

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԽՐԹԱՔԻՐԱԿԱՆ ԳՈՒԿԵՐԻՈՒ

Աղսեց Հ. Տ., Ալեքսեևսկի Վ. Վ., Միրազադեան Բ. Վ., Կառյան
Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Խազարով Ա. Փ., Սիմոնով Ե. Զ.,
Փինաջյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ):

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Адоиц Г. Т., Алексеевский В. В., Егизаларов Н. В., Касьян
М. В. (ответ. редактор), Назаров А. Г., Пинаджян В. Б.
(зам. отв. редактора), Симонов М. З.

2412-97

В. И. САЛКОВ, Л. С. МЕЛКОНЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
 СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ГАРМОНИЧЕСКИМ АНАЛИЗОМ
 КРИВОЙ ЗАТУХАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С целью определения частотных характеристик синхронной машины предложен и развит метод, основанный на обработке кривой затухания постоянного тока в обмотках неподвижной машины с применением интеграла Фурье [1—3]. При этом для анализа необходимо предварительное разложение кривой затухания тока на экспоненциальные составляющие. Такой подход к обработке и анализу кривой затухания тока не является единственным. К решению этой задачи с успехом может быть применен метод гармонического анализа, позволяющий непосредственно по значениям равноотстоящих ординат кривой затухания тока определить частотную характеристику машины.

1. Осциллограммы затухания постоянного тока в статорном контуре синхронной машины при замкнутой накоротко обмотке возбуждения обычно определяются по схеме, приведенной на рис. 1. Заме-

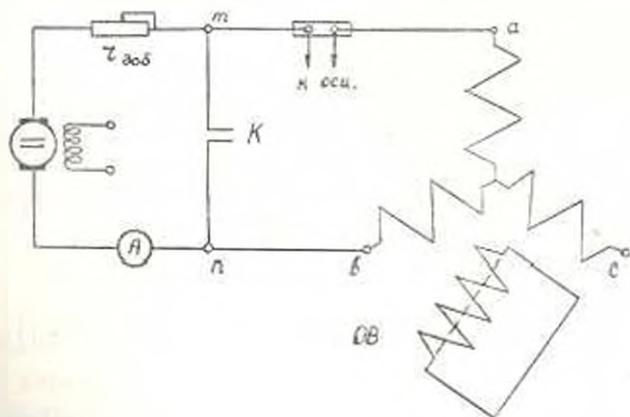


Рис. 1. Схема опытов.

тим, что переходная составляющая тока, полученная в результате физических измерений, имеет определенное время существования T_c , благодаря чему, используя кривую тока затухания, можно построить периодический процесс на зажимах машины. Для пояснения этого несколько изменим схему рис. 1, приведя ее к виду, показанному на

рис. 2, где $e(t)$ — э.д.с. источника бесконечной мощности; r_b — внешнее омическое сопротивление; $i(t)$ и $u(t)$ — соответственно ток в цепи и напряжение на зажимах статора. Уравнение цепи записывается в виде

$$e(t) = u(t) + r_b \cdot i(t). \quad (1)$$

Допустив с момента $t = 0$ скачкообразное изменение э.д.с. $e(t)$, как показано на кривой рис. 2б, получим в цепи переходный процесс,

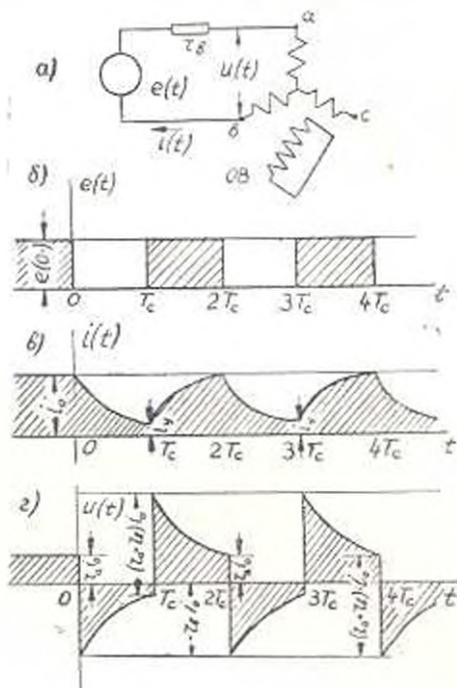


Рис. 2 Построение периодического процесса на зажимах синхронной машины по кривой затухания постоянного тока.

построен лишь по одной кривой затухания тока при отключении питающего постоянного напряжения. Внутреннее сопротивление источника э.д.с. при этом не играет роли, поскольку рассматривается процесс, происходящий при отключении этого источника.

Разложим кривые $u(t)$ и $i(t)$ в ряды Фурье:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \frac{a_{u0}}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} \left[a_{u(2k+1)} \cos(2k+1)\omega_1 t + b_{u(2k+1)} \sin(2k+1)\omega_1 t \right], \\ i(t) &= \frac{a_{i0}}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} \left[a_{i(2k+1)} \cos(2k+1)\omega_1 t + b_{i(2k+1)} \sin(2k+1)\omega_1 t \right], \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $a_{u0}/2$ и $a_{i0}/2$ постоянные слагающие напряжения и тока; $a_{u(2k+1)}$, $b_{u(2k+1)}$, $a_{i(2k+1)}$ и $b_{i(2k+1)}$ — коэффициенты ряда Фурье, определение которых будет рассмотрено позднее; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ — основная угловая частота; $T = 2T_c$.

описываемый кривыми на рис. 2в и 2г. Согласно уравнению (1) для момента времени, предшествующего началу переходного процесса, получаем:

$$\left. \begin{aligned} i(0-) &= i(0) = i_0, \\ e(0-) &= (r_b + r_a) i_0, & e(0) &= 0, \\ u(0-) &= r_a \cdot i_0, & u(0) &= -r_b \cdot i_0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где r_a — омическое сопротивление обмоток статора по отношению к зажимам $a-b$. К моменту времени T_c ток и напряжение достигнут установившихся значений. Таким образом, отключение э.д.с. в моменты времени $t = 2n \cdot T_c$ и включение ее при $t = (2n + 1)T_c$, где $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$ приводит к установлению в цепи периодически повторяющегося несинусоидального процесса. Нетрудно видеть, что этот процесс может быть легко

В (3) фигурируют только нечетные гармоники, так как переменные составляющие напряжения и тока являются кососимметричными функциями.

Вычислив из (3) коэффициенты $a_{1, 2k+1}$ и $b_{1, 2k+1}$, можно определить комплексное сопротивление

$$Z_{\text{син}}(j\omega) = \frac{a_{1, (2k+1)} - j b_{1, (2k+1)}}{a_{1, (2k+1)} + j b_{1, (2k+1)}} \quad (4)$$

и комплексную проводимость

$$Y_{\text{син}}(j\omega) = \frac{a_{1, (2k+1)} + j b_{1, (2k+1)}}{a_{1, (2k+1)} - j b_{1, (2k+1)}} \quad (5)$$

неподвижной синхронной машины для дискретного ряда частот $\omega_{2k+1} = (2k+1)\omega_1$, где $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$.

Повышая чувствительность шлейфа, т. е. увеличивая T , можно снижать частоту ω_1 , с которой начинается частотная характеристика. Изменением величины τ можно регулировать время существования переходного процесса в обмотках машины и тем самым изменять диапазон частотной характеристики в желаемых пределах. Определим связь между дискретными и непрерывными частотными спектрами. Функция $f(t)$, равная нулю вне интервала времени $0-T$, может быть разложена в ряд Фурье с коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega_1 t \cdot dt, \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega_1 t \cdot dt, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\text{где } \omega_1 = \frac{2\pi}{T}.$$

С другой стороны может быть найден комплексный спектр той же функции, определяемый прямым преобразованием Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt = \int_0^T f(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (7)$$

где $F(j\omega)$ после умножения на $j\omega$ соответствует частотной характеристике, определяемой по экспонентам, на которые разлагается кривая затухания тока, а по коэффициентам a_k и b_k вычисляются точки частотной характеристики, получаемой при помощи описываемого в данной работе метода.

Согласно [4] взаимосвязь между $F(j\omega)$ и a_k и b_k может быть выражена следующим образом:

$$F(j\omega) = \sin \frac{\omega T}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (a_k - j b_k) \frac{(-1)^k}{\omega - \omega_1 k} \quad (8)$$

Таким образом вычисления по коэффициентам ряда Фурье дают необходимое количество точек частотной характеристики в зависимости от принятой длительности переходного процесса.

2. Коэффициенты a_k и b_k могут быть найдены по формулам (6), если подынтегральная функция задана аналитически. В случаях же, аналогичных рассматриваемому, когда функция задана эмпирически, применяются приближенные методы. Так для функции, заданной в $2n-1$ эквидистантных точках $t_0, t_1, \dots, t_2, \dots, t_{2n-1}$ значениями $y_0, y_1, \dots, y_2, \dots, y_{2n-1}$, используются формулы Бесселя

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{1}{n} \sum_{s=0}^{2n-1} y_s \cos k\omega_1 t_s, \quad k=0, 1, \dots, n; \\ b_k &= \frac{1}{n} \sum_{s=1}^{2n-1} y_s \sin k\omega_1 t_s, \quad k=1, 2, \dots, n-1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ и $T = t_{2n}$.

