меньше предельной. Это не должно казаться необычным, поскольку эквивалентная нагрузка отражает действие всех нагрузок в блоке, а в последнем случае на долю недогрузок приходится существенно большая часть времени, что предельная нагрузка Q_{np} по исходной кривой усталости является по существу предельной эквивалентной нагрузкой, так как она заменяет действительный блок и отнесена к абсциссе точки перелома исходной кривой усталости. Иная ее трактовка оказывается недостаточной для решения поставленной задачи. Так, если считать, что эквивалентная нагрузка, отнесенная к долговечности N_0 , является просто эквивалентной, а не эквивалентной предельной нагрузкой, то можно записать

$$Q_e = Q_1 K_Q K_r \quad (9)$$

Между тем из выражений (7) и (8) следует, что

$$Q_{np} = Q_e = Q_1 K_Q \cdot K_r \quad (10)$$

Из последнего выражения можно получить (рис. 1)

$$Q_1/Q_{np} = 1/K_Q K_r \quad (11)$$

$$Q_1/Q_{np} = Q_1/Q_1 K_Q K_r \quad (12)$$

где отношения Q_i/Q_1 берутся непосредственно из графика нагрузок, а отношения Q_i/Q_{np} позволяют представить все нагрузки блока в долях предельной нагрузки, потребной для заданных условий работы детали. Эта возможность исчезает, если руководствоваться представлениями согласно выражению (9).

Определив из выражения (11) $\alpha_1 = Q_1/Q_{np}$ и зная $\beta_1 = n_{16}/n_6$, относительную величину x нижней границы найдем по ранее выведенной эмпирической формуле

$$x = 2/(1 + \alpha_1^{10} \beta_1). \quad (13)$$

Теперь можно сопоставить нагрузки Q_i/Q_{np} согласно выражению (12) с полученным значением x и те из них, которые окажутся меньше x , отбросить.

Для графика с плавным изменением нагрузки (рис. 2) по величине x находим отношение, выражающее нагрузку Q_x в долях максимальной нагрузки Q_1

$$Q_x/Q_1 = x K_Q K_T \quad (14)$$

и по нему, пользуясь законом $Q/Q_1 (n/n_1)$ изменения нагрузок в блоке, вычисляем n_x/n_6 и n_x и отбрасываем правую часть блока, где $n/n_x > n_x/n_6$.

Полученное усечение блока рассматриваем как первое приближение, вполне, однако, достаточное в тех случаях, когда усечение оказалось незначительным или не удалось исключить даже самую малую нагрузку блока. Для уточнения расчета в остальных случаях прибегаем к второму приближению, которое, как правило, будет последним. Для этого по формулам (5) или (6) определяем коэффициенты переменности режима нагружения, оставляя с относительными нагрузками Q_i/Q_1 , превышающими x (т. е. k' слагаемых), или вычисляя интеграл в пределах от 0 до n_x . Отношения n_{16}/n_6 и объем блока n_6 при этом оставляем неизменными, соответствующими заданному (исходному) графику нагрузок, на том основании, что работа детали при искусственно отброшенных нагрузках «фактически» имеет место, и наработка при этих нагрузках отражается в общей долговечности N_p . При таком подходе коэффициенты K_Q будут меньше, чем при первом приближении, а коэффициенты K_T останутся неизменными, т. е. станут меньше нагрузки Q_x и Q_{np} , что позволит уменьшить размеры опасного сечения детали. К тому же результату придем, если с учетом отсеченной части графика нагрузок скорректируем объемы блоков n_6 , отношения n_{16}/n_6 и расчетную долговечность N_p . Но этот прием менее удобен, так как требует перестройки графиков нагружения и перехода от указываемого в задании срока службы N_p к некоторому фиктивному, не отражающему измеряемую в эксплуатации наработку детали.

Уточнив по выражению (10) предельную нагрузку и по выражению (11) отношение Q_{np}/Q_1 , по формуле (13) находим новое значение x . Это значение сравниваем с вновь полученным Q_i/Q_{np} согласно выра-

женно (12) или определяем по выражению (14) новое отношение Q_2/Q_1 и число циклов N_2 . При этом может оказаться необходимым дополнительно отбросить нижние части блока.

Полученное во втором приближении значение предельной нагрузки с достаточной точностью позволяет найти размеры опасного сечения детали, при которых будет обеспечиваться нормальная ее работа при действительном спектре нагрузок в течение заданного срока N_p . Например, если неподвижная гладкая ось при асимметричном плоском изгибе с коэффициентом R должна иметь средневероятный предел выносливости $\bar{\sigma}_R$ и предельные составляющие цикла $\bar{\sigma}_m$ и $\bar{\sigma}_a$, то полагая, что при действии всех нагрузок эксплуатационного спектра коэффициент R и отношение $\bar{\sigma}_m/\bar{\sigma}_a$ не изменятся (сохранится подобие циклов напряжений), требуемый момент сопротивления W оси найдем из выражения

$$W = Q_{op}/\bar{\sigma}_R \quad (15)$$

где под Q_{op} в данном случае следует понимать предельный изгибающий момент в опасном сечении оси.

При известной функции распределения предела выносливости легко найти сечение оси, при котором долговечность N_p гарантировалась бы с заданной вероятностью разрушения P . Если для $\bar{\sigma}_R$ принять нормальный закон распределения со средним квадратичным отклонением $S_{\bar{\sigma}_R}$, то для вероятности разрушения P , соответствующей квантили u , требуемый момент сопротивления оси будет

$$W_P = Q_{op}/(\bar{\sigma}_R + uS_{\bar{\sigma}_R}). \quad (16)$$

Расчет несколько усложнится, если и заданный спектр нагрузок и соответствующую ему величину Q_{op} рассматривать как средневероятные, подчиненные тому или иному закону распределения. Тогда момент W_p для заданной вероятности P определится с учетом вероятностей указанных двух событий.

Исходя из принятого предела выносливости $\bar{\sigma}_R$ оси и полученного в расчете ее диаметра, по уравнению подобия усталостного разрушения [4, 5] находим предел выносливости эталонного образца и по нему подбираем подходящий материал для оси. Если при принятых условиях расчета подбор материала оказался затруднительным, расчет повторяем, либо прибегаем к тому или иному поверхностному упрочнению оси для придания ей требуемых свойств.

Таким образом, предложенная методика расчета деталей машин на выносливость при нестационарном нагружении по заданному сроку службы позволяет с достаточной полнотой отразить условия работы деталей и добиться за этот счет минимальной их материалоемкости.

Ն. Վ. ՕԼԵՆԻԿ, Մ. Դ. ՈՏԵԿՅԱՆ, Ու. Հ. ԴԱՍՊԱՐՅԱՆ

**ՄԵԲԵՆԱՆՆԵՐԻ ՄԱՍԵՐԻ ԴԻՄԱՑԻՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ ՉԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱՆ
ԲԵՌՆՎԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՆԱԽԱՅՈՒԹՅԱՆ ՏՐՎԱՆ ԺԱՄԿԵՏԻ ԿԵՊԸՈՒՄ**

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Դիտարկված են մեքենաների մասերի բեռնվածության դեպքեր, որոնց մի մասը սահմանայինից ցածր է, ընդամենը են կկիրառվեն և կկիրառվեն սահմանային բեռնվածք հասկացությունները, որի շնորհիվ ապացուցված է մասերի նախազմման շրջանում վնասող բեռնվածքների ներքին սահմանից ցածր դոնվոդ արժեքների հաշվարկից բացառելու նախադրությունը:

Առաջարկված է մեքենաների մասերի՝ ըստ ծառայության տրված ժամկետի հաշվարկի մեթոդ, որը բավականապես լրիվ արտացոլում է նրանց աշխատանքի պայմանները և ապահովում նվազագույն նյութատարողությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Олейник Н. В. Расчет деталей машин с учетом нижней границы повреждающих нагрузок. Респ. межресп. науч.-техн. сб. «Детали машин», вып. 19, Киев, «Техника», 1974, с. 87—93.
2. Олейник Н. В. Суммирование повреждений по экстраполированной кривой усталости. Респ. межресп. науч.-техн. сб. «Детали машин», вып. 12, Киев, «Техника», 1971, с. 63—66.
3. Решетов Д. Н. Детали машин. М., «Машиностроение», 1974, 656 с.
4. Сергеев С. В., Косаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М., «Машиностроение», 1975, 488 с.
5. Соколовский Л. А. Уравнения подобия усталостного разрушения с оценками объема и их экспериментальная проверка. «Проблемы прочности», 1977, № 1, с. 40—50.

ЭНЕРГЕТИКА

И. И. ШАРАБХАНИН

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА
СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Предлагается алгоритм расчета установившегося режима сложных электроэнергетических систем (ЭЭС), основанный на методе разделения сложной ЭЭС на несвязанные подсистемы (ПС). Предполагается, что ПС сложной ЭЭС являются энергосистемы (ЭС), входящие в энергообъединение (ЭО).

Постановка задачи. Задана схема замещения ЭО, активные (g) и реактивные (b) узловые проводимости, активные (P) и реактивные (Q) мощности в узлах, базисный узел с заданным напряжением (U_0). ЭО расчленяется на несвязанные ЭС. Выводятся и решаются уравнения состояния для каждой ЭС. Составляется и решается система уравнений, где в качестве переменных рассматриваются токи в меженстемных связях (МС). Напряжения в узлах ЭС определяются как алгебраическая сумма напряжений от токов в узлах ЭС и МС.

Теория. После расщепления ЭО на ЭС и удаления МС, необходимо установить такие математические модели для каждой ЭС, чтобы напряжения и токи в любом узле и элементе ЭС были такими же, что и в ЭО.

Предположим, что выполнено расщепление ЭО (рис. 1) на две ЭС. Это достигается разрезанием МС $тк$.

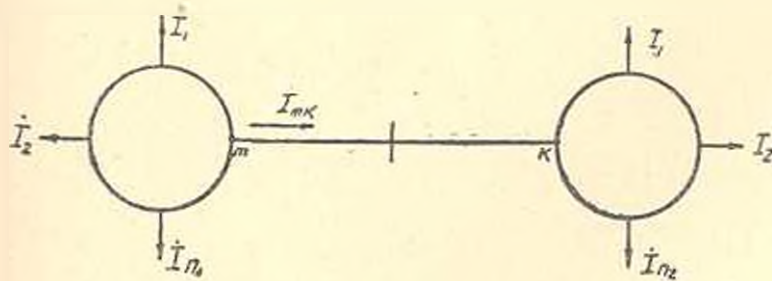


Рис. 1.

Математические модели строятся с учетом следующих положений.
1. Разделение ЭО на ЭС расщеплением МС, соединяющей их, равносильно существованию двух отдельных ЭС. Удаление МС приводит к прекращению потока мощности между ЭС так, что в ЭС 1 наблюдается из-

лишек мощности $\hat{I}_{mk} \cdot U_m$ (тока I_{mk}), а в ЭС II — нехватка $\hat{I}_{mk} \cdot U_k$ (тока I_{mk}). Если в ЭС I и II компенсировать излишек и нехватку тока I_{mk} и решать уравнения узловых напряжений (УУН) каждой ЭС, то получим такое решение, как если бы ЭО не расчленялось на ЭС, а решалось целиком.

2. Принимается, что в каждой ЭС один из узлов (опорный) временно замыкается на базисный узел ЭО.

3. Компенсируя соответствующие узловые токи в каждой изолированной ЭС, полагаем, что узловые напряжения ЭС равны алгебраической сумме:

а) U_1, U_2 — напряжения, обусловленных узловыми токами ЭС и токами в МС;

б) ΔU_p — падений напряжения между опорным узлом ЭС и базисным узлом ЭО.

Задача становится определенной, если будут известны перетоки по МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО. Дальнейшие преобразования сводятся к их определению. С этой целью для заданного ЭО строится искусственная цепь [1], состоящая из двух схем токов — узловых и контурных, которые составляются следующим образом.

А. Схема узловых токов.

1. Предполагается, что все токи в каждой ЭС сходятся в опорном узле.

2. Суммарные токи каждой ЭС из опорных узлов текут к базисному узлу ЭО по одной из МС ЭС. Таким образом, в искусственной цепи ЭО каждая ЭС представляется одним узлом, в котором приложен суммарный ток ЭС (кроме ЭС с базисным узлом).

Б. Схема контурных токов.

1. Предполагается, что между ЭС, имеющих более одной МС, существуют контуры, которые замыкаются между опорными узлами соответствующих ЭС.

2. Сами ЭС могут образовывать замкнутые контуры, количество которых определяется:

$$K = b - (N - 1),$$

где b — число ветвей искусственной цепи, по которым предполагается прохождение узловых токов; $N - 1$ — число независимых узлов искусственной цепи.

Таким образом составленная искусственная цепь будет иметь:

б) узлов столько, сколько имеется ЭС в ЭО;

б) ветвей столько, сколько имеется МС в ЭО.

Приняв такую схему токов, составляем матрицу соединений токов в искусственной цепи.

Составление матрицы соединений токов в искусственной цепи. Для наглядности рассмотрим пример ЭО, состоящего из 7 ЭС, связанных МС, как показано на рис. 2. Для него составим искусственную цепь (рис. 3).

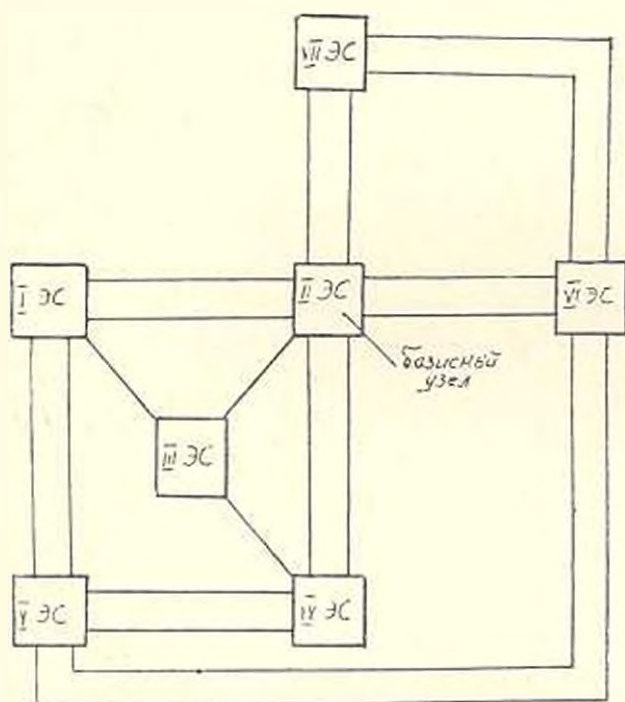


Рис. 2.

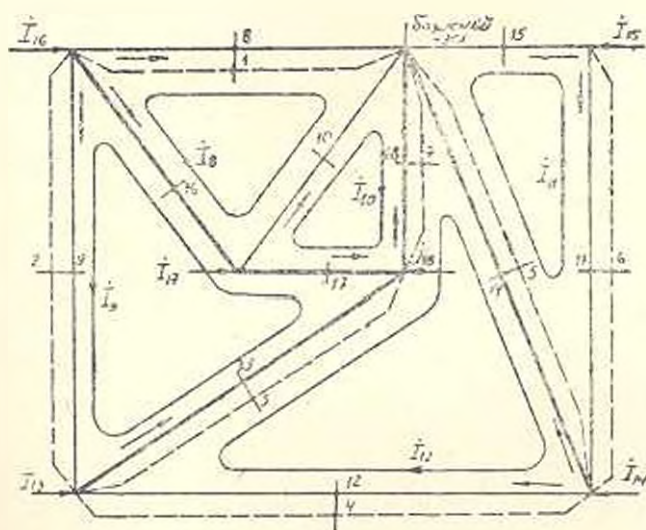


Рис. 3.

В этой искусственной цепи пунктирными линиями проведены МС, по которым предполагается прохождение контурных токов ($\dot{I}_c$), а сплошными—прохождение суммарных узловых токов ($\dot{I}_s$) в сечениях. В узлах приложены суммарные узловые токи ($\dot{I}_p$). После рассечения МС узлы, образовавшиеся в сечениях, пронумеруем следующим образом. Первыми номерами по порядку отметим все узлы, по которым предполагается прохождение контурных токов $\dot{I}_c$ (1—7). В составленной искусственной цепи есть контуры, в которых циркулируют контурные токи $\dot{I}_c$, образованные самими ЭС. Составим одно из возможных деревьев графа искусственной цепи (жирные линии). Следующими номерами (8—12) отметим узлы в сечениях тех МС, удалением которых получили дерево. Последующими номерами (13—16) обозначим узлы, по которым проходит суммарный ток только одной ЭС, затем—узлы (17), по которым проходят суммарные токи двух ЭС и т. д. Задаемся направлениями токов в МС. Учитывая, что в сечениях ЭС, имеющих более одной МС, по одной из них протекает соответствующий остаточный ток $\sum \dot{I}_c + \dot{I}_s$, составим матрицу соединений токов в искусственной цепи:

$$C_{\lambda} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} \text{с} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{к} \\ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{р} \\ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \end{array} \\ \begin{array}{r} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \end{array} \left[\begin{array}{cccccc|cccc|cccccc} 1 & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & 1 & & & & & & & & & & & & & & & \\ & & 1 & & & & & & & & & & & & & & \\ & & & 1 & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & 1 & & & & & & & & & & \\ & -1 & & & & & & 1 & & & & & & & & & \\ & & -1 & & & & & & 1 & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & 1 & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & & & & & & & 1 & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & 1 & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & 1 & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & 1 & \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 1 \end{array} \right] = C_{\lambda(c, k)} C_{\lambda p},$$

где $C_{\lambda(c, k)}$, $C_{\lambda p}$ — подматрицы соединений контурных и узловых токов. Строки этой матрицы соответствуют номерам узлов, а столбцы — токам в сечениях МС. Она преобразует матрицу сопротивлений узлов МС относительно опорных узлов ЭС в матрицу сопротивлений узлов МС относительно базисного узла [1]. При вышесказанном формировании получаем треугольную матрицу соединений токов искусственной цепи. Вычислительные преимущества таким образом составленной матрицы очевидны.

Определение матрицы сопротивлений узлов МС ЭО. Составляем матрицу узловых проводимостей для каждой ЭС относительно опорных узлов (Y). Определяем матрицу узловых сопротивлений ЭС ($Z_1 = Y^{-1}$). Из нее выделяем подматрицу сопротивлений относительно узлов связей (Z') и располагаем по диагонали в матрице:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 & & \\ & Z_2 & \\ & & \ddots \\ & & & Z_N \end{bmatrix}$$

Составляем матрицу соединений узлов связи ЭС с узлами разрывов МС (C_{mk}). В этой матрице столбцами k являются номера узлов разрывов МС, а строками m — номера узлов связей ЭС. Можно C_{mk} составлять по следующему принципу. За положительное направление тока в МС принять от ЭС с меньшим номером k ЭС с большим номером.

Определяем матрицу $Z_k = C_{km} \cdot Z \cdot C_{mk}$, $C_{km} = (C_{mk})_1$.

Матрица сопротивлений узлов связей ЭС относительно их опорных узлов будет:

$$Z_k = Z_k + Z_c,$$

где Z_c — диагональная матрица сопротивлений МС.