Для кососимметричных функций значения ординат y'_s достаточно брать для точек от 0 до $n-1$.

$$\left. \begin{aligned} a_{2k+1} &= \frac{2}{n} \sum_{s=0}^{n-1} y'_s \cos (2k+1)\omega_1 t_s, \\ t_{2k+1} &= \frac{2}{n} \sum_{s=0}^{n-1} y'_s \sin (2k+1)\omega_1 t_s, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $k=0, 1, \dots$, и ч. $\left(\frac{n}{2}-1\right)$; $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$; $T = 2t_n = t_{2n}$.

Для определения гармоник напряжения и тока в рассматриваемом случае расчеты по формулам (10) предпочтительней, так как объем вычислений резко сокращается, отпадает необходимость продолжения кривых напряжения и тока за пределы отрезка от 0 до T_c .

Напряжение $u(t)$ на зажимах синхронной машины (рис. 2г) имеет разрывы в точках $t \cdot T_c$, где $l=0, 1, 2, \dots$.

При задании эквидистантными ординатами кривая напряжения в этих точках сглаживается. Для иллюстрации на рис. 3а сплошной линией показана переменная составляющая напряжения $u'(t)$; через ее эквидистантные значения проведена пунктирная кривая. Как видно, пунктирная кривая, т. е. кривая, вводимая для вычислений по формулам (9) и (10), отходит от $u'(t)$ в точках разрыва, из-за чего возможны значительные погрешности при определении гармоник напряжения, особенно, если эквидистантные отрезки недостаточно малы. Во избежание такого рода погрешностей целесообразно представить $u'(t)$ как сумму трех кривых $u'_1(t)$, $u'_2(t)$ и $u'_3(t)$, показанных на рис. 3б, в, г. Для кривых $u'_1(t)$ и $u'_2(t)$ коэффициенты разложения в

ряд Фурье рассчитываются аналитически по формулам (6), а заданная эквидистантными значениями кривая $u'_3(t)$ разрывов не имеет и ее коэффициенты вычисляются по формуле (10).

Вычисления по формулам (9) и (10) могут быть реализованы на электронной цифровой вычислительной машине при помощи несложной программы. При сравнительно небольшом числе эквидистантных ординат могут быть использованы шаблоны для гармонического анализа или гармонические анализаторы.

3. Описанным методом были определены частотные характеристики синхронной машины СГ-60 б со следующими номинальными данными: $P_n = 55$ квт, $I_n = 79,5$ а, $U_n = 4(к)$ в, $n_n = 10(к)$ об/мин. Опыты проводились по схеме рис. 1 для случая совпадения оси полюсов ротора с осью намагничивания статора (частотные характеристики по оси d). Начальное значение тока затухания i_0 устанавливалось равным $10a$.

Для вычисления коэффициентов ряда Фурье по формулам (9) и (10) были составлены программы для электронной цифровой вычислительной машины. В основном использовалась программа для вычислений по формулам (10) при $n=48$. Вычисления $Z_{изм}(j\omega)$ и $Y_{изм}(j\omega)$ согласно выражениям (4) и (5) производились по программе деления комплексных чисел.

Значения i_0 и соответственно T_c выбирались разными и зависели от скорости бумаги, при которой осциллографировался процесс и чувствительности шлейфа. Благодаря этому получились различные диапазоны частотной характеристики, частично перекрывающие друг друга.

На рис. 4 в логарифмических координатах кружочками изображена построенная в относительных единицах зависимость

$$X_{изм} = \text{Im} [Z_{изм}(j\omega)] = \text{Im} \left[\frac{1}{2} Z_{изм}(j\omega) \right], \quad (11)$$

определенная описываемым методом. Та же зависимость, полученная

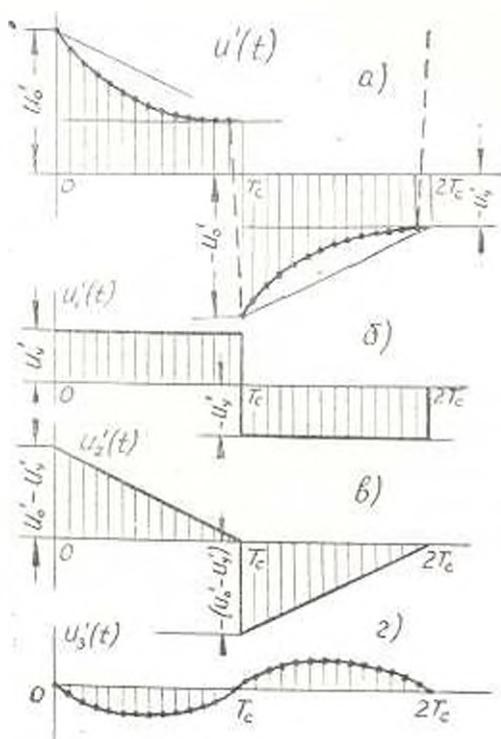


Рис. 3. Разложение кривой напряжения на зажимах синхронной машины.

тока затухания i_0 устанавливалось

ранее методом вынужденных гармонических колебаний [5]. показана на рис. 4 крестиками. Кривые практически совпадают.

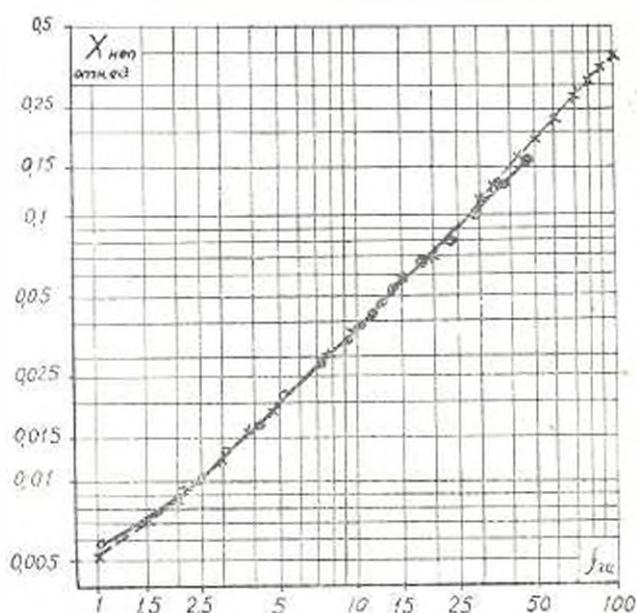


Рис. 1. Зависимость $X_{нел}$ по оси d синхронной машины СГ-60,6 от частоты.

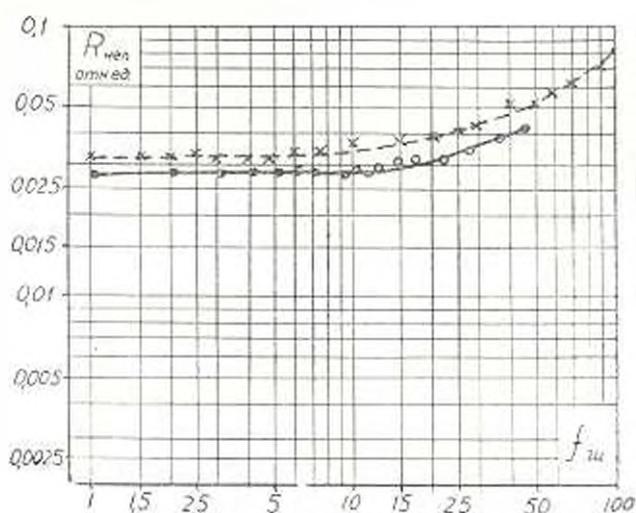


Рис. 5. Зависимость $R_{нел}$ по оси d синхронной машины СГ-60,6 от частоты.

Определение

$$R_{нел} = \operatorname{Re} |Z_{нел}(j\omega)| = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} Z_{ком}(j\omega) \right] \quad (12)$$

описываемым методом и методом вынужденных гармонических колебаний показало, что $R_{нел}$ зависит не только от частоты питающего то-

ка, но и от его амплитуды. Например, при частоте питания 50 Гц $R_{\text{вещ}}$ по оси d машины СГ-60/6 почти постоянно при токах питания от 0,5 до 0,002 I_n , однако при дальнейшем снижении тока $R_{\text{вещ}}$ заметно уменьшается. Влияние величины тока питания на сопротивление $R_{\text{вещ}}$ сказывается тем больше, чем выше частота питающего тока. В то же время на $X_{\text{вещ}}$ величина питающего тока почти не влияет.

На рис. 5 для небольшого диапазона показаны значения $R_{\text{вещ}}$, полученные обработкой кривой затухания описываемым методом.

Выводы

1. Рассмотренный метод позволяет получать частотные характеристики синхронной машины по эквидистантным ординатам тока затухания, что удобно с точки зрения обработки осциллограмм и подготовки данных для ввода в электронную цифровую вычислительную машину. Диапазон частотной характеристики, количество ее точек и интервалы между ними ставятся в зависимость от точности измерений тока затухания. Благодаря простоте алгоритма расчета частотных характеристик решение этой задачи на ЦМ может быть полностью автоматизировано.

2. Данные эксперимента показали совпадения значений индуктивных сопротивлений неподвижной машины, определенных описываемым методом и методом вынужденных гармонических колебаний.

3. Активные сопротивления неподвижной машины, как показали опыты, зависят не только от частоты тока питания, но и от его величины. Поэтому при сопоставлении частотных характеристик синхронной машины определяемых разными методами, одним из критериев сравнения должна быть величина тока или напряжения питания.

При практическом использовании частотных характеристик и для перехода от параметров неподвижной машины к параметрам вращающейся машины необходимо располагать семейством кривых $R_{\text{вещ}} = f(\omega)$ в зависимости от величины тока. Предложенный метод, в силу своей общности, позволяет строить частотные характеристики и по переходным процессам, характер которых отличен от суммы экспонент (например, по наведенному току в коротко-замкнутой обмотке машины).

Վ Ե ՍԱՀԱՌՎ. Գ. Ս. ՄԵԼԿՈՆՅԱՆ

ՍԻՆԽՐՈՆ ՄԵԳՆԵԱՅԻ ՀԱՆՍԱԽԱՎԱԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԿՐԵՐԻ ԱՅՋՄԱՆՄԱՆ
ՄԵԹՈԴԻ ՀՈՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆԿԻ ՄԵԼՐՄԱՆ ԿՈՐԻ ՀԱՐԿՈՒՆԻ ՎԵՐԼՈՒՄԻ ԹՅԱՄԸ

Ա մ փ ա փ ու մ

Հողվածում նկարագրվում է կանգնած առարով սինխրոն մերենայի հաճախահանարան բնութագրերը սահմանման էքսպերիմենտայ մեթոդ, որը կառուցում է ռատատուն լարման անջատման դեպքում մարվող հոսանքի համաձայն արժեքների հարմունիկ վերլուծության մեջ: Մեթոդը հիմնավորվում է տեսականորեն: Արդյվում է համախաղանական բնութագրի գիտապարտի և կետերի բանակի կախումը հոսանքի շափման ճշտությունից:

Մեթոդի էքսպերիմենտայ ստույգման նպատակով պատրաստված է փոքր կարողություն սինխրոն մերենա: Մարվող հոսանքի հարմունիկ վերլուծությունը կատարվում է էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի միջոցով: Նկարագրված մեթոդով և հասկաղրական հարմունիկ տատանումների մեթոդով կատարված հաշվարկների արդյունքների համադրումը ցույց տվեց մոտիկ համընկնում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Давыдовы Я. Б., Казовский Е. Я., Костенко М. П. Экспериментальное исследование новых методов определения параметров машин переменного тока. «Электричество», № 6, 1960.
2. Казовский Е. Я. О построении частотных характеристик переменного тока по кривой затухания постоянного тока с заданной точностью. Сб. работ по вопросам электромеханики, вып. 10, изд. АН СССР, М.—Л., 1963.
3. Костенко М. П., Казовский Е. Я., Волков О. Н., Паны-Цли. Методика определения частотных характеристик машины переменного тока. «Электричество», № 12, 1962.
4. Лампюш К. Практические методы прикладного анализа, Физматгиз, 1961.
5. Сааков В. Н., Мелконян Д. С., Аб А. Ф. Экспериментальное определение частотных характеристик синхронной машины методом вынужденных гармонических колебаний. Изв. АН АрмССР (серия Т.Н.), № 5, 1966.

Г. А. ШАГИНЯН

ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА ОДНОМАШИННЫХ БЕСКОНТАКТНЫХ
 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С КОНДЕНСАТОРНЫМ
 САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ ОБПЧ-К

1. ОБПЧ-К совмещает в одном магнитопроводе две „отдельные“ асинхронные машины (рис. 1), одна из которых 1 является приком-
 лым двигателем, а другая 2 — асинхронным генератором с конденса-
 торным самовозбуждением. Каждая „отдельная“ машина ОБПЧ-К
 имеет свою обмотку, помещенную
 в пазах общего статора: двига-
 тель — обмотку W_1 с числом пар
 полюсов P_1 , генератор — обмотку
 W_2 с числом пар полюсов P_2 . Ро-
 тор 3 общий и выполнен в виде
 короткозамкнутой клетки. Наличие
 короткозамкнутого ротора придает
 ОБПЧ-К большую надежность в
 работе.

Обмотка статора двигателя
 питается от первичной сети с ча-
 стотой f_1 и напряжением U_1 . На-
 пряжение выходной частоты полу-
 чается на зажимах обмотки гене-
 ратора.

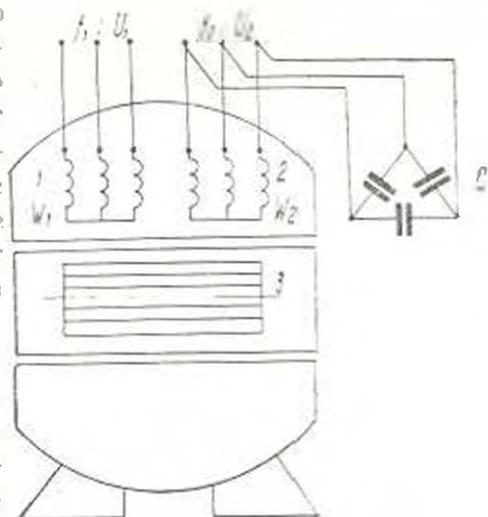


Рис. 1.

Числа пар полюсов обмоток
 статора и „отдельных“ машин преобразователя различны. Они долж-
 ны быть выбраны из условий:

- получения заданной выходной частоты f_2 ;
- отсутствия ненужных взаимоиндуктивных связей между обмо-
 тками W_1 и W_2 „отдельных“ машин;
- магнитной уравновешенности преобразователя.

Известно, что как и всякая другая электрическая машина асин-
 хронная машина с короткозамкнутым ротором обладает способностью
 обратимости, т. е. может работать как в двигательном, так и в гене-
 раторном режимах. И в первом, и во втором случаях потребную для
 создания магнитных полей реактивную мощность асинхронная маши-
 на потребляет из сети. Вследствие этого работа асинхронной машины
 возможна только при наличии постороннего возбудителя.

Источником реактивной мощности при работе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в режиме генератора на индивидуальную сеть может служить батарея статических конденсаторов, параллельно присоединенная к статорной обмотке машины. Успехи отечественной промышленности в области химии и конденсаторостроения позволяют существенно уменьшить габариты батареи возбуждающих конденсаторов, что являлось одной из главных причин тормозящих применение асинхронных генераторов с самовозбуждением.

Батарея статических конденсаторов C , подключенная параллельно статорной обмотке W_2 , служит для самовозбуждения асинхронного генератора 2.

При объяснении принципа действия ОБПЧ-К удобнее пользоваться формальным положением о том, что намагничивающая сила (н. с.) каждой "отдельной" машины преобразователя создает в общем магнитопроводе свой "отдельный" магнитный поток — н. с. двигателя создает поток Φ_1 с индукцией B_1 и запасе, равной B_1 н. с. генератора — поток Φ_2 с индукцией B_2 — и что эти потоки действуют независимо. Одновременное действие двух полей в общем магнитопроводе вызывает увеличение н. с. отдельных машин. При объяснении принципа действия ОБПЧ-К увеличением н. с. "отдельных" машин можно пренебречь. Вращающийся магнитный поток двигателя Φ_1 , взаимодействуя с током роторной обмотки преобразователя, создает вращающий момент и приводит ротор во вращение со скоростью, близкой к синхронной. Скольжение двигателя S_2 , определяемое обычным способом, весьма мало при холостом ходе ОБПЧ-К и может достигать значений 0,03—0,06 при его номинальной нагрузке.

Генератор у ОБПЧ-К возбуждается так же, как и обычный (несовмещенный) асинхронный генератор с конденсаторным самовозбуждением. Скольжение генератора S_1 отрицательно и лежит в тех же пределах, что и S_1 .