Матрица Z_k преобразуется в матрицу сопротивлений узлов связей ЭС относительно базисного узла ЭО [1]

$$Z_k = (C_k)_1 \cdot Z_k \cdot C_k.$$

Разобьем Z_k на блоки в соответствии с разбиением C_k на $C_{k(c, k)}$ и C_{kp}

$$Z_k = \begin{bmatrix} C_{k(c, k)} \cdot Z_k \cdot C_{k(c, k)} & C_{k(c, k)} \cdot Z_k \cdot C_{kp} \\ C_{kp} \cdot Z_k \cdot C_{k(c, k)} & C_{kp} \cdot Z_k \cdot C_{kp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{k(c, k)(c, k)} & Z_{k(c, k)p} \\ Z_{kp(c, k)} & Z_{kpp} \end{bmatrix},$$

$$C_{k(c, k)} = (C_k)_{11}, \quad C_{kp} = (C_k)_{12}$$

где $Z_{k(c, k)(c, k)} = R_{k(c, k)(c, k)} + jX_{k(c, k)(c, k)}$ — подматрица сопротивлений контурной цепи; $Z_{k(c, k)p} = R_{k(c, k)p} + jX_{k(c, k)p}$ и $Z_{kp(c, k)} = R_{kp(c, k)} + jX_{kp(c, k)}$ — подматрицы взаимных сопротивлений контурной и узловой цепей; $Z_{kpp} = R_{kpp} + jX_{kpp}$ — подматрица сопротивлений узловой цепи.

Для расчета установившегося режима ЭО необходимо определить матрицу соединений узловых (C_{mp}) и контурных ($C_{m(c, k)}$) токов с узлами ЭС [1]:

$$C_{mp} = C_{mi} \cdot C_{ip}, \quad C_{m(c, k)} = C_{mk} \cdot C_{k(c, k)},$$

где C_{mi} — матрица соединений узлов разрыва (i) с узлами ЭС (m). Она составляется по тому же принципу, что и C_{mk} . Вся необходимая

информация подготовлена для расчета установившегося режима ЭС, входящих в ЭО.

Алгоритм расчета

1. Узловые напряжения ЭС от их узловых токов:

$$\dot{U}_{1m} = Z_1 \dot{I}_m + \dot{U}_0.$$

2. Контурные напряжения и токи в искусственной цепи:

$$\dot{U}_{(c, k)} = (C_{m(c, k)})_1 \cdot \dot{U}_{1m} - Z_{(c, k)p} \cdot \dot{I}_p;$$

$$\dot{I}_{(c, k)} = Y_{(c, k)(c, k)} \cdot \dot{U}_{(c, k)}; \quad Y_{(c, k)(c, k)} = Z_{(c, k)(c, k)}^{-1}.$$

3. Дополнительные токи и напряжения в узлах ЭС, вызванные токами, протекающими в МС:

$$\dot{I}_1 = -(C_{mp} \cdot \dot{I}_p + C_{m(c, k)} \cdot \dot{I}_{(c, k)});$$

$$\dot{U}_{2m} = Z_2 \cdot \dot{I}_1.$$

6. Падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО:

$$\Delta \dot{U}_p = -(C_{mp})_1 \cdot \dot{U}_{1m} + Z_{pp} \cdot \dot{I}_p + Z_{p(c, k)} \cdot \dot{I}_{(c, k)}.$$

7. Напряжения опорных узлов ЭС:

$$\dot{U}_p = \Delta \dot{U}_p + \dot{U}_0.$$

8. Результирующие напряжения в узлах ЭО:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{1m} + \dot{U}_{2m} + \Delta \dot{U}_p.$$

Так как по постановке задачи в узлах ЭС заданными являются не токи, а мощности, то токи в узлах ЭС определяются: $I = \frac{P - jQ}{\dot{U}}$ и для вычисления

узловых напряжений можно пользоваться одним из итерационных методов. Для наглядности приведенного алгоритма рассмотрим пример электрической сети (рис. 4).

Заданы: токи в нагрузочных узлах — по 1 А, в генераторном узле (4) — 15 А, сопротивления ветвей — по 1 Ом, базисный узел с напряжением $U_0 = 0$. Сопротивления МС — 2 Ом.

Решение: Разделим всю сеть на 4 ПС. Составим матрицу C_{m1} .

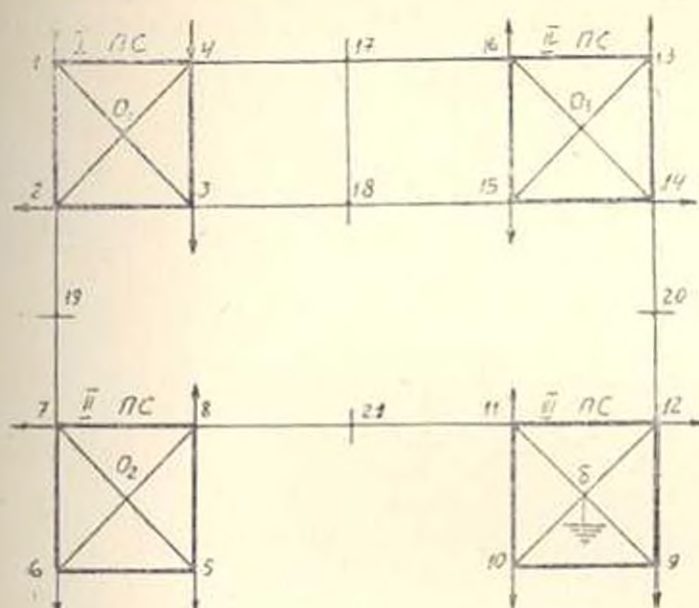


Рис. 4.

$$C_{mk} = \begin{array}{c|cccc} & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \\ \hline 1 & & & & & \\ 2 & & 1 & & & \\ 3 & & & 1 & & \\ 4 & 1 & & & & \text{I ПС} \\ \hline 5 & & & & & \\ 6 & & & & & \\ 7 & & -1 & & & \\ 8 & & & 1 & & \text{II ПС} \\ \hline 9 & & & & & \\ 10 & & & & & \\ 11 & & & -1 & & \\ 12 & & & 1 & & \text{III ПС} \\ \hline 13 & & & & & \\ 14 & & & & -1 & \\ 15 & & -1 & & & \\ 16 & -1 & & & & \text{IV ПС} \\ \hline \end{array}$$

$$Y^I = Y^{II} = Y^{III} = Y^{IV} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 3 \end{bmatrix},$$

$$Z_1^I = Z_1^{II} = Z_1^{III} = Z_1^{IV} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 7 & 3 & 2 & 3 \\ 3 & 7 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 7 & 3 \\ 3 & 2 & 3 & 7 \end{bmatrix}.$$

Матрица сопротивлений узлов связи относительно опорных узлов:

$$Z_{\lambda} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 \end{bmatrix}.$$

Матрицы соединений контурных и узловых токов искусственной цепи (рис. 5):

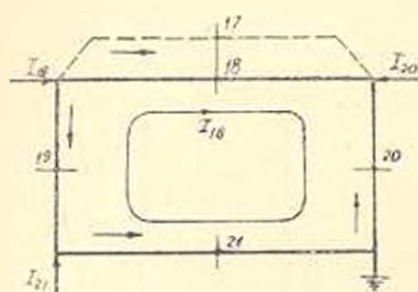


Рис. 5.

$$C_{(c, k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$C_{(p)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица сопротивлений узлов связей, приведенная к базисному узлу:

$$Z_{pp} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 82 & 3 & 41 \\ 3 & 44 & 3 \\ 41 & 3 & 44 \end{bmatrix};$$

$$Z_{p(c, k)} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -1 & -76 \\ 1 & 38 \\ 0 & -38 \end{bmatrix};$$

$$Z_{(c, k)p} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -76 & 38 & -38 \end{bmatrix};$$

$$Z_{(c, k)(c, k)} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 76 & -36 \\ -36 & 152 \end{bmatrix}.$$

Матрицы соединений токов искусственной цепи с узлами системы

$$C_{mp} = C_{m(c)} \cdot C_{(p)} = \begin{array}{ccc|l} 0 & 0 & 0 & \text{I ПС} \\ 1 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ \hline 0 & 0 & 0 & \text{II ПС} \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ \hline 0 & -1 & 0 & \text{III ПС} \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & \text{IV ПС} \end{array};$$

$$C_{m(e, k)} = C_{m1} \cdot C_{k(e, k)} =$$

0	0	I ПС
0	-1	
-1	1	
1	0	
0	0	II ПС
0	0	
0	1	
0	-1	
0	0	III ПС
0	0	
0	1	
0	-1	
0	0	IV ПС
0	1	
1	-1	
-1	0	

Суммарные токи в ПС:

$$I_P = \begin{bmatrix} 12 \\ -4 \\ -4 \end{bmatrix}.$$

1. Узловые напряжения ПС от их узловых токов:

$$U_{1m}^I = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 33 \\ 17 \\ 33 \\ 97 \end{bmatrix}; \quad U_{1m}^{II} = U_{1m}^{III} = U_{1m}^{IV} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -15 \\ -15 \\ -15 \\ -15 \end{bmatrix}.$$

2. Контурные напряжения в искусственной цепи:

$$U_{(e, k)} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 80 \\ 928 \end{bmatrix}.$$

3. Узловая проводимость контурной цепи:

$$Y_{(e, k)(e, k)} = \frac{15}{10256} \begin{vmatrix} 152 & 36 \\ 36 & 76 \end{vmatrix}.$$

4. Контурные токи в искусственной цепи:

$$I_{(e, k)} = \frac{15}{10256} \begin{bmatrix} 45568 \\ 73408 \end{bmatrix}.$$

5. Дополнительные токи в узлах ПС, вызванные токами, протекающими в линиях связи:

$$I_m^I = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ -49364 \\ -27840 \\ -45568 \end{bmatrix}; \quad I_m^{II} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 49664 \\ -8640 \end{bmatrix};$$

$$I_m^{III} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 8640 \\ 32384 \end{bmatrix}; \quad I_m^{IV} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 0 \\ -32384 \\ 27840 \\ 45568 \end{bmatrix};$$

6. Дополнительные узловые напряжения ПС от токов в линиях связи:

$$U_{2m}^I = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} -341376 \\ -522304 \\ -480576 \\ -501824 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{II} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 73408 \\ 131712 \\ 321728 \\ 88512 \end{bmatrix};$$

$$U_{2m}^{III} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 114432 \\ 90688 \\ 157632 \\ 252608 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{IV} = \frac{1}{10256} \begin{bmatrix} 95232 \\ -52302 \\ 234432 \\ 337728 \end{bmatrix};$$

7. Падения напряжений между опорными узлами ПС и базисным узлом системы:

$$\Delta U_p = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 2334080 \\ 328320 \\ 1276160 \end{bmatrix};$$

8. Напряжения опорных узлов ПС:

$$U_p = \frac{1}{16 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 2334080 \\ 328320 \\ 1276160 \end{bmatrix};$$

9. Результирующие напряжения в узлах системы:

$$U_m^I = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 2331152 \\ 1986128 \\ 2191952 \\ 2827088 \end{bmatrix}; \quad U_m^{II} = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 247888 \\ 306192 \\ 496208 \\ 262992 \end{bmatrix};$$

$$U_m^{III} = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} -39408 \\ -63152 \\ 3792 \\ 98768 \end{bmatrix}; \quad U_m^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 10256} \begin{bmatrix} 1217552 \\ 1070288 \\ 1356752 \\ 1460048 \end{bmatrix};$$

В ы в о д ы

1. Предложенный способ формирования матрицы C по сравнению с [1] отличается простотой и обеспечивает сокращение вычислительных операций при определении матрицы Z .

2. По алгоритмам [4, 5] накладывается ограничение на деление системы на ПС, суть которого заключается в том, что система делится на ПС так, чтобы в каждую ПС ток поступал не более, чем с двух смежных ПС. В предложенном алгоритме нет такого ограничения.

АрмИИИЭ

Получено 13 VII 1977.

Ի. Բ. ՇԱՐՊՅԱՆՑՅԱՆ

ԽԱՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆՐԵՏԻՎԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԴԻ ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱՆ
ԻՆՏԵՐԻ ՀԱՇՎՈՒՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Առաջարկվում է բարդ էլեկտրաէներգետիկական համակարգի (էէՀ) կայունացված ռեժիմի հաշվման ալգորիթմը՝ հիմնված բարդ էէՀ-ը շկապակցված ենթահամակարգերի (ԵՀ) բաժանման մեթոդի վրա: Ենթադրվում է, որ բարդ էէՀ-ի ԵՀ-երը ներկայացնում են էներգահամակարգեր (էՀ), որոնք մտնում են էներգամիավորման (էՄ) մեջ:

Առաջարկվող ալգորիթմը հնարավորություն է տալիս լուծելու բարդ էէՀ-երի կայունացված ռեժիմները, որ հնարավոր է սովորական մեթոդներով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям-диакоптика. М., «Наука», 1972.
2. Хэлл Х. Диакоптика и электрические цепи. М., «Мир», 1971.
3. Хачатрян В. С. Метод и алгоритм расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем. «Известия АН СССР Энергетика и транспорт», 1973, № 4.
4. Под ред. Веникова В. А. Применение вычислительных машин в энергетике. М., «Энергия», 1968.
5. Кудамин Я. Ф., Мидантло А. Е. Расчет электрических сетей при заданных мощностях в узлах методом разбиения на подсистемы «Электричество», 1972, № 5.

ЭНЕРГЕТИКА

Т. П. АСАТЯН

УПРАВЛЯЕМЫЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛИ

Рассматриваются два управляемых фазовращателя, разработанные в АрмНИИЭ, с целью моделирования генераторных узлов для расчета статической и динамической устойчивостей сложных энергосистем. Эти фазовращатели могут быть использованы также в различных устройствах связи. Принципы их работы разные и поэтому по некоторым параметрам они существенно отличаются друг от друга. Их параллельное рассмотрение полезно тем, что позволяет сравнить и выявить их недостатки и преимущества.

1. Фазовращатель, основанный на использовании передних фронтов треугольных импульсов

В [1] приводится управляемый фазовращатель, работа которого основана на использовании фронтов треугольных импульсов. Он имеет механические (переключатель) и электромеханические (двигатель) элементы, которые понижают его быстродействие. Кроме того, в упомянутом фазовращателе при определенных значениях фазы (0 , π , 2π) получаются срывы амплитуды выходного сигнала.

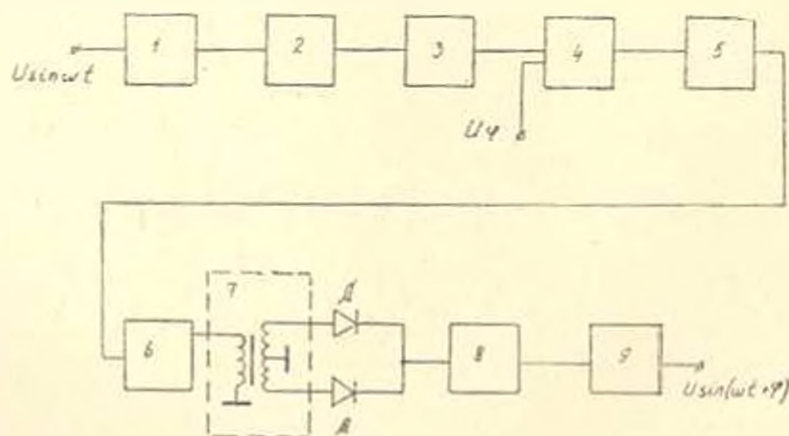


Рис. 1.

Указанных недостатков лишен рассматриваемый здесь фазовращатель, блок-схема и диаграмма работы которого приведены, соответственно, на рис. 1 и 2. С помощью делителя частоты 1 частота входного

синусоидального напряжения (диаграмма «а») делится на два (диаграмма «б»). Выходное синусоидальное напряжение делителя частоты 1 с помощью формирователя импульсов 2 преобразуется в импульсы прямоугольной формы (диаграмма «в»), причем, коэффициент заполнения

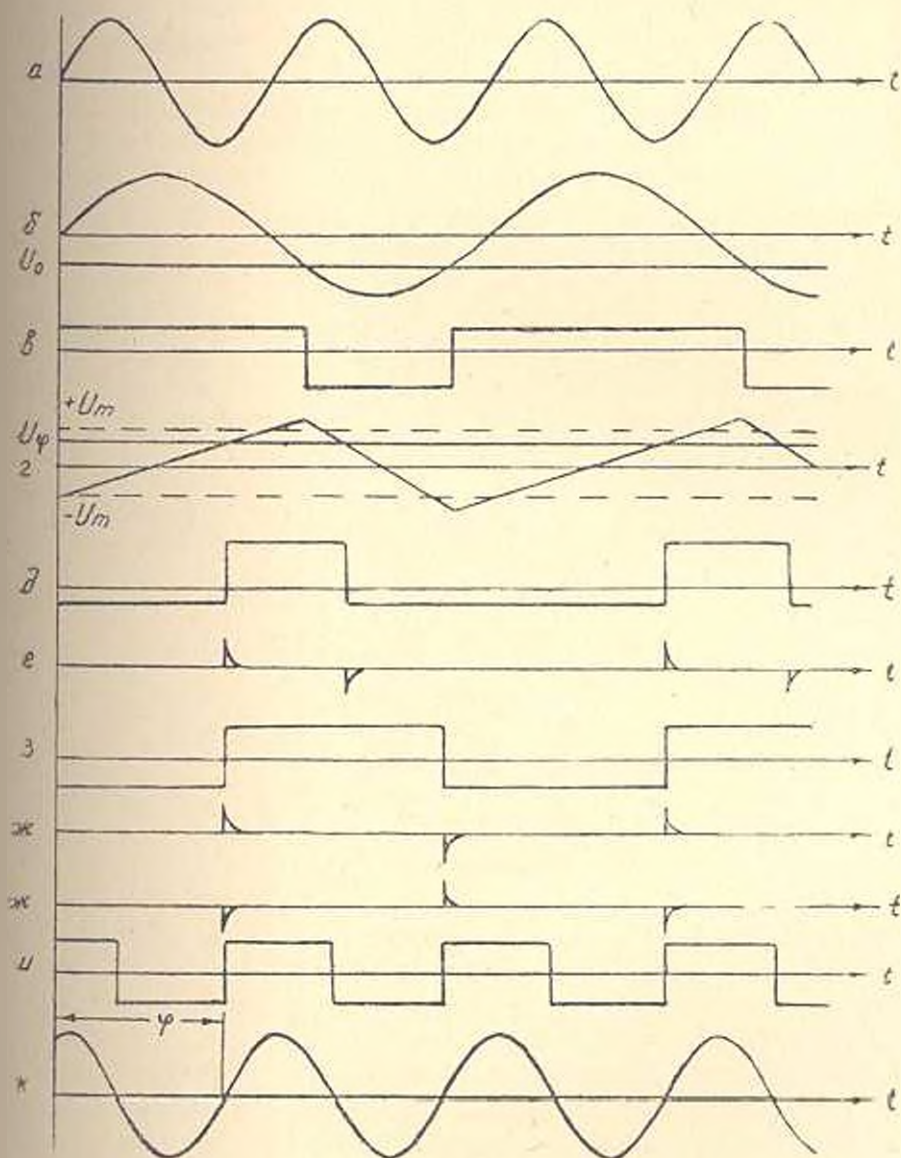


Рис. 2.