Выходная частота преобразователя

$$f_2 = f_1 \frac{P_2}{P_1} \frac{1 - S_1}{1 - S_2}$$

2. Определение допустимых величин удельных электромагнитных нагрузок "отдельных" машин ОБПЧ-Б, проектируемого с магнитопроводом серийного короткозамкнутого асинхронного двигателя [1, 2, 3] и расчет его выходной мощности может быть произведен с помощью системы основных уравнений преобразователя:

$$S_{P1} = K_1 n_1 A_1 B_1 D^2 l;$$

$$S_{P2} = K_2 n_2 A_2 B_2 D^2 l;$$

$$S_{P1} = \gamma S_{P2};$$

$$K_{r21} \Delta_1 A_1 + K_{r12} \Delta_2 A_2 + K_{r21} B_1^2 + K_{r12} B_2^2 = P_{\text{вх}}; \quad (1)$$

$$\frac{\Delta_1 \gamma_{\text{вх}}}{B_1 + B_2} = \frac{\Delta_2 \gamma_{\text{вх}}}{B_1 + B_2} = \frac{A}{\Delta \gamma_{\text{вх}}}$$

$$B_1 + B_2 = \xi B.$$

- Здесь:
- $K_i (K_n)$ — постоянная величина, зависящая от коэффициентов: полюсного перекрытия, обмоточного и формы кривой поля в зазоре двигателя (генератора);
 - $n_1 (n_2)$ — синхронная скорость вращения н. с. двигателя (генератора), *об/мин*;
 - D — диаметр расточки статора, *мм*;
 - l — расчетная длина машины, *мм*;
 - γ — коэффициент, учитывающий связь между расчетными мощностями „отдельных“ машин;
 - B_1, B_2, A_1, A_2 — основные гармоники индукций в зазоре и линейные нагрузки генератора и двигателя;
 - A, B — то же исходного асинхронного двигателя;
 - $\Delta_1 (\Delta_2)$ — допустимая плотность тока в обмотке $W_1 (W_2)$;
 - Δ — то же исходного асинхронного двигателя;
 - $P_{ст1}$ — суммарные потери в меди и стали статора исходного асинхронного двигателя;
 - $K_{cu1}, K_{cu2}, K_{Fe1}, K_{Fe2}$ — расчетные коэффициенты потерь в меди и стали;
 - $\varphi_{cu1} (\varphi_{cu2})$ — коэффициент заполнения паза статора медью обмотки $W_1 (W_2)$;
 - φ_{Fe} — то же исходного асинхронного двигателя;
 - β — расчетный коэффициент индукции.

Для решения системы уравнений (1) ее удобнее представить в относительных единицах в виде:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \beta a_1 b_1 D^2 l \delta_1 \frac{\varphi_{cu1}}{\varphi_{cu}}; \\ \Pi_2 &= \beta a_2 b_2 D^2 l \delta_2 \frac{\varphi_{cu2}}{\varphi_{cu}}; \\ \Pi_1 &= \gamma \Pi_2; \\ \xi_1 a_1 \delta_1^2 + \xi_2 a_2 \delta_2^2 + \beta^2 B^2 (K_{Fe1} b_1^2 + K_{Fe2} b_2^2) &= P_{ст1}; \\ a_1 + a_2 &= 1; \\ b_1 + b_2 &= 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь:

$$\left. \begin{aligned} \Pi_i &= \frac{S_{pi}}{K_i n_i AB}; \quad b_i = \frac{B_i}{B}; \quad \delta_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}; \quad a_i = \frac{A_i}{\Delta_i A} \frac{\varphi_{cu}}{\varphi_{cu1}}; \\ \xi_i &= A \Delta \frac{\varphi_{cu1}}{\varphi_{cu}} K_{cu1}; \quad \gamma = \gamma \frac{K_n n_2}{K_1 n_1} \end{aligned} \right\} (i=1, 2)$$

Из системы уравнений (2) получим:

$$\Pi_2 = \frac{D^2 l}{B} \frac{b_2 (1 - b_2) \xi_2 \delta_2}{\gamma b_2 \delta_2 + (1 - b_2) \delta_1} \times$$

$$\sqrt{\frac{\gamma_1 \xi_2 \xi_3 b_2 + \xi_2 \xi_3 (1 - b_2)}{\gamma_1 b_2 \xi_2 + (1 - b_2) \xi_2 [K_{Fe1} (1 - b_2)^2 + K_{Fe2} b_2^2]}}$$

где

$$\xi_2 = P_{\text{стат}} - \xi_1 b_1^2; \quad (3)$$

$$\xi_3 = P_{\text{стат}} - \xi_2 b_1^2. \quad (4)$$

Решая уравнение

$$\frac{d\Gamma_2}{db_2} = 0, \quad (5)$$

можно найти то оптимальное значение относительной индукции $b_{\text{опт}}$, при котором может быть получена максимально возможная, при заданных условиях, выходная мощность.

Решение уравнения (5) приводится к виду:

$$u_5 b_2^5 + u_4 b_2^4 + u_3 b_2^3 + u_2 b_2^2 + u_1 b_2 + u_0 = 0, \quad (6)$$

где $u_0 \dots u_5$ — постоянные коэффициенты, зависящие от $\gamma_1, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, K_{Fe1}$ и K_{Fe2} .

В частном случае, при $\xi_1 = \xi_2 = 1$ ($\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$), постоянный коэффициент u_2 обращается в нуль и тогда выражение (6) запишется в виде:

$$u^1 b_2^5 + u^3 b_2^3 + u^4 b_2^2 + u^1 b_2 + u^0 = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (6) производилось на счетно-вычислительной машине М-20. Для различных моделей ОБЧ-К оптимальная величина относительной магнитной индукции второй машины колеблется в пределах:

$$b_{2\text{опт}} = 0,4 \div 0,6.$$

Меньшие значения соответствуют множителям частоты, большие значения — делителям частоты.

По найденной величине $b_{2\text{опт}}$ можно найти оптимальные значения остальных неизвестных величин:

$$b_{1\text{опт}} = 1 - b_{2\text{опт}}; \quad \xi_{2\text{опт}} = \frac{\xi_1 b_{1\text{опт}}}{\gamma_1 \xi_2 b_{2\text{опт}} - \xi_1 b_{1\text{опт}}};$$

$$a_{1\text{опт}} = 1 - a_{2\text{опт}}; \quad \beta_{2\text{опт}} = \frac{\Pi_{2\text{опт}}}{a_{2\text{опт}} b_{2\text{опт}} \xi_2 I^2 l}; \quad \Pi_{1\text{опт}} \beta_{1\text{опт}} a_{1\text{опт}} b_{1\text{опт}} I^2 l.$$

Վ. Ա. ՇԱՀԵՆՅԱՆ

ԿՈՆԴԵՍԿԱՏՐՈՒՅԻՆ ԻՆՎԵՐՏԻՐԿՈՒԹՅՈՎ շԱՀԱՍԵՆԿԱՆՈՒԹՅԱՆ
ԱՆԿՈՆՏԱԿՏԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈԽԻՉ ՄԻԱՄԵՔԵՆԱՅԻ ՇԱՀՎԱՐԿՄԱՆ
ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո Վ մ

Համախառնության կերպափոխիչ միամեքենան իրենից ներկայացնում է կրկու աստանձին ապասխնիչուն մեքենաների համառեղում մեկ մագնիսա-սարի մեջ (նկ. 1): Մեքենաներից մեկը համառեղում է շարժիչ, իսկ մյուսը կոնդենսատորային ինքնազրգուծով ապասխնիչուն զեննրատոր: Հողվածով նկարագրված է կերպափոխիչ միամեքենայի կառուցվածքը, սխեման և աշխատանքի սկզբունքները: Տրվում է միամեքենայի տեսակարար էլեկտրամագնիսական բեռնվածքի և էլքի կարողության հաշվարկման եղանակը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Новакшенин В. С. Главные размеры двигательного преобразовательной части синхронного бесщеточного преобразователя частоты и оптимальное распределение его электромагнитных нагрузок. Известия Томского политехнического института, Томск, т. 98, 1960.
2. Павликин В. М., Сиунов Н. С. Оптимальные размеры и электромагнитные нагрузки одномашинного преобразователя частоты. Известия ВУЗ (Электромеханика), № 12, 1962.
3. Нерсисян В. С. Определение главных размеров одномашинных бесконтактных преобразователей частоты. Тезисы докладов жезвуровской научно-технической конференции по преобразованию частот и фаз в технике сильных токов г. Иваново, 1964.

С. С. АРАКЕЛЯН

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ШВОВ-НАДРЕЗОВ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВНО-КОНТРОФОРСНОЙ ПЛОТИНЫ*

Жесткое основание оказывает неблагоприятное влияние на напряженное состояние бетонных плотин. С увеличением жесткости увеличиваются растягивающие напряжения на напорной грани плотины, вызванные действием гидростатической нагрузки. Неблагоприятное сочетание нормальных и касательных напряжений может привести к разрушению контактного шва. Возникновение трещин нарушает монолитность бетонной кладки, вследствие чего может увеличиться фильтрация воды через сооружения и фильтрационное давление. Продолжительная сосредоточенная фильтрация воды через трещины будет ухудшать качество бетона. Наибольшую опасность представляют трещины вблизи напорной грани плотины, где градиенты фильтрационного потока достигают наибольшей величины.

Результаты наблюдения на ряде плотин подтверждают реальную опасность появления трещин на напорной грани плотины. Для предотвращения возникновения трещин в практике строительства гравитационных плотин применяют различные конструктивные мероприятия.

В настоящей работе анализируется напряженное состояние массивно-контрфорсной плотины, расположенной на жестком основании с горизонтальными швами на напорной грани и без них. Исследования проводились на хрупких моделях методом электротензометрии. Рассматривалась плотина без горизонтального шва (модель I) и с горизонтальным швом по контакту плотины с основанием (модели II, III, IV). Глубина шва для модели II, III и IV соответственно составила 0,03 H, 0,06 H и 0,09 H (H — высота плотины). Была исследована также плотина с двумя швами по контакту и на отм. 0,2 H (модели V, VI). Здесь контактный шов имел глубину 0,09 H, а шов находящийся на отметке 0,2 H для модели V и VI имел глубину соответственно 0,03 H и 0,07 H.

Тело модели плотины изготавливалось из гипсопесчаного раствора с модулем упругости 1000 кг/см^2 , при весовом соотношении гипса, песка и воды 1:0,5:0,875. Модель основания выполнялась из бетона с модулем упругости 16000 кг/см^2 .

* Научный руководитель проф. Н. П. Розанов.

На моделях в масштабе 1:200 воспроизводилась секция массивно-контрфорсной плотины высотой 110 м совместно с основанием. Воспроизводились основные нагрузки, действующие на сооружение. Гидростатическая нагрузка осуществлялась системой гидравлических домкратов, собственный вес контрфорса воспроизводился приблизительно — в виде сосредоточенной нагрузки, приложенной на гребне плотины.

Горизонтальный шов между плотиной и основанием выполнялся следующим образом. В контактом сечении устраивался пропил шириной 1,5 мм, который уплотнялся двумя слоями картона с прокладкой между ними листа металлической жести. При этом коэффициент трения в шве составил $0,65 \div 0,7$. Растягивающие напряжения швом не воспринимались. При проведении опытов деформации замерялись на поверхности модели электрическими тензометрами с сопротивлением с базой 10 мм.

Результаты исследования при действии одной гидростатической нагрузки показывают следующее. Нормальные напряжения σ_y в случае отсутствия горизонтального шва (модель I в подошвенном сечении (отм. +2,0 м) у напорной грани являются растягивающими и составляют $-18,7 \text{ кг/см}^2$ (рис. 1). Наличие горизонтального шва по контакту плотины с основанием привело к резкому уменьшению этих напряжений и переходу от растягивающих к сжимающим. Для модели II, III, IV они соответственно составили $-3,3 \text{ кг/см}^2$, $-0,7 \text{ кг/см}^2$, $+3,7 \text{ кг/см}^2$.

Максимальные растягивающие напряжения с углублением шва переместились вглубь подошвы плотины. Причем, при шве с глубиной 0,03 H они были на 18% меньше значений максимальных напряжений при отсутствии шва (рис. 1). Дальнейшее углубление шва привело к увеличению этих напряжений. Для модели IV, когда глубина шва составляла 0,09 H, эти напряжения получились на 43% больше, чем в плотине без горизонтального шва. Устройство горизонтального шва и его углубление привело к увеличению сжимающих напряжений σ_y на низовой грани плотины (от $4,1 \text{ кг/см}^2$ до $7,7 \text{ кг/см}^2$).

Уменьшение растягивающих напряжений на напорной грани плотины с углублением шва распространяется по высоте плотины. На

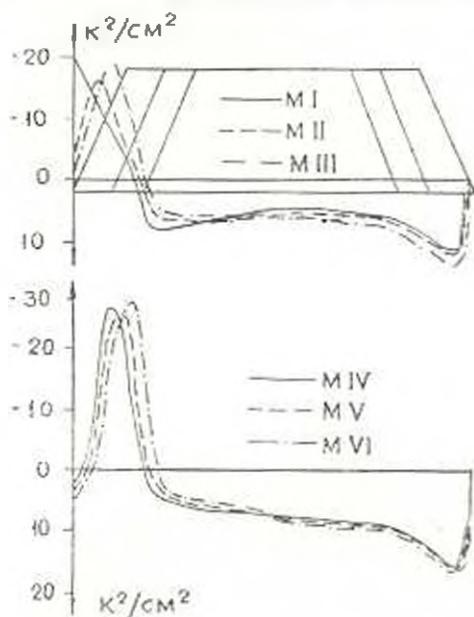


Рис. 1. Напряжения σ_y от действия гидростатической нагрузки (модели I—VI)

основе проведенных исследований (рис. 2) расстояние между горизонтальными швами приблизительно можно определить по формуле:

$$h \approx 3d, \quad (1)$$

где d — глубина шва.

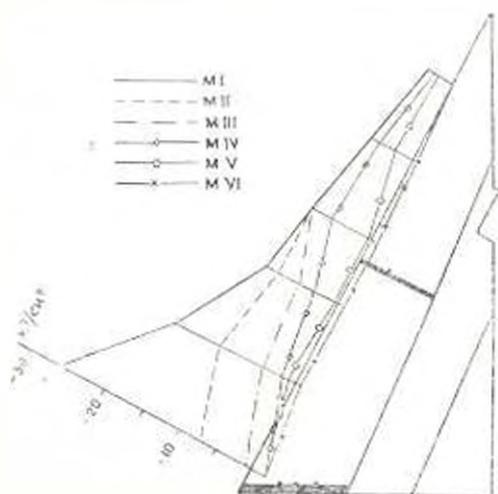


Рис. 2 Главные напряжения σ_1 (кг/см^2) на напорной грани плотины от действия гидростатической нагрузки (модели I—VI).

получились на напорной грани ($14,6 \text{ кг/см}^2$). При глубине шва на $0,03 H$ (модель II) максимальные значения напряжений σ_{xy} несколько уменьшились, но переместились от напорной грани в область за оголовок. Углубление шва на $0,06 H$ и $0,09 H$ привело к возрастанию максимальных значений напряжений σ_{xy} . Например, в последнем случае (модель IV) они увеличились на 38% , по сравнению с напряжениями при отсутствии горизонтального шва.

Результаты исследований при одновременном действии собственного веса контрфорса и гидростатической нагрузки показывают, что устройство горизонтального шва с небольшой глубиной ($0,03 : 0,04 H$) значительно улучшает напряженное состояние плотины.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Горизонтальный шов-надрез значительно улучшает напряженное

устройство шва на отм. $0,2 H$ привело к тому, что по всей напорной грани плотины напряжения σ_1 от растягивающих перешли к сжимающим (рис. 2). Этот шов вызвал также перераспределение напряжений в подошве плотины. В частности, наблюдалось уменьшение значений растягивающих напряжений на конце подошвенного шва-надреза и их увеличение за швом.

На рис. 3 показаны эпюры касательных напряжений σ_{xy} . Для плотины без горизонтального шва максимальные значения этих напряжений

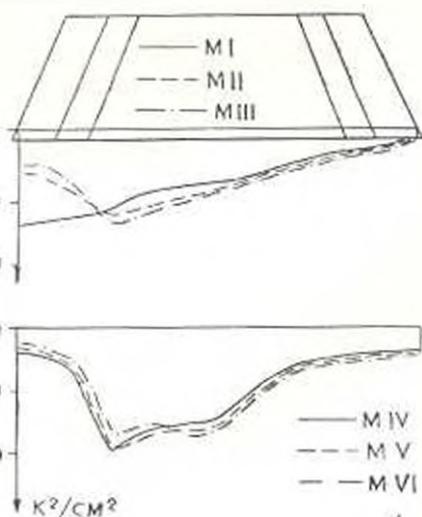


Рис. 3. Напряжения σ_{xy} (кг/см^2) от действия гидростатической нагрузки (модели I—VI).

состояние на поверхности напорной грани плотины, причем чем глубже шов, тем больше уменьшаются растягивающие напряжения σ_x , вызванные действием гидростатической нагрузки.

Углубление шва больше, чем на $(0,03-0,04) H$ приведет к тому, что за швом возрастут нормальные растягивающие напряжения σ_x и касательные напряжения τ_{xy} , вызванные действием гидростатической нагрузки. Следовательно, глубину горизонтального шва-надреза не следует делать больше $(0,03-0,04) H$.

Устройство второго шва на отм. $0,2 H$ привело к уменьшению величины растягивающих напряжений σ_x на конце контактного шва-надреза и их продвижение вглубь подошвы плотины и таким образом уменьшило опасность возникновения трещины в конце шва-надреза.

По высоте плотины можно рекомендовать делать 2 или 3 шва в зависимости от того, какую область занимают большие растягивающие напряжения на напорной грани.

Нижний шов нужно делать или на отм. $(0,02-0,03) H$ или по контакту плотины с основанием. В последнем случае рекомендуется делать бетонную подушку под швом и на некотором участке под подошвой плотины. Тем самым растягивающие напряжения в конце шва будут восприниматься не контактом плотины с основанием, а бетоном, прочность которого на растяжении больше прочности контакта.

МНСИ им. В. Куйбышева

Поступило 21.III.1966.