импульсов, благодаря смещению U_0 , получается больше 1/2. Затем эти импульсы суммируются интегратором 3 (диаграмма «г») и подаются на вход компаратора 4, порог срабатывания которого задается управляющим напряжением U_c . Выходные импульсы компаратора 4 (диаграмма «д») через дифференцирующую цепь (диаграмма «е») подаются на вход одновибратора 6. Выходные импульсы одновибратора

6 (диаграмма «з») подаются на вход импульсного трансформатора 7, который имеет два противофазных выхода. Импульсный трансформатор дифференцирует входные импульсы (диаграммы «ж» и «ж'») и через разделительные диоды D подает их «на вход одновибратора 8». Выходные импульсы одновибратора 8 (диаграмма «и») фильтруются фильтром первой гармоники 9, который выдает синусоидальное напряжение (диаграмма «к»), сдвинутое относительно входной синусоиды на угол φ . Угол φ в линейной зависимости от величины управляющего напряжения $U_x \leq U_m$. U_m изменяется на 2π без срыва амплитуды выходного синусоидального сигнала.

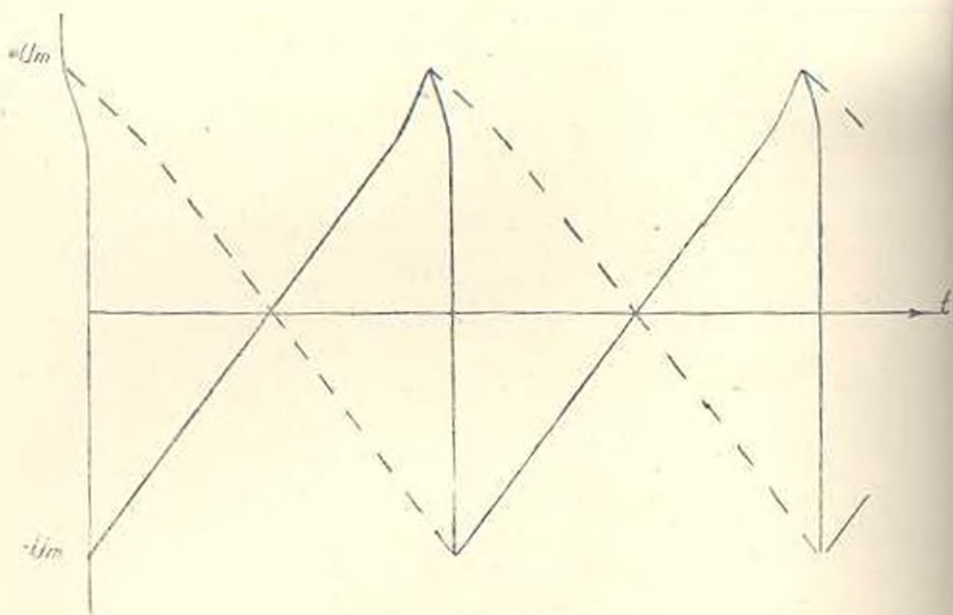


Рис. 3.

Часто стоит вопрос об изменении фазы выходного сигнала на несколько десятков π . Тогда управляющее напряжение U_x должно иметь пилообразную форму (рис. 3). Длительность «пилы» должна быть гораздо больше периода выходного сигнала.

При значении $U_x = -U_m$ фаза выходного сигнала соответствует нулевому сдвигу. По мере возрастания U_x до значения $+U_m$, фаза в линейной зависимости от U_x изменяется до 2π . При значении $U_x = +U_m$ происходит скачкообразное изменение величины U_x до значения $U_x = -U_m$. Таким образом, с помощью пилообразного управляющего напряжения можно получить сколь угодно большое значение сдвига фазы φ . Для уменьшения фазы следует использовать такое же пилообразное напряжение, форма которого пунктирной линией приведена на рис. 3.

Рассмотренный выше фазовращатель можно использовать и для получения сдвига фазы больше 2π , но при этом могут получаться одно-

ные срывы амплитуды выходного сигнала. Срыв появляется тогда, когда скачок управляющего сигнала происходит раньше момента сравнения величин управляющего сигнала и переднего фронта треугольного импульса. Это приводит к потере одного сравнения этих величин на входе компаратора 4, или, что тоже самое, к потере одного управляющего импульса на входе одновибратора. Описанное явление приводит к однократным срывам амплитуды выходного сигнала, что в свою очередь не дает гарантию использования рассматриваемого фазовращателя для получения сдвига фазы больше 2π .

В зависимости от скорости изменения управляющего сигнала и стабильности работы одновибратора амплитуда выходного сигнала может изменяться. Для полной стабилизации амплитуды следует подключить к выходу фазовращателя дополнительный ключ и фильтр, т. к. амплитуда выходных прямоугольных импульсов ключа уже не зависит от колебания амплитуды его входного сигнала. В этом случае появляется возможность управления амплитудой выходного синусоидального сигнала путем изменения величины питающего напряжения ключа.

2. Фазовращатель, основанный на использовании синусно-косинусных функциональных преобразователей.

Его математической моделью является известное тождество:

$$A \sin(\omega t + \varphi) = A \sin \varphi \cos \omega t + A \cos \varphi \sin \omega t. \quad (1)$$

Правая часть (1) представляет собой два вектора, вращающиеся с угловой скоростью ω , модули которых изменяются по законам синуса и косинуса. В [2] рассматривается такой фазовращатель, где синусно-косинусные функциональные преобразователи представляют набор сопротивлений с переключателем. Такой способ воспроизведения синуса и косинуса позволяет получить дискретное вращение фазы. Для плавного изменения фазы используют синусно-косинусные потенциометры. Однако, они являются механическими или электромеханическими элементами, что понижает быстродействие фазовращателя. При использовании электронных синусно-косинусных функциональных преобразователей возникает вопрос умножения $\sin \varphi$ на $\cos \omega t$ и $\cos \varphi$ на $\sin \omega t$ (функцию умножения при использовании синусно-косинусных потенциометров выполняют они же сами). В рассматриваемом фазовращателе (рис. 4) вместо устройств умножения используются электронные ключи и фильтр первой гармоники, что значительно упрощает схему фазовращателя в целом.

При реализации выражения (1), как оно записано, приходится использовать двухтактные электронные ключи, т. к. величины $A \sin \varphi$ и $A \cos \varphi$ принимают как положительные, так и отрицательные значения. Двухтактные ключи, по сравнению с одноктактными, более сложны и требуют дополнительного источника питания. Замена двухтактных ключей

чей на одитактные легко осуществляется при замене выражения (1) на (2)

$$A \sin(\omega t + \varphi) = -(A - A \cos \varphi) \sin \omega t - (A - A \sin \varphi) \cos \omega t + A\sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right). \quad (2)$$

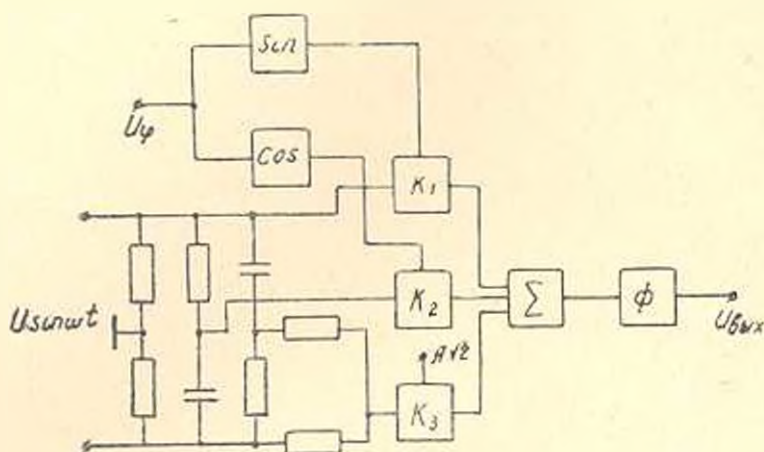


Рис. 4.

Правая часть (2) представляет собой сумму трех векторов, вращающихся с угловой скоростью ω . Один из них постоянный, а два других меняются только по модулю и сдвинуты друг относительно друга на $\frac{\pi}{2}$. Сказанное иллюстрируется на рис. 5, где приведены голографы этих векторов.

Входное синусоидальное напряжение поступает на вход двойного мостового фазорасщепителя, а на выходе получают три напряжения, соответствующие векторам с аргументами:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{3}{2} \pi \rightarrow (-\sin \omega t); \quad \pi \rightarrow (-\cos \omega t); \quad \frac{\pi}{2} \rightarrow \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \end{array} \right|.$$

Каждое из этих напряжений поступает на управляющий вход отдельного ключа. Управляющее фазой напряжение U_ϕ подается на вход синусного и косинусного функциональных преобразователей [3], выходные напряжения которых предварительно смещены на величину A и подаются на входы ключей K_1 и K_2 , а на вход ключа K_3 подается напряжение, равное $A\sqrt{2}$. Выходные импульсы ключей K_1 , K_2 , K_3 суммируются и поступают на вход фильтра первой гармоники, фаза выходного напряжения которого $A \sin(\omega t + \varphi)$ находится в линейной зависимости от величины управляющего напряжения φ , что и определяет точность преобразования фазовращателя. Отклонение от линейности приводит к появлению погрешности преобразования. Для первой схемы общая по-

грешность складывается из погрешностей компаратора, интегратора и фильтра, а для второй схемы — синусно-косинусного функциональных преобразователей, фильтра и ключа.

Погрешности интегратора, синусно-косинусного функциональных преобразователей и фильтра рассматриваются в [3, 4]. Погрешность ключа определяется формулой [5]

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta U}{U_m} \quad (3)$$

где ΔU — остаточное напряжение на транзисторе в состоянии насыщения; U_m — амплитудное значение выходного конца ключа.

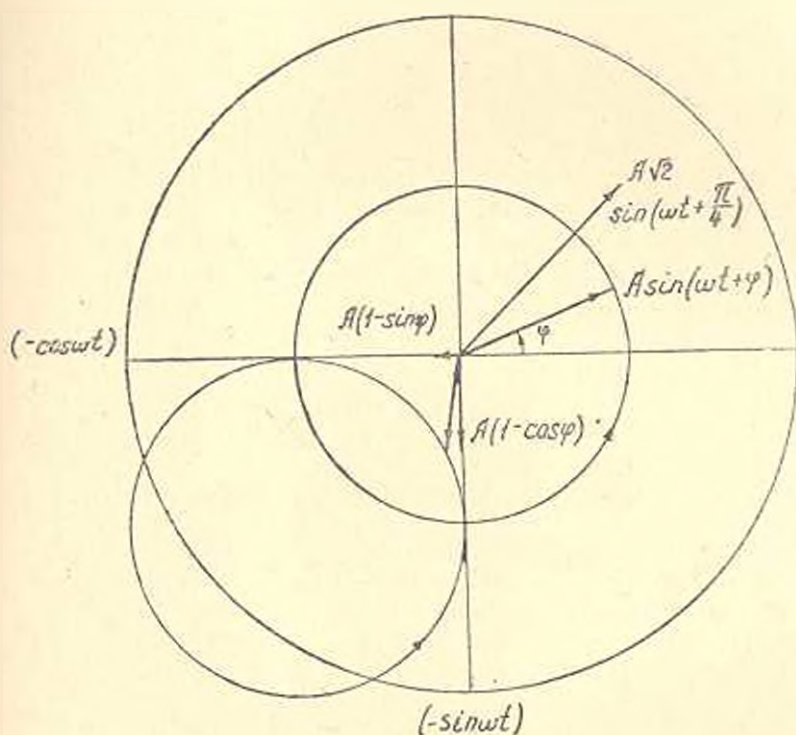


Рис. 5.

Погрешности компаратора легко может быть скомпенсирована путем смещения порога срабатывания.

Расчеты на основании [3, 4, 5] показывают, что обе схемы дают приблизительно одинаковую погрешность. При применении транзисторов с большим коллекторным и малым остаточным напряжениями (П416) общие погрешности рассмотренных фазовращателей составляют менее 1%.

Выводы

1. Первая схема управляемого фазовращателя значительно проще второй и ее следует применять в областях, где не требуется сдвига фазы больше 2π .

2. Отличительная особенность второй схемы заключается в том, что здесь полностью исключены срывы амплитуды выходного сигнала при неограниченном вращении фазы и при любой форме изменения управляющего напряжения, в том числе и пилообразной.

АрмНИИЭ

Поступило 1.V.1977.

Ք. Պ. ԱՍԱՏՐՅԱՆ

ՎԵՆԱՎԱՐՎՈՂ ՓՈԻԼԱՊՏՏԻՉՆԵՐ

Ա ճ փ ո փ ո լ լ

Հողվածում գիտարկվում են երկու տարրեր սկզբունքներով աշխատող փուլապատիշներ: Դրանցից մեկի աշխատանքը հիմնված է հոսանքային իմպուլսների առաջնային ճակատների օգտագործման, իսկ մյուսինը՝ սինուսկոսինուսային կերպափոխիչների կիրառման վրա: Չույց է տրված, որ դրանցից առաջինը նպատակահարմար է օգտագործել մինչև 27 փուլային շեղում ստանալու համար: 27-ից ավելի փուլային շեղում ստանալու համար նպատակահարմար է օգտագործել երկրորդ փուլապատիշը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Управляемый фазопривод. Авторское свидетельство № 299947.
2. Преснухин А. Н. и др. Муаровые разровые датчики положения и их применение. М., «Радио», 1969.
3. Асатрян Т. П., Амбарцумян Г. Г. Синусно-косинусный функциональный преобразователь. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. II.)», т. XXIX, № 2, 1976.
4. Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. М., Физматгиз, 1963.
5. Агаханян Т. М. Электронные ключи и нелинейные импульсные усилители. М., «Радио», 1966.

ГИДРАВЛИКА

В. О. ТОКМАДЖЯН, Г. Н. КАРАПЕТЯН

К ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ШАХТНОГО ВОДОСЛИВА

Существующий метод расчета шахтного водослива предложен А. Н. Ахутином [1]. Радиус шахтного водослива определяется на основе универсальной формулы водослива:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{Q}{m \sqrt{2g H^3}} + ts \right), \quad (1)$$

где m , H — коэффициент расхода и напор водослива; t , s — число и ширина бычков; π — коэффициент сжатия, принимаемый в среднем 0,9 (при наличии бычков).

При $2 < R_1/H < 5$ применяется водослив с практическим профилем, а при $R_1/H > 7$ — с плоским гребнем. Длину гребня берут $3,5 H < B < (0,4 - 0,5) R_1$, а угол наклона — $\varepsilon = 6^\circ - 9^\circ$ (рис. 1). Далее принимается, что в конце гребня глубина равна $0,65 H$.

Профиль водослива делается безвакуумным, а диаметры шахты и отводящего тоннеля принимаются из расчета, чтобы весь напор H_1 затрачивался для преодоления гидравлических сопротивлений в напорной системе. Аналогичен и расчет шахтного водослива с практическим профилем без плоского гребня.

Имеем следующие возражения к отмеченному методу.

1. Формула водослива (1) приемлема для случая, когда в начальном сечении геометрический уклон больше критического ($i_0 = \sin \varepsilon > i_{кр}$) и водослив является не подтопленным.

2. Значение глубины в конце гребня, принятое $0,65 H$, является грубо приближенным и необоснованным. Оно зависит от значений исходных гидравлических параметров.

3. Безвакуумный профиль не всегда является рациональным и даже возможным. При больших расходах и малых напорах H диаметры поронки, шахты и тоннеля получаются большими. Пересечение кривых свободных поверхностей струй на оси происходит на большой глубине. Возможно также, что пересечение будет на глубине больше фактической H_1 . При безвакуумном профиле уменьшается общий напор системы H_1 , что приводит к увеличению диаметров шахты и отводящего тоннеля. Нам кажется целесообразным профиль водослива выбрать напорным, с близким пересечением кривых свободной поверхности, что

обеспечивает меньшие значения диаметров шахты и тоннеля и экономически более выгодно.

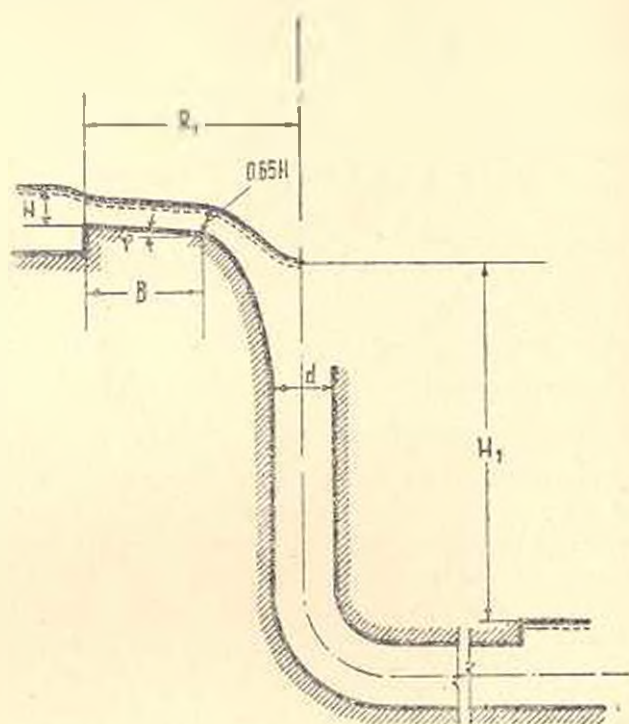


Рис. 1.

4. Метод не дает возможности гидравлического расчета в случае подтопленного водослива и водослива при расходах и диаметрах тоннеля и шахты, отличных от расчетного.

5. Полная средняя скорость в произвольном сечении струи (v_n) [1] определяется неточно:

$$v_n = \sqrt{v_1^2 + 2gy + 2v_1 \sin \varphi + 2gy}. \quad (2)$$

Третий член под корнем не существует, что легко доказать по энергетическому балансу:

$$\frac{mv_n^2}{2} = \frac{mv_1^2}{2} + mgy, \quad (3)$$

где m —масса воды, v_1 —средняя скорость в начальном сечении (в конце гребня); y —ордината оси произвольного сечения, считая от начального.

Нами предлагается новый метод гидравлического расчета шахтного водослива, рассматривая движение воды на участке плоского гребня и водосливного профиля любого заданного очертания как неравномерное движение с радиальными линиями тока в плане и криволинейными живыми сечениями по нормали к движению.

Построение кривой свободной поверхности на участке плоского гребня проводится интегрированием на ЭВМ дифференциального уравнения неравномерного движения в цилиндрических координатах [2], которое для данной расчетной схемы имеет вид:

$$\frac{dh}{dr} = \frac{-\sin \varphi + \frac{\alpha q^2}{gr^2 h^3} \left(\frac{n^2 g}{\alpha h^{2/3}} + \frac{h}{r} \right)}{\cos \varphi - \frac{\alpha q^2}{gr^2 h^3}} \quad (4)$$

где $I_0 = \sin \varphi$ — уклон гребня; α — коэффициент неравномерного распределения скоростей (принимается $\alpha = 1.1$); h — глубина потока; r — радиус произвольного сечения; n — коэффициент шероховатости; q — показатель в формуле Павловского; $q = \frac{Q}{2\pi}$ — удельный расход.

Граничными условиями будут при: $r = R_1$; $h = h_{кр}$ (R_1 — радиус гребня водослива; $h_{кр}$ — критическая глубина).

Анализ уравнения (4) показывает, что для бурного потока по направлению уменьшения радиуса r (направления движения) геометрическое падение (I_0) уменьшает, а гидравлические сопротивления (член $q^2 n^2 / r^2 h^{3/2}$) и сужение русла (член $\alpha q^2 / g h^2 r^2$) увеличивают глубину. В результате глубина вдоль плоского порога может меняться в довольно широком диапазоне.

Гидравлический расчет воронки сводится к интегрированию дифференциального уравнения неравномерного движения с учетом криволинейности дна по заданному закону профиля, которое имеет вид [3]:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{\left(1 + h \frac{d\varphi}{dl}\right) \sin \varphi - \frac{Q^2}{\omega^2 G^2 R} \left[1 - \frac{\alpha G^2 R}{g \omega} \left(1 - k \frac{h}{R_0}\right) \frac{d\omega}{dl} \right]}{\cos \varphi - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} \left[\left(1 - k \frac{h}{R_0}\right) \frac{d\omega}{dh} + k \frac{\omega}{2 R_0} \right]} \quad (5)$$

где φ — угол между вертикалью и направлением данного сечения; k — коэффициент коррекции ($k \approx 1.0$).

В случае, когда профиль воронки представляет дугу окружности, имеем $dl = R_0 d\varphi$ (R_0 — радиус кривизны). Площадь живого сечения в нормальном направлении определяется выражением $\omega = 2\pi r h$, где r — средний радиус сечения, равный:

$$r = R_2 - (R_0 \pm 0.5h) \sin \varphi + R_0 \sin \varphi_0. \quad (6)$$

Здесь R_2 — начальный радиус воронки (рис. 2); $\alpha = 2\pi(r + 0.5h \sin \varphi)$ — смоченный периметр.

Имея в виду, что

$$\frac{d\omega}{dl} = -2\pi h \left(1 + \frac{h}{2R_0}\right) \cos \varphi, \quad \frac{d\omega}{dh} = 2\pi(r + 0.5h \sin \varphi)$$

и принимая коэффициент Шези по формуле Павловского $C = \frac{1}{n} R^x$, после преобразований получим:

$$\frac{dh}{dz} = \frac{X}{Y}, \quad (7)$$

где

$$X = (R_0 + h) \sin \varphi - \frac{\alpha q^2 R_0}{g r^2 h^3} \left[\frac{n^2 g \left(1 + \frac{h}{2r} \sin \varphi\right)^{2y+1}}{\alpha h^{2y}} + \right. \\ \left. + \frac{h}{r} \left(1 + \frac{h}{2R_0}\right) \left(1 - k \frac{h}{R_0}\right) \cos \varphi \right], \\ Y = \cos \varphi - \frac{\alpha q^2}{g h^3 r^3} \left[r \left(1 - \frac{kh}{2R_0}\right) - \frac{h \sin \varphi}{2} \left(1 - \frac{kh}{R_0}\right) \right].$$

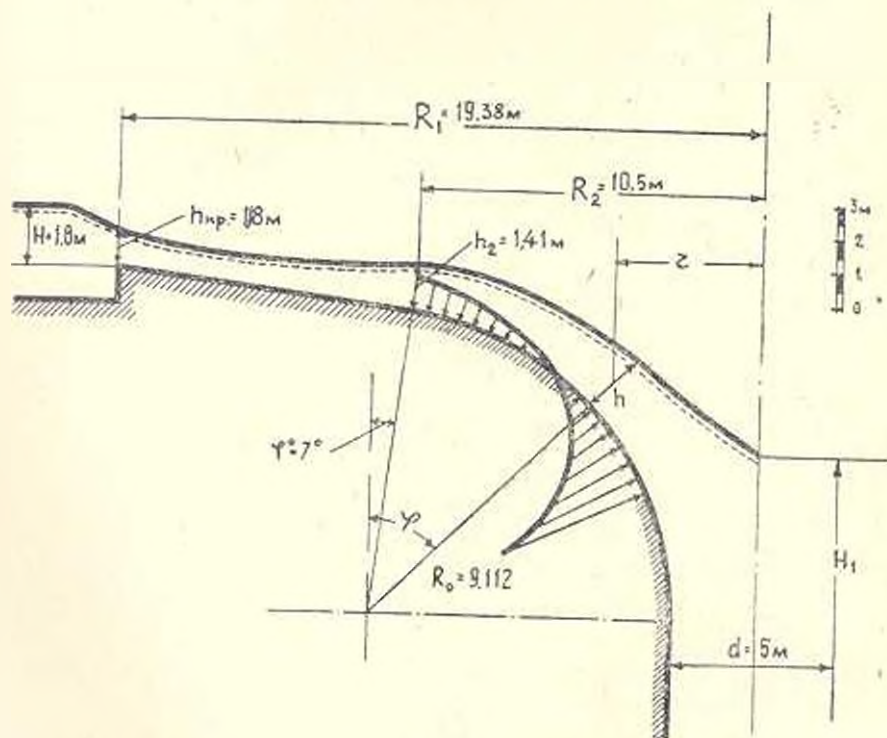


Рис. 2.

Интегрирование (7) на ЭВМ производится аналогично методу, приведенному в [5], и по результатам вычислений строится кривая свободной поверхности на участке воронки.

Давление на поверхности профиля воронки до пересечения кривой свободной поверхности с осью, с учетом его отклонения от гидростатического определится по формуле [4]:

$$\frac{P}{\gamma} = h \cos \varphi - \frac{h v^2}{g R_0} \quad (8)$$

Диаметр отводящего тоннеля определяется из вышеуказанного принципа.

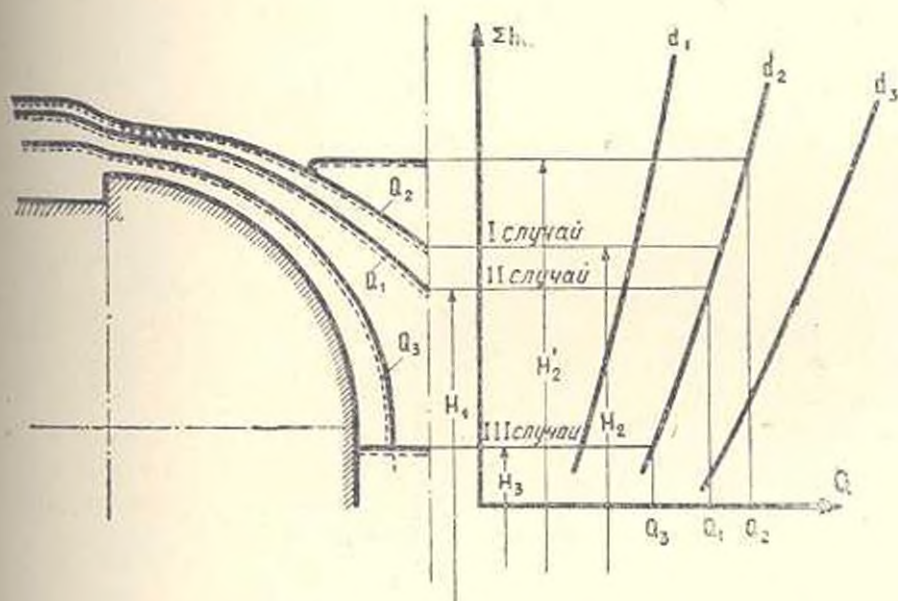


Рис. 3.

Предложенный метод даст возможность провести гидравлический расчет при разных режимах работы шахтного водослива, в том числе и при подтопленном режиме. Пусть в первом случае (рис. 3) при расчетном расходе Q_1 пересечение кривой свободной поверхности с осью происходит на высоте, которая обеспечивает равенство напора H_1 и гидравлических потерь энергии Σh_n . Во втором случае при расходе Q_2 пересечение происходит на высоте H_2 . В этом случае образуется круглый гидравлический прыжок и в спокойном режиме уровень над воронкой становится равным $H_2 = \Sigma h_n$, что обеспечивает пропуск данного расхода. Когда уровень при спокойном режиме вследствие круглого прыжка будет выше отметки начала гребня водослива плюс критическая глубина, шахтный водослив работает в подтопленном режиме.

Расход подтопленного водослива определится:

$$Q = \epsilon m (2R_1 - ts) h \sqrt{2g(H - h)}, \quad (9)$$

где h — возвышение уровня воды в воронке над начальной отметкой гребня.

В третьем случае расход водослива Q_3 настолько мал, что кривая свободной поверхности не пересекается с осью. При этом в шахте установится уровень воды, соответствующий гидравлическим потерям напо-

ра $H_1 = \sum h_n$. Нанесение характеристических семейств кривых позволяет анализировать работу шахтного водослива при разных диаметрах тоннеля.

Пример: $Q = 469 \text{ м}^3/\text{с}$; $H = 1,8 \text{ м}$; $d = 5,0 \text{ м}$; $R = 9,11 \text{ м}$.

Определяем R_1 по (1) — $R_1 = 19,38 \text{ м}$ и принимаем $\varphi = 7^\circ$, $B = 8,89 \text{ м}$.

Критическая глубина в начале гребня без бычков будет:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{(2\pi R_1)^2 g \cos \varphi}}.$$

Интегрируя на ЭВМ уравнение (5) с начальными координатами $r_1 = R_1 = 19,38 \text{ м}$, $h_1 = h_{кр} = 1,19 \text{ м}$, получим координаты кривой свободной поверхности до конца плоского гребня. С этого сечения интегрирование производится по (7) до пересечения кривой свободной поверхности с осью шахты. Одновременно определяется и давление вдоль профиля воронки.

На рис. 2 дана кривая свободной поверхности и эпюра давления для указанного примера.

Учет гидравлических сопротивлений незначительно влияет на результаты вычислений и в практических расчетах ими можно в большинстве случаев пренебречь. Указанное условие не только облегчает расчет, но и позволяет его вести при любом сложном профиле, используя метод непосредственного применения уравнения Бернулли.

Выводы

1. Существующий метод гидравлического расчета шахтного водослива имеет существенные недостатки и нуждается в усовершенствовании.

2. В предлагаемом методе гидравлического расчета шахтного водослива движение воды на участке плоского гребня и водосливной воронки рассматривается как неравномерное с радиальными линиями тока в плане и криволинейными живыми сечениями по нормали к движению.

3. В основу расчетов принимается дифференциальное уравнение неравномерного движения в открытом русле с криволинейным дном, с учетом отклонения давления от гидростатического вследствие воздействия центробежных сил.

4. Предложенный метод позволяет проводить гидравлический расчет шахтного водослива при разных режимах работы.

ЕрIII

из. К. Маркса

Поступило 17.IV 1978

Վ. Ն. ԹՈՔՄԱԶՅԱՆ, Ա. Ի. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ՀԱՐԱՆԱՅԻՆ ԶՐԱԹԱՓԻ ՀԻԳՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Վ Փ Ո Վ Ո Ր

Առաջարկվում է հորանային ջրթափի հիդրավիկական հաշվարկի նոր մեթոդ, որում ջրի շարժումը ջրաթափի շեմքի և ձաղարի վրա դիտարկվում է որպես պլանում շառավիղային հոսքի դժերով և կորագիծ կենդանի կտրվածքներով անհավասարաչափ շարժում: Խնդրի լուծումը հանգում է էՂՄ-ի օգնությամբ շեմքի և ձաղարի մասում անհավասարաչափ շարժման դիֆերենցիալ հավասարման ինտեգրմանը: Առաջարկված մեթոդը հնարավորություն է տալիս կատարելու ջրթափի հիդրավիկական հաշվարկը տարբեր ելքերի և ջրաթափերի սյրոֆիլների համար ինչպես շտուգված, այնպես էլ ստղծված ուժերի դեպքում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Справочник по гидротехнике. М., Гостройиздат, 1955, с. 115.
2. Тоқмаджян В. О. Растекание круглой вертикальной струи при встрече с конической поверхностью. Сб. науч. тр. ЕрПН, сер. «Строительство и архитектура», т. 26, 1975, с. 160—166.
3. Тоқмаджян В. О. О гидравлическом расчете каналов с криволинейным дном. «Известия АН Арм. ССР (серия Т. Н.)», т. XXXI, № 3, 1978.
4. Тоқмаджян В. О. Распределение давления в каналах с криволинейным дном. Межвуз. сб. науч. тр. ЕрПН «Строительство и архитектура», сер. XII, вып. 2, Ереван, 1976, с. 268—270.
5. Тоқмаджян В. О. К интегрированию дифференциального уравнения неравномерного движения жидкости в открытых руслах. Межвуз. сб. науч. тр. ЕрПН «Строительство и архитектура», сер. XII, вып. 3, Ереван, 1977, с. 150.

ГИДРАВЛИКА

С. А. АНАНИН, Ж. А. АЧОЯН, А. К. АНАНИН

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
МАССОПЕРЕНОСА ФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПОТОКОМ В ГРУНТАХ

Освоение засоленных земель методом химической мелниорации является слабоизученной проблемой. Опыты показали, что содовые солончаки Араратской равнины можно освоить в кратчайшие сроки, когда капитальные промывки осуществляются однопроцентным раствором серной кислоты или порошком железного купороса по технологии, разработанной НИИ Почвоведения и Агротехники МСХ Арм. ССР.

Методика натурных и теоретических исследований по данному вопросу изложена в [1—4], поэтому в статье она не освещается.

§1. Результаты натурных исследований по водно-солевому режиму

Промывку засоленных земель предусмотрено производить после строительства систематического горизонтального дренажа средней глубиной заложения, равной 3,5 м, и междренним расстоянием, равным 150—200 м. Расчетные параметры дренажа установлены, исходя из нагрузки на дрены в эксплуатационный период.

Промывка содовых солончаков Араратской равнины осуществляется методом химической мелниорации, которая разработана НИИ Почвоведения и Агрохимии Арм. ССР [5—7]. Содовые солончаки обрабатываются слабым раствором серной кислоты (0,8—1%) или порошком железного купороса с проведением последующих промывок для удаления солей и продуктов реакции. В результате кислотоваия имеет место радикальное улучшение почвы в смысле нейтрализации щелочности, разложения карбонатов с переходом в сульфаты и бикарбонаты кальция и магния, свертывание гидрофильных коллоидов, образование высокодисперсного гипса, активизация кальциевых соединений и питательных элементов почвы. Благодаря разложению карбонатов кальция, в среде образуются ионы кальция, которые приводят к изменению соотношений обменных катионов в сторону вытеснения натрия из поглощенного комплекса и замены его ионами кальция. В процессе кислотоваия получают продукты реакции, удаляемые из почвы промывными водами, в т. ч. и гипс, мелниоративная роль которого сказывается на последующих стадиях мелниорации.

Промывные нормы при химическом методе мелиорации содовых солончаков определяются по воднорастворимому и поглощенному комплексу ($\text{Na}+\text{K}$).

Опыты [1, 6] показали, что эти нормы для воднорастворимого комплекса ($\text{Na}+\text{K}$) при допустимом пороге токсичности, равном 1,5 мг-экв, получаются в 2—3 раза больше по сравнению с поглощенными ($\text{Na}+\text{K}$) при допустимом пороге токсичности, равном 4 мг-экв. Последующие все расчеты относятся к воднорастворимому комплексу ($\text{Na}+\text{K}$), так как он является главным показателем при установлении степени рассоления почвы и грунтовых вод.

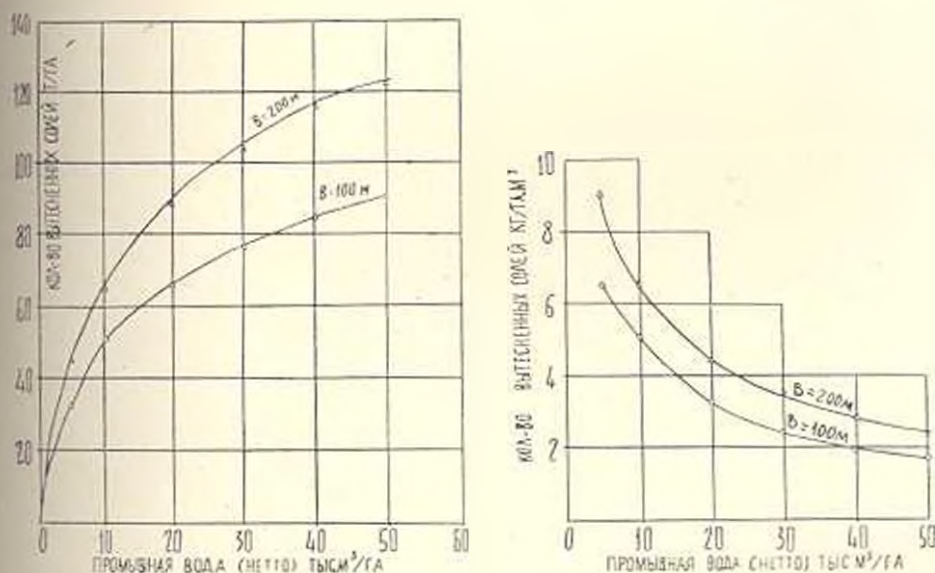


Рис. 1. Изменение коэффициента засоления в зависимости от объема промывной воды и междреннего расстояния.

Процесс засоления засоленной почвы при промывках на фоне горизонтального дренажа при междреннем расстоянии, равном 100 и 200 м, приведен на рис. 1. Кривые получены на основании многолетних исследований [1] на опытно-дренажном пункте ИНИВЦиГ при промывке содовых солончаков однопроцентным раствором серной кислоты и порошком железного купороса. Опыты производились на средних и тяжелых суглинках, характерных для почвенных разностей Араратской равнины.

На рис. 2—3 приведены характерные опытные кривые рассоления почвы в зависимости от объема поданной в чек промывной воды [1]. Сплошные кривые соответствуют воднорастворимому ($\text{Na}+\text{K}$), а пунктирные — поглощенному ($\text{Na}+\text{K}$).

На рис. 4—6 приведены характерные эпюры распределения по глубине воднорастворимого комплекса ($\text{Na}+\text{K}$) по различным почвенным разрезам [1].