Ս. Ս. ՍՈՍՐԵՅՅԱՆ

ՀՈՐԻԶՈՆՏԱԿԱՆ ԿԱՐԱՆ-ԿՏՐՎԱՆՔՆԵՐԻ ԱԶՆԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄԱՍՍԻՎ
ԿՈՆՏՐՅՈՐՈՒՄՆԻՆ ՓԱՏՎԱՐԻ ԼԱՐՎԱՆ ՎԻՃԱԿԻ ՎՐԱ

Ս. Վ Վ Ի Ս Վ Ռ Ն Վ

Հողվածում ուսումնասիրված է կոշտ հիմնատակով մասսիվ կոնտրֆորտային պատվարի լարված վիճակը ճնշումային նիստի վրա հորիզոնական կարան-կտրվածքների առկայության դեպքում և առանց դրանց: Հեռավորությունները կատարված են բեկուն մոդելների վրա՝ էլեկտրատեղմանորիայի մեթոդով:

Պարզվել է, որ պատվարի ճնշումային նիստի մակերևույթի լարված վիճակը զգալիորեն նվազում է, երբ կարանը նախատեսված է պատվարի ու հիմնատակի կանաղատում և տևի $0,23-0,04 H$ խորություն (որտեղ H -ը պատվարի բարձրությունն է): Կարանի խորությունը մեծացնելիս ստացվում է բացասական արդյունք: $0,2$ բարձրության վրա երկրորդ կարանի առկայությունը նվազեցնում է ճարագույնացման գտանդը կոնտակտային կարան-կտրվածքի վերջում:

А. И. АГАРОНЯН

СВЯЗЬ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ
 И МОДУЛЕМ СРЕДНЕГО МНОГОЛЕТНЕГО СТОКА
 ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

Вопрос изменчивости годового стока наносов горных рек изучен мало, хотя он имеет немаловажное значение [1, 2, 3]. При наличии длительных наблюдений эта задача может быть приближенно решена путем построения кривой обеспеченности среднегодовых расходов. При отсутствии или недостаточной длительности наблюдений для определения параметров кривой обеспеченности прибегают к косвенным, приближенным способам. В этом случае требуется определить норму годового стока наносов R_0 и коэффициент вариации

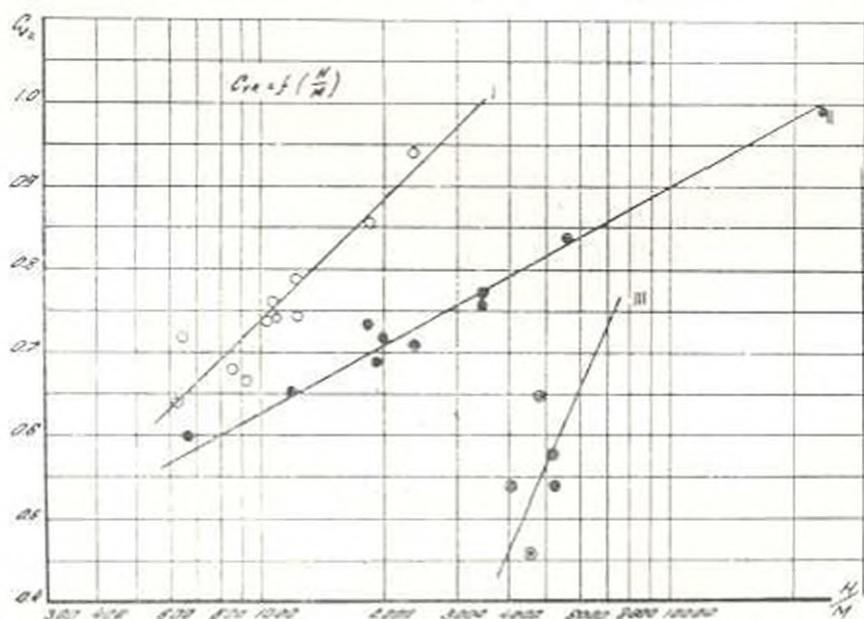


Рис. 1. Зависимость коэффициента вариации от соотношения средней высоты и модуля среднего стока наносов

$C_{vR} = \frac{\sigma}{R_0}$ (1). Модуль стока наносов имеет непосредственное влияние на коэффициент вариации. Это объясняется тем, что факторы формирования твердого стока (осадки, поверхностный сток, степень эроди-

ровности бассейна рек, уклоны и пр.) определяют и изменчивость годового стока наносов.

Коэффициент вариации годового стока наносов и модуль стока наносов зависят от высоты местности, поэтому $C_{vR} = f(M)$ также должна находиться в зависимости от вертикальной зональности. Автором сделана попытка установить связь между коэффициентом изменчивости и соотношением H/M .

Установленная зависимость, представленная на рис. 1, выражается тремя прямыми, которые наглядно выделяют районы с однородными условиями, характеризующими изменчивость годового стока взвешенных наносов. Представленная закономерность получена на основании достаточного количества точек. В результате анализа полученной связи выявились контуры отдельных районов Армянской ССР, границы которых показаны на рис. 2.

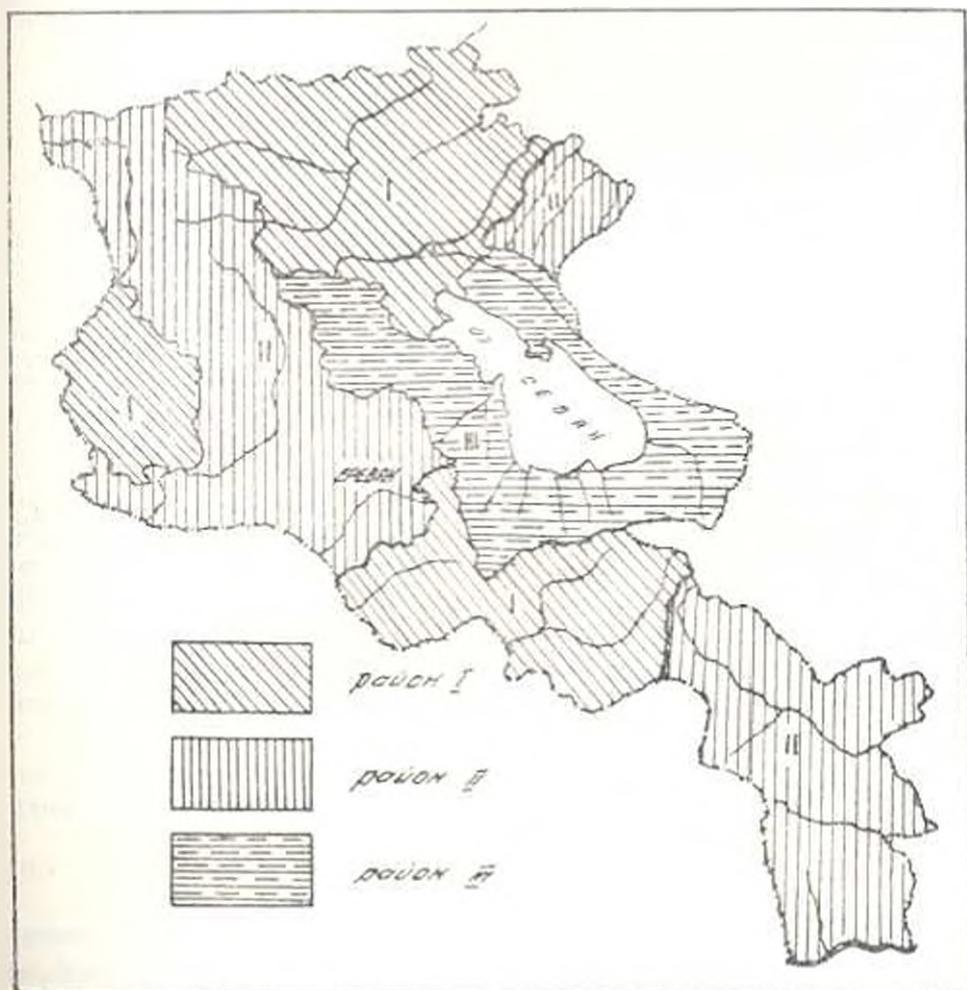


Рис. 2. Районирование коэффициента вариации по графику связи $C_{vR} = f\left(\frac{H}{M}\right)$

Вызывает интерес распределение пунктов по вертикальным зонам. Пункты, соответствующие кривой I, занимают вертикальную зону от 1800 до 2100 м. Пункты кривой II расположены в основном на высоте от 2100 до 2650 м., а пункты кривой III (бассейн озера Севан и р. Мармарик) занимают высоты от 2350 до 2700 м. В связи с тем, что отдельные районы занимают определенные вертикальные зоны, представлялось возможным установить зависимость $C_{v, \bar{x}} = f(M)$ в виде номограммы на рис. 3.

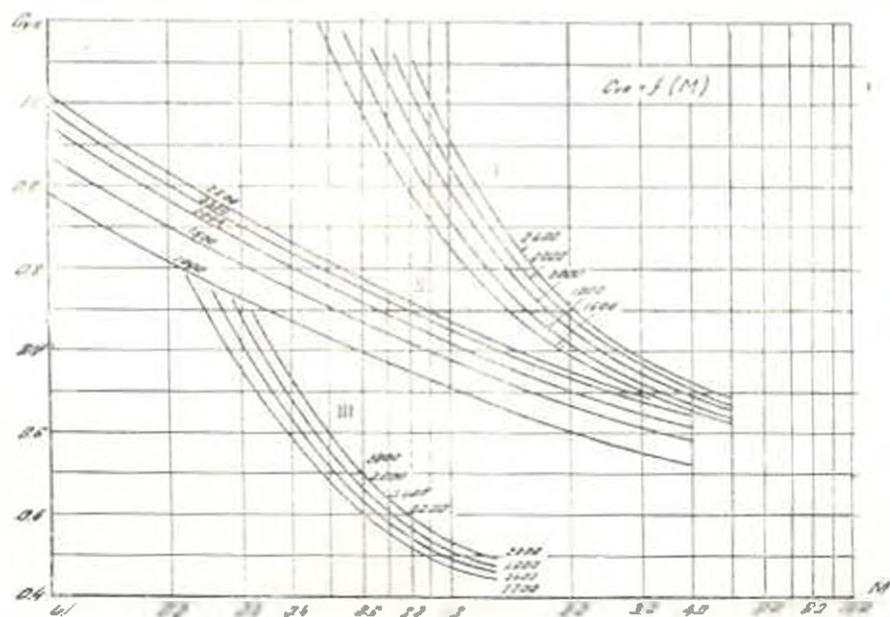


Рис. 3 Номограмма для определения коэффициента вариации $C_{v, \bar{x}}$ по средней высоте водосбора H и модулю среднего годового стока наносов M .

В результате сопоставления фактических коэффициентов вариации с коэффициентами вариации, определенными с помощью номограмм, получилось незначительное расхождение. Среднеквадратичное отклонение величин $C_{v, \bar{x}}$, вычисленных по номограммам, составило соответственно для I, II и III районов 2,34, 2,28 и 7,60%. Результаты расчета представлены в табл. 1. По способу наименьших квадратов получены следующие зависимости коэффициента вариации годового стока внешних наносов от величины H/M :

а) для северной и центральной части Армении (бассейны рек Дзорагет, Дебед, Агстев, Дикнигет, низовья р. Ахурия, Веди, Ариа)

$$C_{v, \bar{x}} = 0,166 \left(\frac{H}{M} \right) + 0,56; \quad (2)$$

б) для северо-западной и северо-восточной части республики (верховья рек Памбак, Ахурия, бассейны рек Касах, Ахум, Азг), а также для рек южной части территории (бассейны рек Воротан, Мегригет)

Таблица 1

Среднеквадратичные отклонения C_{1r} , вычисленных по связям $C_{1r} = f\left(\frac{H}{M}\right)$

Река	Пункт	Средняя высота возобро- да в м	Модуль стока наносов М	C_{1r} фактический	C_{1r} расчет- ный	Отклонение %
I — район						
Памбак	Арчиз	1990	3,29	0,67	0,67	0
Памбак	Туманян	1920	3,00	0,72	0,67	6,90
Дюрарет	Степанаван	1930	1,60	0,74	0,77	1,00
Дюрарет	ниже пл. Гаргар	1860	1,81	0,74	0,73	1,35
Агстев	Дилижан	2000	1,85	0,76	0,76	0
Агстев	Иджеван	1800	2,86	0,64	0,66	3,13
Ахурия	Айкацюр	2010	0,97	0,91	0,97	3,20
Вели	Карабахлар	2090	1,95	0,74	0,75	1,35
Арпа	Ехегнадзор	2140	1,77	0,79	0,76	3,80
Арпа	Арени	2100	2,46	0,68	0,71	1,10
Дзгнгарет	Цопакюх	2220	1,21	0,86	0,89	3,50

 $\bar{z}_{cp} = 2,11$

II — район

Памбак	Налбанд	2050	1,14	0,74	0,70	5,40
Ахум	Шакканин	1650	0,83	0,72	0,71	1,40
Ахурия	Канс	2260	0,66	0,77	0,76	1,30
Касах	Зовуни	2260	0,41	0,75	0,81	8,00
Касах	Аштарак	2150	1,14	0,69	0,70	1,40
Алат	Зовашен	2220	0,95	0,71	0,72	1,40
Мегригет	Мегри	2200	3,36	0,60	0,62	3,30
Воротан	Борисовка	2630	0,11	0,99	0,93	0
Воротан	Ангехакот	2520	0,74	0,76	0,76	0
Воротан	Енваллар	2280	1,96	0,65	0,66	1,50

 $\bar{z}_{cp} = 2,28$

III — район

Мармарик	Атавиладзор	2350	0,59	0,54	0,52	3,70
Варденис	Варденик	2680	0,53	0,58	0,57	1,70
Аргичи	Геташен верхн.	2470	0,52	0,65	0,56	13,9
Гаварарет	Норадуз	2430	0,54	0,46	0,51	17,4

 $\bar{z}_{cp} = 7,60$

$$C_{1r} = 0,263 \left(\frac{H}{M} \right)^{0,102} \quad (3)$$

и) для рек бассейна оз. Севан и р. Мармарик:

$$C_{1r} = 0,0475 \left(\frac{H}{M} \right) = 0,33. \quad (4)$$

В формулах (2) — (4), H в км., M — кг/сек с км². В табл. 2 приводится величина средней погрешности при вычислении C_{1r} по формулам (2) — (4).

Как видно из табл. 2, точность приведенных формул следует считать удовлетворительной. Формулы могут применяться для расче-

Таблица 2

Номера областей	Наименование областей	Число пунктов набл.	Средняя погрешность в %	Формула
1	Северная и центральная часть Армении	11	2,3	(2)
2	Северо-западная, северо-восточная и южная часть республики	10	2,3	(3)
3	Бассейн оз. Севан и р. Мармарик	4	7,6	(4)

та коэффициентов вариации годового стока извешенных наносов рек Армянской ССР при отсутствии или недостаточной длительности наблюдений.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 8.XII.1966.

Ա. Ն. ԱԶԱՐՈՆՅԱՆ

ՓՈՓՈԽՆԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ԿԱՊԸ ԶՐԱԲԵՐՈՒՆԻՐԻ ՄԻՋԻՆ ՐԱԶՄԱՏԱՐՅԱՆ ՀՈՍՔԻ ՄՈԴՈՒԼԻՑ

Ա մ փ ո ւ փ ո ւ մ

Ջրաբերուկների տարեկան հոսքի բաղձատարյան փոփոխականության հաշվումը կարևոր խնդիր է վարպահող հիդրոտեխնիկական շինարարության պահանջները բարելավելու համար: Այս հարցը թիչ է ուսումնասիրված հատկապես յեռնային դետերի համար: Հայաստանի 16 գետերի վրա 24 կետերում կատարված ուսումնասիրությունների արդյունքները (տղ. 1) ցույց են տվել, որ ջրաբերուկների հոսքի տատանումները կախում ունեն ջրհավաք ավազանի միջին հաճատարակշռված բարձրությունից և տարեկան հոսքի մոդուլից: Այդ կապը ներկայացված է նկ. 1-ում և արտահայտվում է երեք կորերով, որոնք պարզ ջուղաչորում են տարեկան հոսքի փոփոխականությունը բնութագրող, համասեռ պայմաններով շրջաններ (նկ. 2):

Ծեծեներական հաշվարկները հեշտադեղելու նպատակով, $C_v = f\left(\frac{H_0}{M}\right)$ կապը նկ. 3-ում ներկայացված է նոմոգրամի տեսքով՝ ըստ առանձին բարձրության գոտիների:

Ջրաբերուկների հոսքի փոփոխականությունը Հայկական ՍՍՀ տեղիտորիայի ցանկացած գետի ամեն մի կետում կարելի է հաշվել տղյուսակ 2-ում բերված բանաձևերով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Давидов Л. К. О коэффициенте вариации годового стока рек. „Метеор. и гидрол.“, Л., 1946.
2. Агазаров И. В. Наука о движении наносов, сопредельные науки и возможности экспериментирования. Изв. АН СССР, М., 1960.
3. Соседов И. В. Опыт приближенного определения коэффициента вариации годового стока горных рек Восточного Казахстана. (Вестник АН Каз.ССР), Алма-Ата, 1954.

С. М. КАЗАРЯН

К ВОПРОСУ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ПРИТОКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В МНОГОСЛОЙНОЙ ФИЛЬТРИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

По генеральной схеме комплексного использования водных ресурсов предполагается при помощи глубоких скважин произвести забор воды в определенных точках Араратской равнины, которая рассматривается как область разгрузки подземных вод, формирующихся на Арагацских и Гегамских массивах и в системе гор Большого и Малого Арарата.

Почво-грунты Араратской равнины представлены суглинными грунтами мощностью от 3 до 15 м (рис. 1). Ниже этого слоя простирается первый водоносный горизонт

мощностью от 5 до 120 м, который представлен мелкими песками, местами с прослойками суглинных линз. Воды первого водоносного слоя слабонапорные. Ниже первого водоносного слоя залегают озерные глины, которые простираются почти по всей площади Араратской равнины. Ниже этих озерных глин залегают галечники и лавы, мощность которых достигает 50-300 м. Этот слой и составляет артезианский водоносный горизонт. Воды артезианского бассейна имеют положительный напор, который местами достигает 25 м. Все водоносные горизонты Араратской равнины гидравлически связаны.