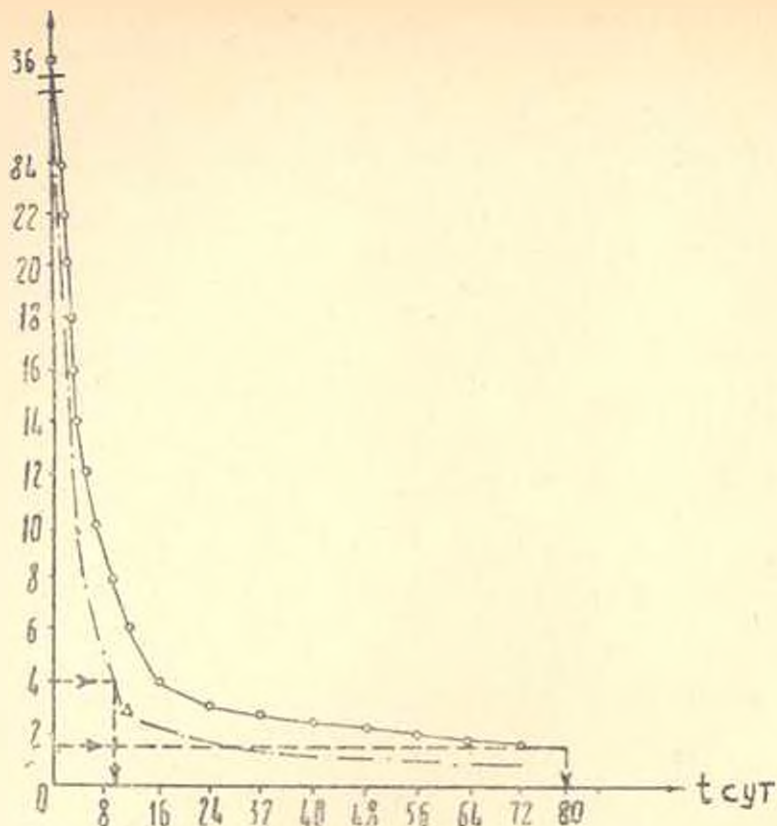


Рис. 2. Изменения запасов солей в почве в зависимости от объема промывной воды для воднорастворимого ($\text{Na} + \text{K}$) и поглощенного ($\text{Na} + \text{K}$) комплекса (тяжелосуглинистые почвы).

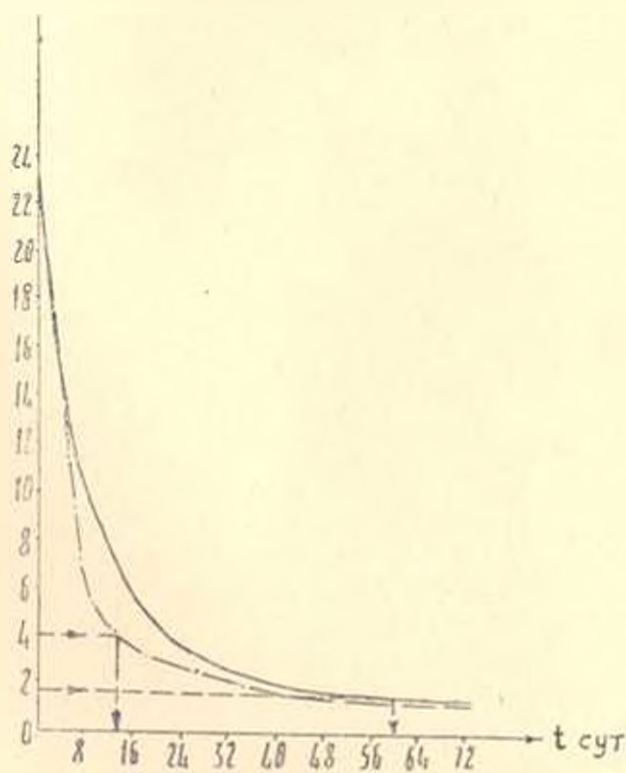


Рис. 3. То же для средне-суглинистых грунтов.

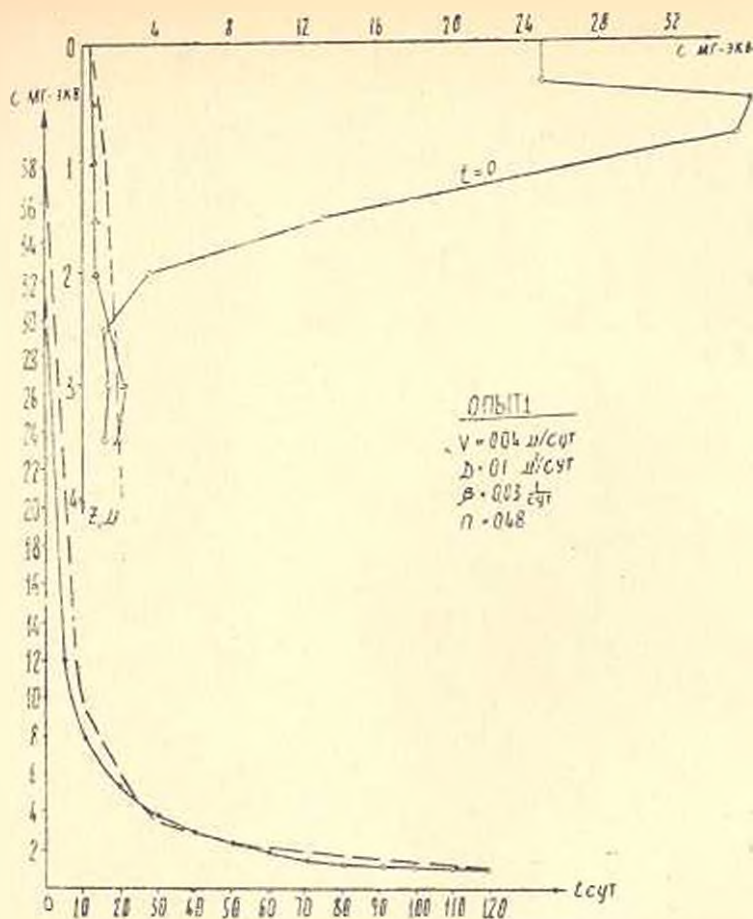


Рис. 4. Сопоставление опытных и расчетных кривых воднорастворимого комплекса (Na + K) (опыт 1).

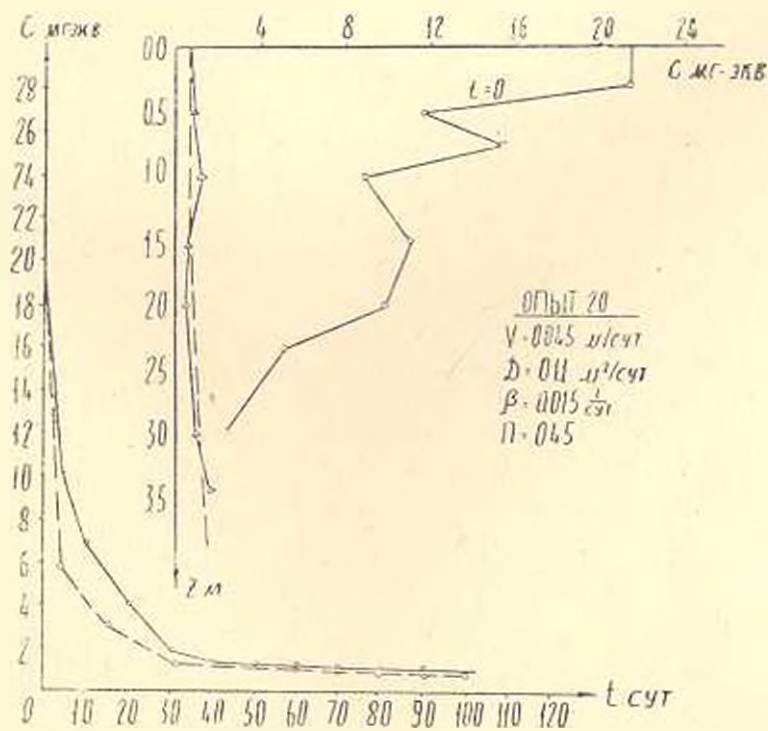


Рис. 5. То же для опыта 20.

По данным кривых рис. 2—3 при заданном содержании в почве $(Na+K)$ для допустимого 1,5 мг-экв порога токсичности воднорастворимого $(Na+K)$ нетрудно определить промывные нормы.

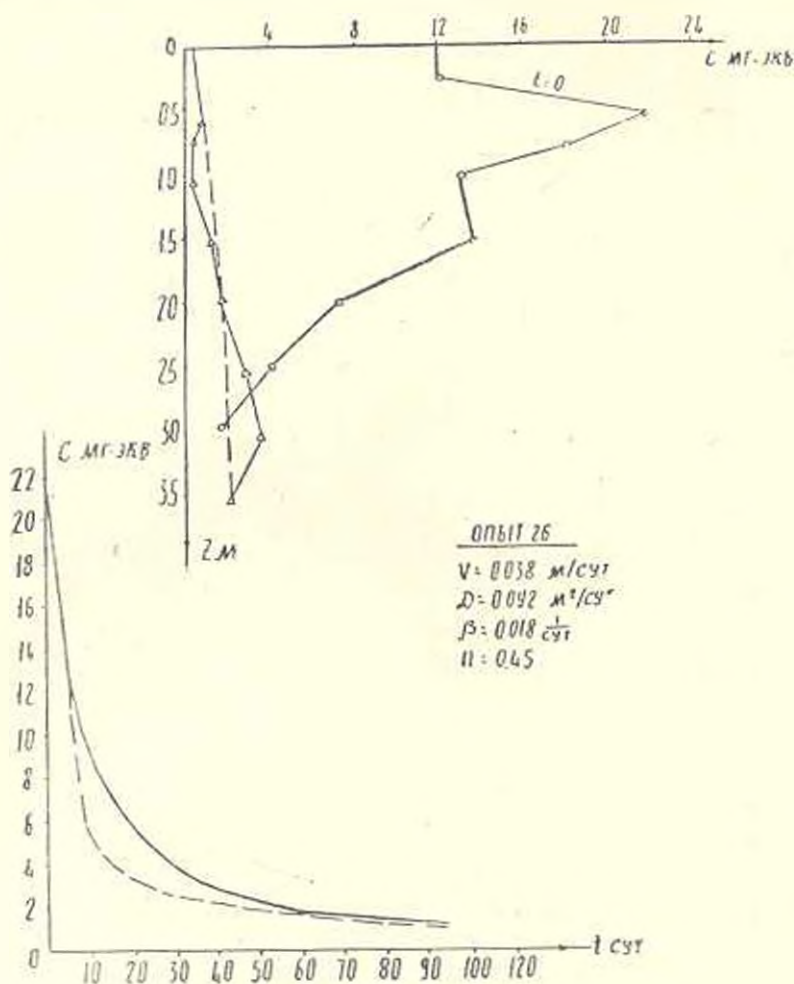


Рис. 6. То же для опыта 26.

Натурные опыты показали, что продолжительность промывки на фоне систематического горизонтального дренажа по непрерывной схеме подачи воды в чеки в зависимости от междренного расстояния, степени засоленности почвы, коэффициента фильтрации и водно-физических характеристик грунтов длится от 60 до 130 суток. При норме промывки, равной от 25000 до 50000 $\text{м}^3/\text{га}$, средняя скорость инфильтрации воды в зоне аэрации при постоянной глубине воды в чеке, равной 0,20—0,4 м, достигает от 0,04 до 0,05 м/сут , а на отдельных вертикалях — до 0,07 м/сут .

Скорость отвода промывных вод, которая создает систематический дренаж при напоре $h = 3,0 \text{ м}$ (при междренном расстоянии, равном $B = 150 \text{ м}$), получается:

$$v = \frac{=kh}{B \left(\ln \frac{B}{d} - 1 \right)} = \frac{3,14 \cdot 3,5 \cdot 3}{150 \left(\ln \frac{150}{0,5} - 1 \right)} = 0,047 \text{ м/сут.} \quad (1)$$

Отсюда видно, что при капитальной промывке отпадает необходимость строительства временного дренажа для отвода части промывных вод, так как скорость отвода, создаваемая систематическим дренажом, в среднем, получается равной скоростям инфильтрации в зоне аэрации.

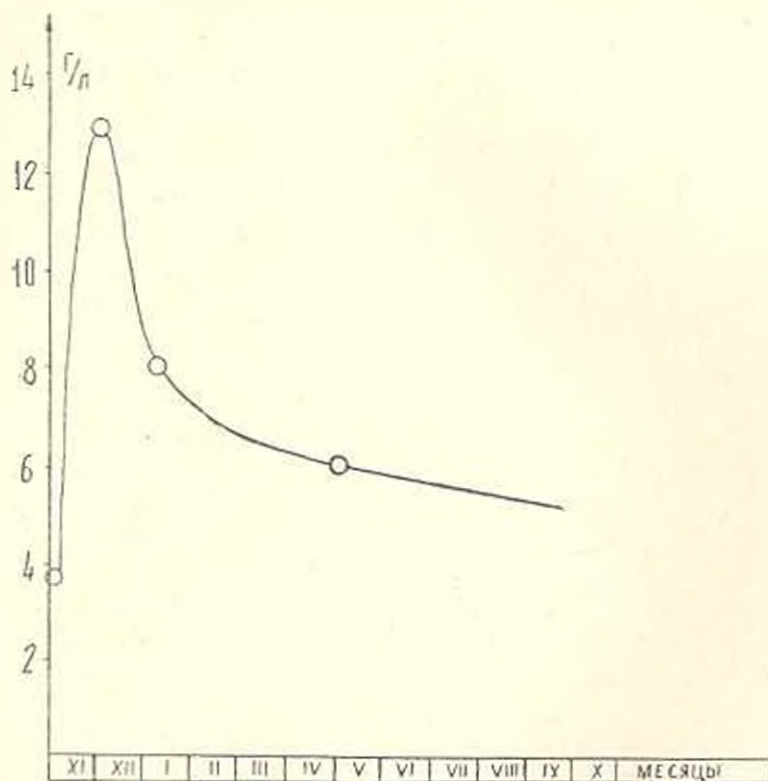


Рис. 7. Изменения по времени минерализации воды в дренаже в процессе капитальных промывок.

При капитальных промывках дренажный модуль в среднем достигает 4 л/сек-га, а иногда и больше при междренном расстоянии, равном 150—200 м [1]. При этом содержание водно-растворимых (Na+K) почвенного раствора в чеках от своего начального значения 30 мг-экв (25—30 г/л) в процессе промывки уменьшается и в конце промывки достигает в среднем 1,5—2 мг-экв. При этих условиях общая минерализация вод в закрытых дренажах (рис. 7) в начале промывки увеличивается и достигает 14 г/л, а затем по времени уменьшается и приближается к 3—4 г/л. В зависимости от числа одновременно промываемых чеков количество солей, поступающих в дренаж, увеличивается, но концентрации солей при этом не будет сильно изменяться (характер кривой рис. 7 существенно не изменится), г. к. с увеличением тоннажа солей пропорционально увеличится и объем воды.

По инструкции [8] МСХ и ММнВХ Арм. ССР предусмотрены на засоленных землях поливные нормы увеличивать на 20—30% по отношению к обычным. Это положение установлено, в основном, из условия получения максимального урожая сельскохозяйственных культур и создания необходимой интенсивности выходящего фильтрационного потока в зоне аэрации и среднегодовом периоде времени. В эксплуатационный период полна намечается проводить речными водами, минерализация которых равняется 0,5 г/л, и откаченными водами из слабонапорного водоносного слоя, минерализация которых не превышает 1 г/л. При этом токсические компоненты солей в воде отсутствуют.

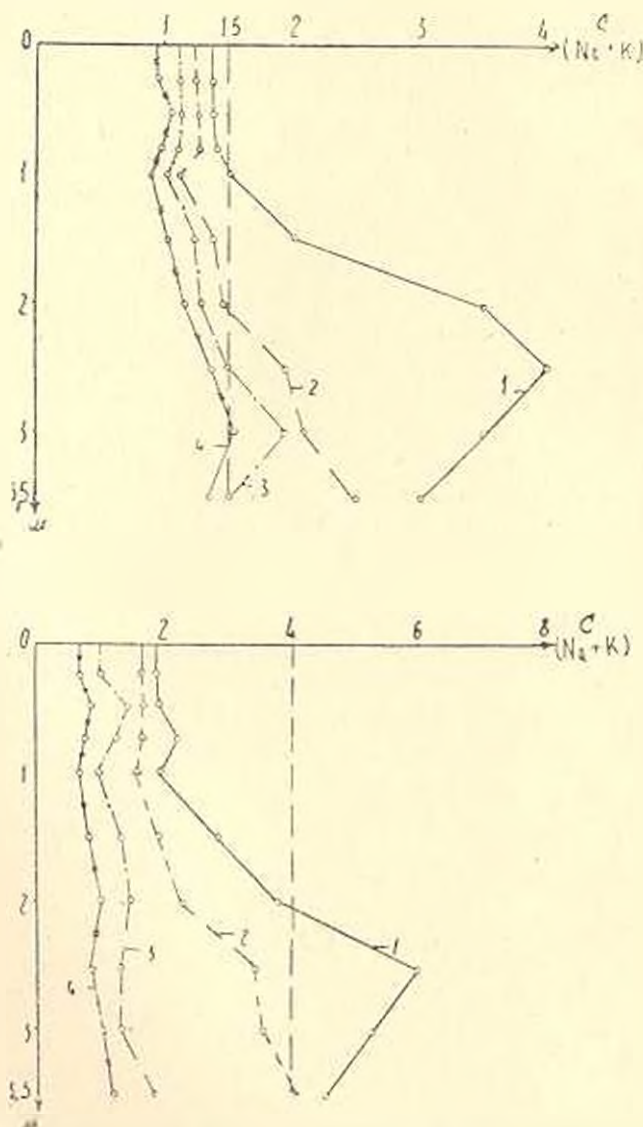


Рис. 8. Изменение по времени (по годам 1, 2, 3, 4) подвижного комплекса $(Na + K)$ в зоне аэрации в период сельскохозяйственного освоения земель (орошения).

Четырехлетние исследования [1, 2] на рассоленных землях в условиях работы горизонтального дренажа и выращивание сельскохозяйственных культур (люцерны и плодовые сады) показали, что за этот период рассоление почвы происходит по всей толще зоны аэрации (три метра и больше, рис. 8). Кроме того, в грунтовых водах и в почвах токсические компоненты смываются и уносятся дренажом. Поэтому потенциальные возможности реставрации процессов засоления при глубине осушения, равной 3 м, практически исключаются (испарения с поверхности грунтовых вод при глубине осушения 3 м достигают своих минимальных значений).

§ 2. Расчет водно-солевых режимов при капитальных промывках

Приведенные экспериментальные данные полно и надежно характеризуют работу систематического дренажа и период капитальных промывок и орошения. По этим показателям можно разрешить основные вопросы динамики водно-солевых процессов в почвах и в грунтовых водах. С целью более широкого обобщения результатов натурных исследований изложим приближенную методику расчета этих процессов, используя методы физико-химической гидродинамики.

При решении этой задачи мы не будем пользоваться существующими готовыми решениями, так как численным методом можем более точно учитывать особенности задачи.

Основные вопросы динамики водно-солевых процессов в период капитальных промывок и орошения приближенно можно разрешить при помощи известных дифференциальных уравнений массопереноса в фильтрационном потоке, которые для одномерной задачи можно представить в следующем виде:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} + \beta (C_{\Pi} - C) = n \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (2)$$

где C — концентрация почвенного раствора для воднорастворимого комплекса; v — скорость фильтрации; D, β — коэффициенты конвективной диффузии и скорости растворения для воднорастворимого комплекса; C_{Π} — концентрация предельного насыщения, которая принимается равной максимальному значению концентрации воднорастворимого комплекса; n — пористость грунта; z — вертикальная ось (начало координат расположено на поверхности почвы); t — время. Не останавливаясь на некоторых, пока нерешенных вопросах о применимости дифференциального уравнения (2) для содово-засоленных почв отметим, что после химической мелiorации качественные характеристики почвы претерпевают сильные изменения, их характеристики кислотообразования приближаются к характеристикам почв, для которых диффузионные законы Фика применимы. В значительной степени эти нерешенные вопросы разрешаются положительно тогда, когда величины коэффициентов, которые входят в

уравнение (2), определяются из натурных опытов в соответствующих почвенно-гидрогеологических условиях.

Дифференциальные уравнения (2) будем решать при следующих начальных и граничных условиях:

$$t = 0; \quad C(z) = c(z); \quad (3)$$

$$t > 0; \quad z = 0; \quad C = C_0; \quad (4)$$

$$z = M; \quad \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

На опытно-дренажном пункте НИИВШГ были поставлены специальные опыты для определения значений коэффициентов конвективной диффузии, скоростей растворения и фильтрации [1—2].

Дифференциальное уравнение (2) при начальных и граничных условиях (3) — (5) решаем на универсально-сеточной модели (УСМ-1) с использованием цифровой машины «Наирн-2» [3, 4, 9]. При постоянных значениях коэффициентов конвективной диффузии D и скорости растворения v конечно-разностные уравнения массопереноса (2) удобно представить в виде уравнения Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_1 - C_2}{\Phi_1} + \frac{C_2 - C_3}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_2}{\Phi_3} &= \frac{C_2^t - C_2^{t-\Delta t}}{\Phi_t} \\ \frac{C_2 - C_3}{\Phi_1} + \frac{C_4 - C_3}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_3}{\Phi_3} &= \frac{C_3^t - C_3^{t-\Delta t}}{\Phi_t} \\ \frac{C_3 - C_4}{\Phi_1} + \frac{C_3 - C_4}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_4}{\Phi_3} &= \frac{C_4^t - C_4^{t-\Delta t}}{\Phi_t} \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{1}{\frac{D_1 \Delta x \Delta y}{\Delta z} + \frac{v \Delta x \Delta y}{2}}; \quad \Phi_2 = \frac{1}{\frac{D \Delta x \Delta y}{\Delta z} - \frac{v \Delta x \Delta y}{2}}; \quad (7)$$

$$\Phi_3 = \frac{1}{2 \Delta x \Delta y \Delta z}; \quad \Phi_t = \frac{1}{n \Delta x \Delta y \Delta z}. \quad (8)$$

Для составления электрической блок-схемы (рис. 9) необходимо, чтобы сопротивление от узла 2 к 3 равнялось сопротивлению от узла 3 к 2. Эти условия должны быть удовлетворены для любого n узла сетки, т. е. от узла $(n-1)$ к узлу (n) и от узла (n) к узлу $(n-1)$.

Чтобы преодолеть указанные выше трудности, достаточно все члены конечно-разностных уравнений помножить на некоторую постоянную величину, значение которой для каждой строки системы уравнений (6) определяем формулой

$$K_i = \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right)^{i-1}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (9)$$

где i — номер строки конечно-разностных уравнений (6). После осуществления этих преобразований получим расчетные формулы сопротивлений для любого узла сетки электрической блок-схемы с одновременно удовлетворяющимися условиями одинаковости гидравлических (Φ) или электрических (R) сопротивлений между узлами

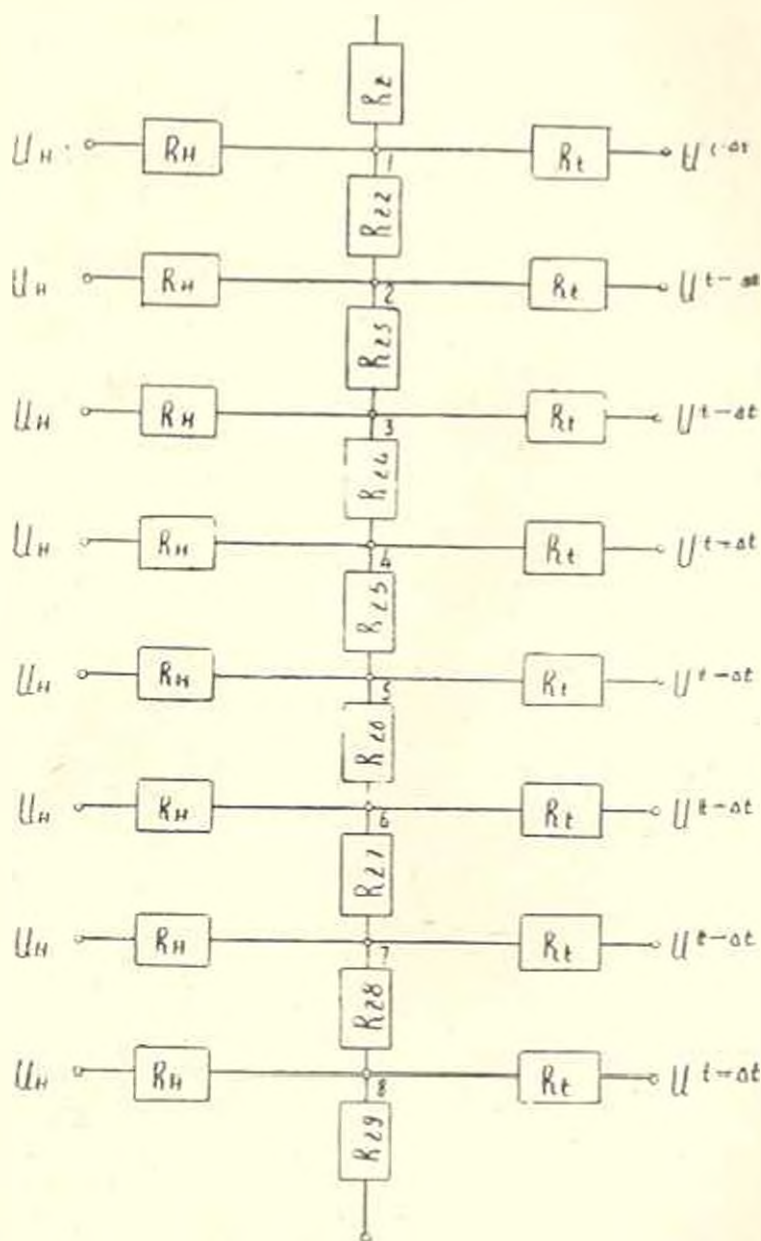


Рис. 9. Принципиальная электрическая блок-схема расчета сеточной модели.

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_1 - C_2}{\Phi_1} + \frac{C_3 - C_2}{\Phi_2} + \frac{C_n - C_2}{\Phi_3} &= \frac{C_2' - C_2'^{-\Delta t}}{\Phi_1} \\ \frac{C_2 - C_3}{\Phi_2} + \frac{C_4 - C_3}{A_2} + \frac{C_n - C_3}{B_2} &= \frac{C_3' - C_3'^{-\Delta t}}{\Phi_2} \\ \frac{C_3 - C_4}{A_2} + \frac{C_4 - C_4}{A_3} + \frac{C_n - C_4}{B_3} &= \frac{C_4' - C_4'^{-\Delta t}}{\Phi_3} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_i &= \frac{\Phi_2^i}{\Phi_1^{i-1}}; & B_i &= \Phi_3 \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right)^{i-1}; & \Phi_{ii} &= \Phi_i \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} \right)^{i-1}; \\ R_{iA} &= \alpha_A A_i; & R_{iB} &= \alpha_B B_i; & R_{ii} &= \alpha_R \Phi_{ii}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 4—6. Сплошной линией нанесены результаты натурных опытов, а пунктирной линией — теоретических расчетов.

Из этих данных видно, что опытные и теоретические расчеты, в целом, дают удовлетворительные результаты, если считаться с весьма сложным процессом явления массопереноса в почвенной среде и неизбежными ошибками, которые обычно имеют место в натурных опытах. Теоретический метод после такой проверки можно рекомендовать для расчета водно-солевых режимов на вновь мелиорируемых землях, не выполняя при этом большого числа экспериментов.

Практические рекомендации

1. Для средне- и тяжелосуглинистых грунтов коэффициент солеотдачи (объем воды для смыва из твердой фазы одной тонны воднорастворимого комплекса $(Na+K)$) при мелиорации содово-засоленной почвы порошком железного купороса можно определить из данных графиков рис. 1.

2. Промывные нормы для метрового слоя средне- и тяжелосуглинистых грунтов в зависимости от принятого допустимого порога токсичности воднорастворимого комплекса $(Na+K)$ можно определить по данным графиков рис. 2—3.

3. Практически с достаточной точностью процесс массопереноса (процесс рассоления содово-засоленных почв) можно определить методом физико-химической гидродинамики. При этом необходимо расчетные параметры, которые входят в эти зависимости, определить натурными опытами для каждого характерного участка в отдельности.

4. Продолжительность периода промывки для сильно засоленной толщи в зависимости от начального содержания в почве воднорастворимого комплекса $(Na+K)$ длится от 60 до 130 дней, при скоростях нисходящего фильтрационного потока 0.040—0.06 м/сут.

Ս. Ա. ԱՆԱՅԱՆ, Ժ. Ա. ԱԶՈՏԱՆ, Ա. Կ. ԱՆԱՅԱՆ

**ՀՈԴԵՐՈՒՄ ՖԻԼՏՐԱՑԻՈՆ ՀՈՍԲՈՎ ԿԱՍՍԱՓՈԽԱՆԱԿԱՆ
ՓՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԿԻ ԲԱՆԻ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ ԿԱՍԻՆ**

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Հողվածում բերված են դաշտային և տեսական հետազոտությունների արդյունքները սողա պարունակող աղուտների լվացման պրոցեսների ժամանակ:

Բերված են փորձնական ճանապարհով ստացված մի քանի հաշվային ելակումներ, որոնք անհրաժեշտ են աղուտների լվացման պրոցեսների և լվացման ջրանորմաների որոշման համար: Տեսական հաշվարկները կատարված են ֆիզիկո-բիմիական հիդրոդինամիկայի մեթոդներով, կուծված է մասնատեղափոխման դիֆերենցիալ հավասարումը ֆիլտրացիոն միջավայրում աղակալած հոդերի համար:

Փորձնական և տեսական հետազոտությունների արդյունքները համեմատված են և տրված են մի շարք պորձնական խորհուրդներ կրթատյան դաշտավայրի աղուտների օգտագործման համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ачоян Ж. А. Исследование осушительного и рассоляющего действия закрытого горизонтального дренажа при химическом методе мелиорации соляных солончаков. Автореферат канд. диссертации, Ереван, 1978
2. Ачоян Ж. А. О некоторых вопросах гидродинамики массопереноса в фильтрующей среде. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)», т. XXXI, № 1. 1978
3. Анянян С. А., Анянян А. К. Гидродинамические методы определения эксплуатационных запасов подземных вод с учетом изменения их качества и влияющих поверхностных источников. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)», т. XXX, № 5. 1977.
4. Анянян С. А. О некоторых результатах решения пространственных задач массопереноса. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)», т. XXX, № 6. 1977
5. Труды международного симпозиума по содовым солончакам. Ереван, 1968.
6. Агабян В. Г. Содовые засоления почв Араратской равнины и применение серной кислоты при их мелиорации. Автореферат докт. диссертации, Арм. с.-х. институт, Ереван, 1972.
7. Инструкция по освоению содово-солончаковых почв Араратской равнины. Арм. НИИВнА МСХ Арм. ССР, 1974.
8. Временные промывные нормы и сроки поливов озимой пшеницы и люцерны на засоленных землях Араратской равнины (на арм. языке). МСХ и ММнВХ АрмССР, Ереван, 1976.
9. Анянян А. К. Дренаж при освоении содовых солончаков. М., «Колос», 1972

ГИДРОТЕХНИКА

А. Б. БАГДАСАРЯН

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ЗОН
ТРЕЩИН СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ БЕТОННЫХ
ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛОТИН

Гравитационные плотины по сравнению с другими типами имеют простую конструкцию, позволяют применять наиболее дешевые способы укладки бетона, дают возможность получить наиболее компактную компоновку основных сооружений гидроузла и т. д.

В данной работе приводится методика расчета напряженного состояния скального основания с учетом характера и зон разрушения. Эти расчеты могут служить основой для создания облегченных экономичных профилей по бетонным гравитационным плотинам.

§1. Современное состояние вопроса

Расчеты и исследования напряженного состояния оснований бетонных плотин показывают, что избежать растягивающих напряжений в основании практически невозможно [1]. Подавляющее большинство плотин в этих условиях успешно эксплуатируется. Наличие в основании почти всех бетонных плотин растягивающих напряжений означает, что нет необходимости вводить ограничение на недопущение этих напряжений по контакту бетон-скала, которые во многих случаях являются определяющими при назначении габаритов плотин.

Традиционным методом оценки надежности высоких бетонных плотин по нормам проектирования является определение устойчивости против сдвига.

Расчет устойчивости против опрокидывания для бетонных плотин не производится в силу требования с недопустимости на их подошве растягивающих напряжений с предельно осторожным назначением величины сдвиговых характеристик к породе основания.

Экспериментальным исследованием установлено, что отсутствие в подошве плотины нормальных растягивающих напряжений еще не означает невозможности потери ею устойчивости в форме опрокидывания [1]. Как показывают полевые исследования штампов и испытания моделей [1, 2], верхняя часть плотины вместе с частью скального массива отделяется, а нарастающие напряжения под весом плотины

производят дробление скального массива. Этим теряется несущая способность основания и плотина проворачивается.

Такой характер потери несущей способности основания объясняется развитием в основании плотины двух видов разрушения: разрушение путем образования трещин-отрыва у верхнего бьефа и трещин-скола на низовой части основания. Определяя области разрушения, поля напряжений и смещений основания, можно оценить его несущую способность и определить запасы устойчивости против сдвига и опрокидывания.

При условии применения специальных конструктивных мероприятий, учитывающих растягивающие напряжения, надежность таких плотин может быть даже выше надежности тех плотин обычного классического профиля, напряженное состояние которых, в основном, не изучено.

§ 2. Математическое описание деформации и разрушения скальных пород и граничные условия

Твердые горные породы под действием интенсивных нагрузок обнуживают хрупкость: разрушение с образованием многочисленных трещин. Кроме того, они обладают упруго-пластическими свойствами. Критическое состояние, предшествующее разрушению, описывается некоторым инвариантным соотношением, связывающим компоненты тензора напряжений и условия прочности. В общем случае это условие для изотропного материала запишется в виде [3]:

$$\Phi(N_1, N_2, N_3) \leq 0, \quad (1)$$

где N_1, N_2, N_3 — главные напряжения.

При изменении граничных условий задачи разрушение, начавшись в некоторых точках рассматриваемого объема породы, будет передаваться другим элементам, причем, в каждом элементе перед его разрушением будет достигнуто равенство (1). Совокупность элементов рассматриваемого объема пород, в которых достигнуто равенство (1) и которые в следующем этапе окажутся разрушенными, образуют границу между неразрушенной частью породы и разрушенной. Равенство (1) представляет собой граничное условие, достигаемое на заранее неизвестной, определяемой в процессе решения, задачи при приближении к ней из неразрушенной области. По обе стороны от этой поверхности деформация среды описывается разными системами уравнений для неразрушенной и разрушенной областей.

Если главные напряжения могут стать растягивающими, то простейшим ограничением для изотропного материала будут условия

$$N_i \leq \sigma_{*i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

где σ_{*i} — критическое значение растягивающих напряжений.

При достижении в каком-либо из этих соотношений равенства произойдет отрыв на главной площадке, после чего на ней главное напряжение обратится в нуль. Это условие вначале достигается у верхнего бьефа основания плотины. Если же главные напряжения сжимающие, то разрушение произойдет путем скола площадок, на которых действуют максимальные касательные напряжения.

В соответствии с этим условие (1) сводится к соотношению:

$$|N_j - N_k| \leq 2\tau_{jk}, \quad (j, k = 1, 2, 3) \quad (3)$$

где τ_{jk} — критическое значение касательных напряжений. Если напряжение будет соответствовать равенству условия (3), то образуются трещины касательного разрыва на соответствующих площадках. В материалах, разрушенных трещинами скола, имеет место пластическое течение, характеризующееся трением между обломками материала. В неразрушенной области материал описывается по закону Гука

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{E}{1-\sigma^2} \varepsilon_x + \frac{E\sigma}{1-\sigma^2} \varepsilon_y; \\ \varepsilon_y &= \frac{E}{1-\sigma^2} \varepsilon_y + \frac{E\sigma}{1-\sigma^2} \varepsilon_x; \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\sigma)} \varepsilon_{xy}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},$$

где ε_x , ε_y , τ_{xy} и ε_x , ε_y , ε_{xy} — напряжения и деформации в координатных площадках; u , v — смещения, соответственно, по направлениям X и Y ; E — модуль упругости; σ — коэффициент Пуассона.

Если во внутренних или граничных точках достигнуто равенство условия (2), то материал разрушается путем отрыва в главных площадках.

Считается, что в областях разрушения допустимо описание процесса уравнениями сплошной среды. В области разрушения трещинами отрыва для облегчения математического описания состояния примем, что они образуются параллельно оси X . Главные площадки имеют небольшой уклон в сторону нижнего бьефа. Допущение, что они горизонтальные, мало искажает картину состояния и для инженерных расчетов можно считать приемлемым.

Напряжения и деформации в области разрушения путем отрыва при этих допущениях выражаются формулами

$$\sigma_x = E\varepsilon_x, \quad \sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0, \quad \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = -\sigma \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (5)$$

В точках, где достигнуто равенство условия (3), разрушение происходит трещинами скола. Считается, что материал, находящийся в пластическом течении, описывается законом Гука для объемной деформации и условием пластичности

$$\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_{12}, \quad (6)$$

где τ_{12} — характеризует трение по поверхности трещины скола.

Связь между напряжениями и деформациями в области разрушения путем скола записывается в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{2(1-\nu)} (\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \tau_{12}, \\ \sigma_y &= \sigma_x - 2\tau_{12}, \quad \tau_{xy} = \tau_{12}, \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

§3. Постановка и метод решения задачи

Задача определения напряженно-деформированного состояния скального основания с учетом трещинообразования для бетонных гранитационных плотин сводится к плоской задаче полупространства, заполненного линейно-деформированным хрупким материалом на отрезке поверхности $|x| \leq a$ (рис. 1), на которой действуют нормальная и касательная распределенные нагрузки.

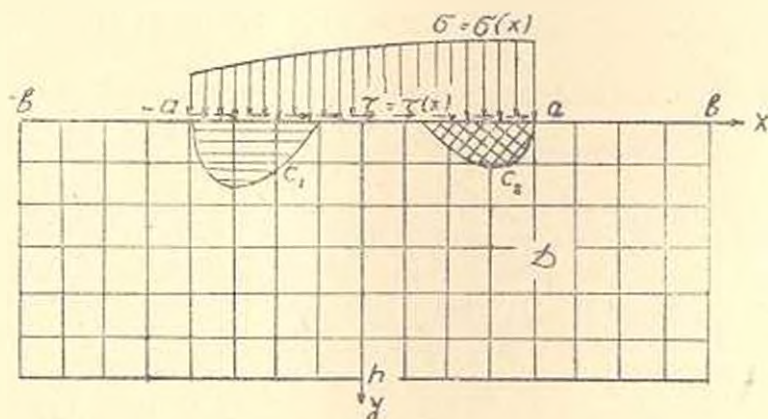


Рис. 1.

Согласно принципу минимума потенциальной энергии [4], решение задачи о равновесии линейно-деформируемого тела в случае плоской деформации сводится к минимизации функционала

$$\mathfrak{J} = \frac{1}{2} \iint_D (\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + 2\sigma_{xy}\varepsilon_{xy} + \sigma_{yy}\varepsilon_{yy}) dx dy + \int_{-a}^a q\delta v dx, \quad (8)$$

где D — область упругого равновесия; C — граница, где задана интенсивность нагружения $\bar{\sigma}_0$; $\delta\sigma_x$, $\delta\sigma_{xy}$, $\delta\sigma_y$ и $\delta\epsilon_x$, $\delta\epsilon_{xy}$, $\delta\epsilon_y$ — приращения напряжений и деформаций.

Задачу можно решить и перемещениях, определив $u(x, y)$, $v(x, y)$.

Общий план решения задачи заключается в следующем.

1. Составляются граничные условия на поверхности полупространства $y = 0$:

$$\begin{aligned} \sigma_y = \tau(x); \quad \tau_{xy} = \tau(x), \quad \text{при } |x| \leq a; \\ \sigma_y = \tau_{xy} = 0, \quad \text{при } |x| > a; \end{aligned} \quad (9)$$

а на поверхности $y = h$; $u = v = 0$.

2. Определяются внутреннее и граничное значения функции перемещений и их производных.

3. Минимизируется функционал (8) с выполнением граничных условий.

4. Вычисляется напряжение и определяется область разрушения по граничным условиям (2) и (3).

Для минимизации функционала целесообразно пользоваться методом локальных вариаций [5], так как рассматриваемую задачу можно решать только численно с использованием современных ЭВМ. Решение нужно строить с постепенным увеличением интенсивности нагрузки. Процесс решения задачи аналогичен с [6]. Нагрузка, действующая на отрезке $|x| \leq a$, разбивается на n частей. Для начала принимается нагрузка, равная $\sigma_1(x) = \frac{\sigma(x)}{n}$, $\tau_1(x) = \frac{\tau(x)}{n}$. Начальное распределение напряжений в области D можно принимать нулевым или из известных решений.

Определяя напряженно-деформированное состояние, увеличиваем нагрузку для второго этапа, равную $\sigma_2(x) = \frac{2\sigma(x)}{n}$, $\tau_2(x) = \frac{2\tau(x)}{n}$ и при помощи локальной вариации определяем напряженно-деформированное состояние, одновременно проверяя условия (2) и (3).

В процессе последовательного решения задачи при стремлении нагрузки к истинной определяются границы области разрушения.

Имеют место следующие граничные условия.

1. На поверхности C_1 (граница области разрушения путем отрыва):
а) со стороны неразрушенного материала (рис. 1)

$$N_1 = \sigma_1;$$

б) со стороны области разрушения

$$\sigma_y = 0; \quad (10)$$

в) на границах разрушения (контактный разрыв)

$$u_1 = u_2, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\partial u_2}{\partial x}.$$

Здесь индексами 1 и 2 обозначены значения величин, соответственно, в неразрушенной и разрушенной средах.

2. На поверхности C_2 (граница области разрушения путем скола):
а) со стороны разрушенного материала

$$|N_1 - N_2| = 2\sigma_0;$$

б) на границе разрушения путем скола

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u_2, & v_1 &= v_2, \\ \frac{\partial u_1}{\partial x} &= \frac{\partial u_2}{\partial x}, & \frac{\partial v_1}{\partial y} &= \frac{\partial v_2}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

На каждом этапе решение задачи сводится к определению в неразрушенной области смещения и его производных, после чего из граничных условий (10) и (11) определяем смещение и деформации в разрушенных областях, а по формулам (5) и (7) вычисляем напряжения и одновременно определяем новые границы разрушенного материала.

Напряжения, вычисленные в разрушенной области, служат граничными условиями для контуров C_1 и C_2 для следующего этапа вычисления. После n циклов, при достижении истинной нагрузки, определяем поля напряжений и смещений как в неразрушенной, так и в разрушенной областях.

Выбирая различные облегченные профили для гравитационных плотин и определяя соответствующие напряженно-деформированные состояния, а также области и характер разрушения, получим возможность создания новых экономических профилей плотины в зависимости от действующих нагрузок и от физико-механических характеристик скального основания.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 25.IV.1977

Ա. Բ. ՔԱՎՐԱՍՍԱՆՅԱՆ

ԲԵՏՈՆԱՅԻՆ ԿՐԱՎԵՏԱՑԻՈՆ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ԺԱՅԹԱՅԻՆ ԶԻՈՆԱՏԱԿՐՈՒՄ ԸԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԵՎ ՔԱՅՔԱՅԻՄԱՆ ՏԻՐՈՒՅԹՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա. Բ. ՔԱՎՐԱՍՍԱՆՅԱՆ

Հաշվարկները և հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ ժայռային պատերների վրա կառուցված բետոնային դրափիտային պատվարների հիմնաքանկերում ձողղ լարումներից խոսափելը անհնար է:

Փորձնական հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ բետոն-ժայռ կոնտակտում ձողղ լարումների բացակայության դեպքում էլ պատվարների ժայռունության կորուստը կատարվում է շրջվելով: Այդպիսի կայունության

կորստի պատճառը հանդիսանում է հիմնականում ճաքերի առաջացումը. վերին կողմում՝ պոկման, իսկ ներքին կողմում՝ րեկորային ճաքեր:

Հոգվածում բերված է մայրային հիմնատակերում լարվածությունների, բայրազման տիրույթների տարածման, նրանց բնույթի որոշման խնդրի դրվածքը, ինչպես նաև այդ խնդրի թվային եղանակով լուծման մեթոդի նկարագրությունը: Այս խնդրի լուծումը հնարավորություն կտա նոր էկոնոմիկ պատվարների կոնստրուկցիաների ստեղծմանը, որոնք կարող են լինել ափիկոտային, բան դասական կոնստրուկցիաների պատվարները, որոնց հիմնատակերում լարվածային վիճակը չի ուսումնասիրված:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Филипп Ю. А.* Напряженное состояние скальных оснований бетонных плотин. «Гидротехническое строительство», 1975, № 3.
2. *Филипп Ю. А.* Исследование кинематики разрушения блочного скального основания в процессе сдвига бетонных сооружений. Тр. Всесоюзн. конф. «Методы определения напряженного состояния и устойчивости высоконапорных гидротехнических сооружений», МИСН, 1972.
3. *Григорян С. С.* Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород. ПММ, 1967, № 4.
4. *Тимошенко С. П.* Теория упругости, М.,—Л. гостехиздат, 1934.
5. *Баничук М. В., Петров В. М., Черноусько Ф. Л.* Алгоритмы метода локальных вариаций для задачи с частным производным. Институт проблем механики АН СССР, бр. № 4, 1971.
6. *Григорян С. С.* К вопросу применимости теории упругости в строительной механике грунтов. Сб. тр. Межд. Конгр. «Механика сплошной среды и родственные проблемы анализа», М., изд. МГУ, 1972.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Р. С. РАФАЕЛЯН, Г. Л. КАНТАРДЖЯН, А. М. МИРЗОЯН, С. П. ЧЕРЕМИШНОВА

ШАГОВАЯ САМОНАСТРАИВАЮЩАЯСЯ ПРОЦЕДУРА
 ОПТИМИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ
 С КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ ЗВЕНОМ НА ВЫХОДЕ

Выводится сходящийся самонастраивающийся быстродействующий алгоритм управления инерционными объектами второго порядка, модель которого (рис. 1) представляется последовательным соединением статического звена с характеристикой $y=f(x)$, про которую известно, что она унимодальна и может обладать разрывами непрерывности II рода, и динамического звена с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K_1}{T^2 p^2 + 2dT p + 1} \quad (1)$$

На рис. 1 приняты обозначения: x — управляемое входное воздействие; y_d , y_m — соответственно, динамический и измеряемый выходы объекта.

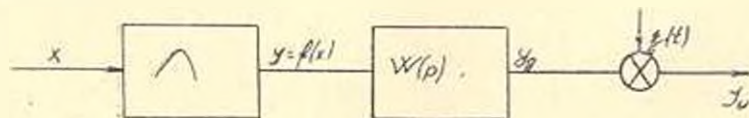


Рис. 1.

Актуальность решения поставленной задачи обусловлена следующими предпосылками.

1. Существующие алгоритмы поиска экстремума, базирующиеся на различных модификациях метода стохастической аппроксимации, для рассматриваемого типа объектов оказываются слишком «медленными», что связано с необходимостью установления переходных процессов при осуществлении пробных шагов, так как использование рабочей информации по неустановившимся выходным параметрам нарушает необходимые условия сходимости поиска к экстремуму [1].

2. Быстродействующие алгоритмы, основанные на прогнозировании значений статической характеристики [2], не обладают сходимостью в вероятностном смысле.

3. И те и другие алгоритмы не обладают свойством самонастройки к меняющейся неизвестным образом интенсивности аддитивной помехи.

При реализации процедур стохастической аппроксимации совершаются 2 пробных шага $\pm c$, определяются соответствующие им значения $f(x_k \pm c)$ статической характеристики (x_k — значение x в k -м рабочем шаге), определяется средний угловой коэффициент $z_k = \frac{f(x_k + c) - f(x_k - c)}{2c}$ и совершается следующий рабочий шаг $\Delta x_k = z_k \cdot a_i$, где a_i — последовательность положительных чисел (обычно гармонического типа).

Выводимый алгоритм в своей части, относящейся к совершению пробных и рабочих шагов, идентичен процедуре стохастической аппроксимации. В ней для определения $f(x_k \pm c)$ необходимо после совершения пробных шагов дожидаться установления переходных процессов, вызванных ими, что необходимо для удовлетворения условий, обеспечивающих сходимость поиска к экстремуму.

В выводимом алгоритме оценки $f(x_k \pm c)$ прогнозируются по рабочей информации, извлекаемой путем измерений, осуществляемых на начальных участках переходных процессов, что существенно увеличивает быстрдействие поиска. Кроме того, алгоритм самоадаптируется к интенсивности помехи $\xi(t)$ в смысле определения необходимого объема выборки рабочей информации, обеспечивающей заданную точность оценки $f(x_k \pm c)$, а следовательно, и z_k . Ниже описана методика, с помощью которой достигнуты вышеназванные достоинства.

Пусть в момент $t=0$ состояние объекта характеризуется начальными условиями

$$x = x_0, \quad y' = y'_0, \quad y = y_0 \neq f(x_0) \quad (2)$$

и осуществляется мгновенное изменение входного воздействия до значения x_1 , в результате чего на вход объекта поступает ступенчатое воздействие $\Delta x = x_1 - x_0$. Тогда на входе динамического звена формируется сигнал

$$\Delta f = f(x_1) - \frac{y_0}{k_y} \quad (3)$$

Переходной процесс в объекте в системе координат $y_1 = y - y_0$, t определяется выражением

$$y_1(t) = \left[f(x_1) - \frac{y_0}{k_y} \right] k_y A + y'_0 B, \quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 - e^{-\lambda t} \left(\cos \omega t + \frac{\lambda}{\omega} \sin \omega t \right); \\ B &= e^{-\lambda t} \left(\cos \omega t - \frac{\lambda}{\omega} \sin \omega t \right); \\ \lambda &= \frac{d}{T}; \quad \omega^2 = \frac{1}{T^2} (1 - d^2). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для второго, третьего и произвольного k -го шага в системе координат $y_k = y - \left[y_0 + \sum_{i=0}^{k-1} \Delta y_i \right]$, $t_k = t - (k-1) \Delta t$ имеем:

а) начальные условия

$$\left. \begin{aligned} t = t_1, \quad x = x_1, \quad y = y_1 \neq k_y f(x_1), \quad y' = y'_1, \\ t = t_2, \quad x = x_2, \quad y = y_2 \neq k_y f(x_2), \quad y' = y'_2, \\ \dots \dots \dots \\ t = t_{k-1}, \quad x = x_{k-1}, \quad y = y_{k-1} \neq k_y f(x_{k-1}), \quad y' = y'_{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

б) переходные процессы

$$\left. \begin{aligned} y_2(t) &= \left[f(x_2) - \frac{y_1}{k_y} \right] k_y A(t) + y'_1 B(t), \\ y_3(t) &= \left[f(x_3) - \frac{y_2}{k_y} \right] k_y A(t) + y'_2 B(t), \\ \dots \dots \dots \\ y_k(t) &= \left[f(x_k) - \frac{y_{k-1}}{k_y} \right] k_y A(t) + y'_{k-1} B(t). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

За время Δt до очередного (второго) шага приращение Δy_1 составит:

$$\Delta y_1 = \left[f(x_1) - \frac{y_0}{k_y} \right] k_y A(\Delta t) + y'_0 B(\Delta t), \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A(\Delta t) &= 1 - e^{-\omega \Delta t} \left(\cos \omega \Delta t + \frac{k}{\omega} \sin \omega \Delta t \right); \\ B(\Delta t) &= e^{-\omega \Delta t} \left(\cos \omega \Delta t - \frac{k}{\omega} \sin \omega \Delta t \right). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

На втором, третьем и k -ом шагах для приращения динамического выхода объекта имеем, соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_2 &= \left[f(x_2) - \frac{y_1}{k_y} \right] k_y A(\Delta t) + y'_1 B(\Delta t); \\ \Delta y_3 &= \left[f(x_3) - \frac{y_2}{k_y} \right] k_y A(\Delta t) + y'_2 B(\Delta t); \\ \dots \dots \dots \\ \Delta y_k &= \left[f(x_k) - \frac{y_{k-1}}{k_y} \right] k_y A(\Delta t) + y'_{k-1} B(\Delta t). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

С целью исключения накопления ошибок с ростом числа шагов, определив каждое из приращений Δy_i через все предыдущие и выполнив очевидные преобразования, запишем выражение для переходного процесса в k -ом шаге в виде.

$$y_k(t) = y_0(1-A)^k + B(1-A)^{k-1} \sum_{i=0}^{k-1} y_i(1-A)^{k-i-1} + k_y A(1-A)^k \sum_{i=1}^k f(x_i)(1-A)^{k-i}, \quad (11)$$

где A и B определяются выражениями (5).

Для прогнозирования установившегося значения динамического выхода объекта $y_{\text{уст}} = f(x)$, что необходимо для уменьшения влияния инерционности объекта на качество процесса управления, преобразуем выражение (11) к виду:

$$\left. \begin{aligned} y_k(t) &= k_y f(x_k) A + a_k(1-A) + y_{k-1} B; \\ a_k &= k_y f(x_{k-1}) A + a_{k-1}(1-A) - y_{k-2} B; \\ y_{k-1} &= k_y f(x_{k-1}) A + a_{k-1}(1-A) - y_{k-2} B. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Неизвестные параметры $f(x_k)$, a_k , y_{k-1} оцениваются методом наименьших квадратов (МНК) на основе измерений выходной координаты объекта y_k и присутствии помехи, представляющей собой стационарный случайный процесс с $E\{\xi(t)\} = 0$, неизвестной $D\{\xi(t)\} = \sigma^2$ и малым временем корреляции [5].

Для произвольного k -го воздействия Δx_k на основе измерений выходной координаты y_{kj} в моменты времени $t_j = j\tau$ ($j = 0, 1, \dots, N-1$) составили уравнение неувязок, характеризующих разброс измеренных значений относительно теоретических:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_j &= y_{kj} - k_y f(x_k) A_j - a_k(1-A_j) - y_{k-1} B_j, \\ j &= 0, 1, \dots, N-1. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_j &= 1 - e^{-\lambda_j \tau} \left(\cos \omega_j \tau + \frac{\lambda}{\omega} \sin \omega_j \tau \right); \\ B_j &= e^{-\lambda_j \tau} \left(\cos \omega_j \tau - \frac{\lambda}{\omega} \sin \omega_j \tau \right). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Неизвестные параметры оцениваются из условия минимизации суммы

$$S = \sum_{j=0}^{N-1} \varepsilon_j^2 \quad (15)$$

в результате решения системы линейных уравнений:

$$\frac{\partial S}{\partial [f(x_k)]} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial [a_k]} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial [y_{k-1}]} = 0. \quad (16)$$

Выполняя операцию дифференцирования и перенося вправо члены, не содержащие искоемых оценок параметров, получим совместную систему нормальных уравнений:

$$(A_k^T A_k) \hat{p}_k = A_k^T y_k, \quad (17)$$

где

$$p_k = \begin{bmatrix} f(x_k) \\ a_k \\ \vdots \\ y_{k-1} \end{bmatrix}; \quad y_k = \begin{bmatrix} y_{k1} \\ y_{k2} \\ \vdots \\ y_{kl} \end{bmatrix}; \quad A_k = \begin{bmatrix} k_y A_k & 1 - A_k & B_k \\ k_y A_1 & 1 - A_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_y A_f & 1 - A_f & B_f \end{bmatrix} \quad (18)$$

—соответственно, матрицы оцениваемых параметров, измерений и структурная матрица.

Матрица $A_k^T A_k$ является квадратичной, положительно определенной и невырожденной, т. к. количество измерений: $N > l + 1$, где $l = 3$ — число оцениваемых параметров. Существует обратная матрица $(A_k^T A_k)^{-1}$, в связи с чем решение (17) имеет вид:

$$p_k = (A_k^T A_k)^{-1} A_k^T y_k \quad (19)$$

и представляет собой вектор оценок неизвестных параметров. Искомые оценки равны:

$$\begin{aligned} f(x_k) = & \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[\sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j)^2 \sum_{j=0}^{N-1} B_j^2 - \left| \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) \right|^2 \right] \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j y_{kj} + \right. \\ & + \left[\sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j - \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) \sum_{j=0}^{N-1} B_j^2 \right] \sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j) y_{kj} + \\ & + \left. \left[\sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) - \sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j)^2 \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j \right] \sum_{j=0}^{N-1} B_j y_{kj} \right\}; \\ a_k = & \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[\sum_{j=0}^{N-1} k_j^2 A_j^2 \sum_{j=0}^{N-1} B_j^2 - \left| \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j \right|^2 \right] \sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j) y_{kj} + \right. \\ & + \left[\sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) - \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) \sum_{j=0}^{N-1} B_j^2 \right] \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j y_{kj} + \\ & + \left. \left[\sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j - \sum_{j=0}^{N-1} k_j^2 A_j^2 \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) \right] \sum_{j=0}^{N-1} B_j y_{kj} \right\}; \\ y'_{k-1} = & \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[\sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) - \right. \right. \\ & - \left. \sum_{j=1}^{N-1} k_y A_j B_j \sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j)^2 \right] \sum_{j=0}^{N-1} k_j A_j y_{kj} + \left[\sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) - \right. \end{aligned} \quad (20)$$

$$- \sum_{j=0}^{N-1} k_y^2 A_j^2 \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) \left| \sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j) y_{kj} + \right. \\ \left. + \left| \sum_{j=0}^{N-1} k_y^2 A_j^2 \sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j)^2 - \left| \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) \right|^2 \right| \sum_{j=0}^{N-1} B_j y_{kj} \right|,$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sum_{j=0}^{N-1} k_y^2 A_j^2 & \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) & \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j \\ \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j (1 - A_j) & \sum_{j=0}^{N-1} (1 - A_j)^2 & \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) \\ \sum_{j=0}^{N-1} k_y A_j B_j & \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1 - A_j) & \sum_{j=0}^{N-1} B_j^2 \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Ковариционная матрица оценок неизвестных параметров равна [4]

$$\text{cov}[p_k] = \sigma^2 (A_k^* A_k)^{-1}. \quad (22)$$

В качестве множителя в выражение (22) входит неизвестная дисперсия ошибок σ^2 , несмещенная оценка которой определяется использованием остаточной суммы квадратов:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} |y_{kj} - [k_y f(x_k) A_j + a_k (1 - A_j) + y_{k-1} B_j]|^2}{N-3}. \quad (23)$$

Использование (22) и (23) в процессе реализации процедуры оптимизации приводит к самонастройке поисковой процедуры к аддитивной помехе $\varepsilon(t)$ в смысле определения необходимого объема рабочей информации при совершении пробных шагов [3]. Выбор необходимого количества измерений осуществляется в каждом шаге поиска из условия удовлетворения соотношения:

$$D\{f(x_k)\} \leq D_{\text{доп}}. \quad (24)$$

Если условие (24) не удовлетворяется, то количество измерений увеличивается на единицу и вычисляются более точные оценки $f(x_k) D\{f(x_k)\}$. Циклическим повторением данной процедуры достигают удовлетворения (24), после чего совершается следующий шаг.

Поступило 1.11.1978.

Ռ. Ս. ՌԱՅԱԵԼՅԱՆ, Գ. Լ. ՂԱՆԹԱՐՋՅԱՆ, Ա. Մ. ՄԻՐՋՈՅԱՆ,
Ս. Ն. ՋԵՐԵՄԻՍՅԱՆՈՎԱ

**ՈՊՏԻՄԻԶԱՑԻԱՅԻ ՔԱՅԼԱՅԻՆ ԻՆՓԵՍԱՐՄԱՐՎՈՂ ՊՐՈՑԵԴՈՒՐԱ
ԵԼՔՈՒՄ ՏԱՏԱՆՎՈՂ ՕՂԱԿ ՈՒՆԵՅՈՂ ՈԶ-ԿՐԱՅԻՆ ՍՐՅԵԿՏՆԵՐԻ
ՀԱՄԱՐ**

Ա. մ փ ո փ ու լ մ

Դուրս է բերվում արագաշարժ դիկտարման ալգորիթմ երկրորդ կարգի քննրցիոն օրեկտի համար, որի մոդելը ներկայացվում է ստատիկ և դինամիկ օղակների հաջորդական կապով:

Ալգորիթմը ինքնահարմարվում է խանդարումների ինտենսիվությանը, որոշելով ծառայող ինֆորմացիայի անհրաժեշտ ծավալը, որն ապահովում է քննրագրերի փնահատման տրված ճշտություներ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Kesten H. Accelerated stochastics approximation. "The annals of mathematical statistics", vol. 29, № 1, 1958.
2. Казакевич В. В., Рафаелян Р. С. Исследование системы экстремального регулирования шагового типа с предвычислением установившегося значения при наличии помех. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)», т. XX, № 4, 1967.
3. Кантарджян Г. Л., Рафаелян Р. С., Мирзоян А. М. К вопросу оптимизации нелинейных инерционных объектов первого порядка. «Известия АН АрмССР (серия Т. II.)» т. XXIX, № 5, 1976.
4. Худсон Д. Статистика для физиков. М., «Мир», 1970.
5. Закс Ш. Теория статистических выводов. М., «Мир», 1975.

ТЕПЛОТЕХНИКА

Լ. Բ. ԱՄԻՅԱՆ, Վ. Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա. Յ. ԿԱՐԱՄՏՅԱՆ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОВАРКИ СТЕКЛА

Создание совершенной системы регулирования теплового режима имеет большое значение для повышения технико-экономических показателей электроварки стекла. В настоящей работе сделана попытка построения математической модели электростекловаренной печи прямого нагрева, пригодной для исследования и разработки систем автоматического управления тепловым режимом варки стекла в таких печах.

Для электростекловаренной печи, принимая, что теплотехнические параметры являются усредненными и сосредоточенными, уравнение теплового баланса установившегося режима — уравнение статики имеет вид:

$$\begin{cases} Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \\ Q_1 = Q_7 \end{cases} \quad (1)$$

где Q — количество тепла, выделяемого в стекломассе при прохождении электрического тока, ккал/ч ; Q_1, Q_2 — потери на теплообмен между стекломассой и футеровкой и на охлаждение электродов, ккал/ч ; Q_3 — тепло, уносимое расплавом в выработочную зону, ккал/ч ; Q_4, Q_5 — затраты тепла на нагрев шихты до номинальной температуры и на процесс стеклообразования, ккал/ч ; Q_6, Q_7 — потери тепла на испарение влаги шихты и на теплообмен между футеровкой и внешней средой, ккал/ч .

Рассматривая перечисленные выше статьи расхода-прихода тепла, можно написать следующие линейные приближения, справедливые с практической степенью точности в области малых отклонений:

$$Q = k \frac{V^2}{R}; \quad Q_1 = \alpha_1 F (\theta - \theta_n); \quad Q_2 = \alpha_2 F_s (\theta - \theta_n); \quad Q_3 = c \varphi \theta;$$

$$Q_4 = c_{ш} q (\theta - \theta_{ш}); \quad Q_5 = c_{г} q; \quad Q_6 = c_r q_r \theta_r; \quad Q_7 = \alpha_7 F (\theta_0 - \theta_n),$$

где V — напряжение на электродах печи, в ; R — сопротивление расплава печи, ом ; k — эквивалентный коэффициент, $\text{ккал/вт} \cdot \text{ч}$; $\alpha_1 - \alpha_3$ — коэффициенты теплоотдачи, $\text{ккал/град} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2$; θ, θ_0 — усредненные температуры расплава и футеровки, град ; F, F_s — площади футеровки и электродов, м^2 ; $\theta_n, \theta_{ш}$ — температуры охлаждающей воды, окружающей среды и шихты, град ; $c, c_{ш}, c_r$ — удельные теплоемкости расплавленной стекломассы, шихты (усредненная) и смеси газов, $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$;

q — количество загруженной шихты в час, кг/ч; γ — расходный коэффициент, показывающий, какая часть шихты, загружаемой в печь, выходит из нее в виде расплава; λ — количество тепла, затрачиваемого на физико-химические превращения в шихте, ккал/кг; q_r — количество выделившихся газов, кг/с; θ_r — температура отходящих газов, град.

Потери Q_2 и Q_6 составляют незначительную долю в общем тепловом балансе и ими можно пренебречь.

Переходя от уравнений статики (1) к уравнениям динамики, можно записать:

$$\begin{cases} \Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + C \frac{d\theta}{dt}; \\ \Delta Q_2 = \Delta Q_1 + C_\phi \frac{d\theta_\phi}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где C , C_ϕ — теплоемкости расплава и футеровки, ккал/град.

Проведя линеаризацию при помощи формул Тейлора, найдем, что

$$\Delta Q = \frac{2kV_0}{R_0} \Delta V - \frac{kV_0^2}{R_0^2} \Delta R = \frac{2kV_0^2}{R_0} y - \frac{kV_0^2}{R_0} x_1;$$

$$\Delta Q_1 = \alpha_1 F \Delta \theta - \alpha_1 F \Delta \theta_\phi = \alpha_2 F \theta_\phi x - \alpha_1 F \theta_\phi x_\phi;$$

$$\Delta Q_3 = c_1 q_0 \Delta \theta + c_1 \theta_0 \Delta q = c_1 q_0 \theta_0 x + c_1 q_0 \theta_0 z;$$

$$\Delta Q_4 = c_m q_0 \Delta \theta + c_m (\theta_0 - \theta_m) \Delta q = c_m q_0 \theta_0 x + c_m q_0 (\theta_0 - \theta_m) z;$$

$$\Delta Q_5 = \lambda \gamma \Delta q = \lambda \gamma q_0 z;$$

$$\Delta Q_2 = \alpha_2 F \Delta \theta_\phi = \alpha_2 F \theta_\phi x_\phi,$$

где $x = \frac{\Delta \theta}{\theta_0}$; $x_\phi = \frac{\Delta \theta_\phi}{\theta_\phi}$; $x_1 = \frac{\Delta R}{R_0}$; $y = \frac{\Delta V}{V_0}$; $z = \frac{\Delta q}{q_0}$ — относительные изменения переменных. Здесь индексов „о“ отмечены значения параметров, соответствующих номинальному режиму.

Известно, что зависимость электропроводности расплавленной стекломассы $\rho(\theta)$ от температуры выражается трансцендентным уравнением

$\rho = \frac{1}{A} e^{\frac{B}{\theta}}$, где A и B — коэффициенты, зависящие от состава стекла [1].

Применение этого уравнения для исследования динамики тепловых процессов представляет известные трудности. Поэтому в работе была использована упрощенная зависимость $\rho(\theta)$. Принимая, что

$\rho' = \frac{d\rho}{d\theta}$ в области малых отклонений от номинальной температуры остается постоянной, можно записать:

$$x_1 = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = -\gamma \theta_0 x, \quad (3)$$

где $\gamma_1 = \frac{V_0^2}{R_0}$ — показатель саморазрегулирующей способности расплавленной стекломассы, предложенный Андрусечко [3]. Тогда:

$$\Delta Q = \frac{2kV_0^2}{R_0} y + \frac{k\gamma_0 V_0^2}{R_0} x.$$

Подставляя полученные значения ΔQ_i в систему (2), получим:

$$\begin{cases} \frac{2kV_0^2}{R_0} y + \frac{k\gamma_0 V_0^2}{R_0} x = \alpha_1 F \theta_0 x - \alpha_1 F \theta_{0\phi} x_\phi + c_1 q_0 \theta_0 x + c_1 q_0 \theta_0 z + \\ + c_m q_0 \theta_0 x + c_m q_0 (\theta_0 - \theta_m) z + k_1 q_0 z + C \theta_0 \frac{dx}{dt}; \\ \alpha_1 F \theta_0 x - \alpha_1 F \theta_{0\phi} x_\phi = \alpha_1 F \theta_{0\phi} x_\phi + C_\phi \theta_{0\phi} \frac{dx_\phi}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

Введя оператор дифференцирования и проведя соответствующие преобразования, получим уравнение

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) x = k (T_3 p + 1) - k_2 (T_3 p + 1) z, \quad (5)$$

где T_1 , T_2 , T_3 — постоянные времени варочной зоны, а k , k_2 — соответствующие коэффициенты усиления.

Коэффициенты усиления и постоянные времени могут быть вычислены по формулам:

$$T_1 = \frac{C_\phi (\alpha_1 F R_0 + c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2) + (\alpha_1 + \alpha_3) C}{F (\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2))};$$

$$T_2 = \frac{CC_\phi R_0}{F |\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2)|};$$

$$T_3 = \frac{C_\phi}{F (\alpha_1 + \alpha_3)};$$

$$k = \frac{2kV_0^2 (\alpha_1 + \alpha_3)}{\theta |\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2)|};$$

$$k_2 = \frac{R_0 [c_1 q_0 \theta_0 + c_m q_0 (\theta_0 - \theta_m) + k_1 q_0] (\alpha_1 + \alpha_3)}{\theta_0 |\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2)|}.$$

Исходя из уравнения (5), можно записать передаточные функции электростекловаренной печи по управляющему и возмущающим воздействиям

$$W(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = \frac{k(T_3 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

$$W_z(p) = \frac{x(p)}{z(p)} = \frac{k_2(T_3 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Управление тепловым режимом электростекловаренной печи непосредственно по температуре встречает ряд существенных трудностей. Более надежным и целесообразным, как показывает многолетний опыт эксплуатации электростекловаренных печей, является регулирование теплового режима по косвенным электрическим параметрам — межэлектродному сопротивлению, току нагрузки или мощности, выделяемой в расплавленной стекломассе.

Передаточная функция варочной зоны электростекловаренной печи при использовании в качестве регулируемого параметра межэлектродного сопротивления, с учетом уравнения (3), будет иметь вид

$$W_1(p) = \frac{x_1(p)}{y(p)} = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где $k_1 = k_1^0 \theta_0$.

Обозначив через $x_2 = \frac{\Delta J}{J_0}$ — относительное отклонение тока нагрузки и проведя линеаризацию, можно записать: $x_2(p) = y(p) - x_1(p)$.

Тогда передаточная функция электростекловаренной печи, при использовании в качестве регулируемого параметра — тока нагрузки, примет вид:

$$W_2(p) = \frac{x_2(p)}{y(p)} = \frac{k_2(T_{22}^2 p^2 + T_{12} p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где $k_2 = 1 - k_1$; $T_{22}^2 = \frac{T_1^2}{1 - k_1}$; $T_{12} = \frac{T_1 - k_1 T_1}{1 - k_1}$.

Обозначив $x_3 = \frac{\Delta W}{W_0}$ — относительное изменение мощности, аналогично предыдущему, можно записать: $x_3(p) = y(p) + x_2(p)$, а передаточную функцию электроварки стекла при использовании в качестве регулируемого параметра электрической мощности, выделяемой в расплавленной стекломассе при прохождении через него электрического тока

$$W_3(p) = \frac{k_3(T_{33}^2 p^2 + T_{13} p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где $k_3 = 2 - k_1$; $T_{33}^2 = \frac{2T_1^2}{2 - k_1}$; $T_{13} = \frac{2T_1 - k_1 T_1}{2 - k_1}$.

Экспериментальные исследования, проведенные на промышленных и опытно-промышленных электростекловаренных печах, показали адекватность полученной математической модели. Передаточные функции, приведенные в работе, были использованы при разработках САУ тепловым режимом промышленных электростекловаренных печей.

Լ. Ռ. ԱՄԻՅԱՆ, Վ. Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Հ. Վ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԱՊԱԿՈՒ ԷԼԵԿՏՐԱԵՓՄԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԳԵԼԸ

Ու մ փ ո փ ո լ մ

Ոչխատանքում բերված է անմիջական տաքացման էլեկտրական վառարանում ասպակու հիման պրոցեսի մաթեմատիկական մոդելը: Եփման ջերմային ռեժիմի ինչպես անմիջական ջերմաստիճանով, այնպես էլ անուղղակի էլեկտրական պարամետրերով կառավարման համար ստացված են փոխանցման ֆունկցիաները ըստ կարգավորող ու խոտորող ներգործումների: Ստացված մաթեմատիկական մոդելները կարելի է օգտագործել արդյունաբերական էլեկտրաեփման վառարանների ջերմային ռեժիմների ավտոմատ կառավարման համակարգերի նախագծման գեպրում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Костиня К. А. Электропроводность расплавленных стекол и некоторые вопросы электроварки стекла. «Арм. химический журнал», 1967, № 10.
2. Лалтев В. Н. Системы автоматического регулирования температурного режима установок с электроподогревом стекломассы «Стекло», 1975, № 2.
3. Andrzejewski A., Czekło i ceramika, 16, 209, 1965.

Ր Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

ՄԵԹՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

Մ. Կ. Սոստոյան: Տեքստի ռաբոթությունների հիմնական պարամետրերի հետազոտումը վեճակագրական մեթոդներով	2
Ն. Վ. Ուլյինիկ, Մ. Դ. Սոստոյան, Ս. Հ. Պասպարյան: Մեքենաների մասերի դիմացկունությունը լվայունացված բենզոմաթյան և ծառայության տրված ժամկետի զննարկում	8

ՀԱՆՐԴԱՅԻՆ

Ի. Ի. Եսերայանյան: Բարդ էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ուժերի հաշվման ալգորիթմը	18
Ժ. Պ. Առատյան: Ղեկավարվող փայտապատիկներ	26

ՀԻՄՆԱՎԷՐԿԱ

Վ. Հ. Բոմմայան, Հ. Ի. Կարապետյան: Հորանային յրթուփի ֆորմավորման հաշվարկի մասին	32
Ո. Ա. Անտոյան, Ժ. Ա. Ալեյան, Ա. Կ. Անանյան: Հողերում ֆիտոբացիան հասցվ մասնատրամեղման պրոցեսների հետազոտման մի ժանի արդյունքների մասին	40

ՀԻՄՆԱՏԵԽՆԻԿԱ

Ա. Բ. Բաղդասարյան: Ինտենային գրավիտացիոն պատվարների ժայռային հիմնադրումը լարումների և ծայրայման տիրույթների որոշումը	52
--	----

ՀԱՇՎՈՂԱԿԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ

Ի. Ա. Ինֆոյեյան, Գ. Լ. Ղանբաբյան, Ա. Մ. Միրզոյան, Ո. Ն. Չեբուխիլովա: Ցպտիմիզացիայի ինքնահամարվող պրոցեսորա հիմնական առանձնահատկությունները ուղի ունեցող ոչ-գծային օբյեկտների համար	59
--	----

ՋԵՐՄԱՏԵԽՆԻԿԱ

Ո. Լ. Ամիրյան, Վ. Կ. Կարապետյան, Հ. Վ. Կարամուսյան: Ապակու էլեկտրանիման միջնատրամեղման ժողովրդ	66
--	----

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Стр.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. К. Ростомян. Исследование основных параметров текстильного оборудования методом статистического моделирования	3
И. В. Олейник, М. Г. Стакян, С. А. Гаспарян. Выносливость деталей машины при нестационарном нагружении и заданном сроке службы	5

ЭНЕРГЕТИКА

И. И. Шаробхян. Алгоритм расчета установившегося режима сложной электроэнергетической системы	15
Т. И. Асатурян. Управляемые фазысдвигагели	26

ГИДРАВЛИКА

В. О. Тохмиджян, Г. Н. Карапетян. К гидравлическому расчету шахтного водослива	33
С. А. Аканян, Ж. А. Ачоян, А. К. Аканян. О некоторых результатах исследования процессов массопереноса фильтрационным потоком в грунтах	40

ГИДРОТЕХНИКА

А. Б. Бадасарян. Об определении напряженного состояния и зон трещин скальных оснований бетонных гравитационных плотин	52
---	----

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Р. С. Рафаелян, Г. Л. Кантирюмян, А. М. Мирзоян, С. Н. Черемисинова. Шаговая сжимающая процедура оптимизации нелинейных объектов с колебательным звеном на выходе	59
---	----

ТЕПЛОТЕХНИКА

Л. Р. Амиян, В. К. Каранетян, А. В. Карацукян. Математическая модель электроварки стекла	66
--	----