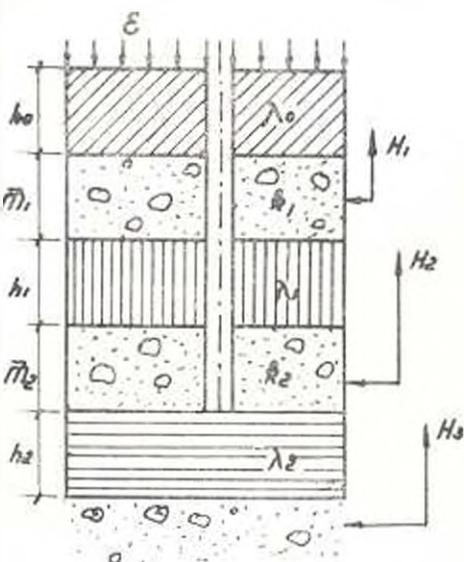


Рис. 1.

Опыт эксплуатации самоизливающихся скважин Араратской равнины и в частности скважин в районе Харатлу показывает, что дебит самоизливающихся скважин изменяется по экспоненциальному закону (рис. 2).

Режимом самоизливающихся скважин при эксплуатации можно управлять задвижками. Возможны следующие случаи эксплуатации скважин: скважины открываются одновременно, т. е. расход увеличивается в зависимости от числа включенных скважин (рис. 3, кри-

ван I); скважины закрываются постепенно по очереди (кривая II); скважины открываются или закрываются одновременно (кривая III).

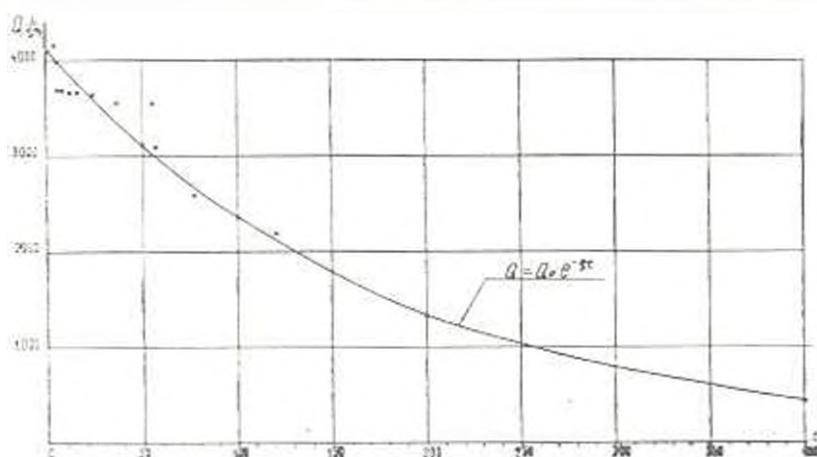


Рис. 2.

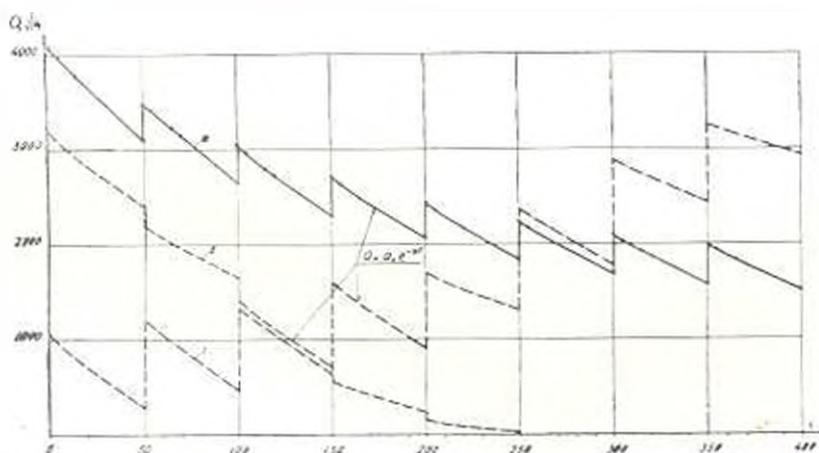


Рис. 3.

В связи с изложенным возникла необходимость решения задачи неустановившегося притока подземных вод в скважину в многослойной фильтрующей среде при переменном режиме излива или откачки.

В условиях, когда скважины занимают сравнительно небольшую площадь по сравнению с площадью подземного резервуара, задача в первом приближении может быть рассмотрена как осесимметричная с граничными условиями, простирающимися в бесконечность.

В свете изложенного нестационарный процесс движения подземных вод в многослойной, гидравлически связанной среде, с учетом инфильтрации поверхностных вод, следуя [1, 2, 3], можно выразить уравнением:

$$m_n \frac{\partial H_n}{\partial t} = m_n k_n \left(\frac{\partial^2 H_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_n}{\partial r} \right) - \frac{\lambda_n}{k_n} (H_n - H_{n+1}) - \frac{\lambda_{n-1}}{h_{n-1}} (H_n - H_{n-1}) - \varepsilon, \quad (1)$$

где m_n — коэффициент порозности n -го хорошо проницаемого слоя;

m_n — мощность того же слоя;

k_n — коэффициент фильтрации того же слоя;

H_n — пьезометрический напор;

λ_n — коэффициент фильтрации n -го плохо проницаемого слоя;

h_n — мощность того же слоя;

ε — интенсивность инфильтрации.

При $n = 1$ и $n = 2$ обозначив

$$a_1^2 = \frac{m_1 k_1}{m_2}; \quad b_1^2 = \frac{\lambda_1}{h_1 m_1}; \quad b_2^2 = \frac{\lambda_2}{h_2 m_2}; \quad S_1 = H_1 - H_2; \quad S_2 = H_2 - H_3; \quad (2)$$

$$a_3^2 = \frac{m_2 k_2}{m_3}; \quad b_3^2 = \frac{\lambda_3}{h_3 m_3}; \quad b_4^2 = \frac{\lambda_4}{h_4 m_4}; \quad e = \frac{\varepsilon}{m_2}$$

на основании (1) получим

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = a_1^2 \left(\frac{\partial^2 S_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_1}{\partial r} \right) - (b_1^2 - b_2^2) S_1 + b_2^2 S_2 - b_1^2 (H_2 - H_1) - e, \quad (3)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = a_2^2 \left(\frac{\partial^2 S_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S_2}{\partial r} \right) + b_1^2 S_1 - (b_1^2 + b_2^2) S_2.$$

Система (3) нами решается при следующих начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} S_1(r, t) \Big|_{t=0} &= s_1 = H_1 - H_2; \\ S_2(r, t) \Big|_{t=0} &= s_2 = H_2 - H_3; \\ S_1(r, t) \Big|_{r \rightarrow \infty} &= \text{ограничено} \\ S_2(r, t) \Big|_{r \rightarrow \infty} &= \text{ограничено} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{при } t > 0; \quad (4)$$

$$Q_1 = 0 = -2\pi r m_1 k_1 \frac{\partial S_1}{\partial r} \Big|_{r=r_1};$$

$$Q_2 = Q_0 e^{-\alpha t} = -2\pi r m_2 k_2 \frac{\partial S_2}{\partial r} \Big|_{r=r_2}.$$

Здесь Q_0 — расход скважины в начальный момент самоналива;

q — постоянная, определяемая по данным опыта;

t — время.

Применяя для уравнений (3) преобразование Лапласа относительно переменной t и учитывая начальные условия, получим:

$$\alpha_1^2 \left(\bar{S}_1 - \frac{1}{r} \bar{S}_1 \right) - (b_1^2 + b_2^2 + P) \bar{S}_1 + b_1^2 \bar{S}_2 = \frac{b_2^2 (H_2 - H_0) + e}{P} - \alpha_1, \quad (5)$$

$$\alpha_2^2 \left(\bar{S}_2 + \frac{1}{r} \bar{S}_2 \right) + b_1^2 \bar{S}_1 - (b_1^2 + b_2^2 + P) \bar{S}_2 = -\alpha_2.$$

Система уравнений (5) имеет частное решение в виде $\bar{S}_1 = \bar{S}_{10}$ и $\bar{S}_2 = \bar{S}_{20}$, где \bar{S}_{10} и \bar{S}_{20} — постоянные (относительно r), которые соответствуют давлениям H_{10} , H_{20} в водоносных пластах I и II, при заданных значениях H_0 и H_2 .

Используя свойства \bar{S}_{10} и \bar{S}_{20} получим:

$$-(b_1^2 + b_2^2 + P) \bar{S}_{20} + b_1^2 \bar{S}_{10} = \frac{b_2^2 (H_2 - H_0) + e}{P} - \alpha_1, \quad (6)$$

$$b_1^2 \bar{S}_{10} - (b_1^2 + b_2^2 + P) \bar{S}_{20} = -\alpha_2.$$

Решая системы уравнений (6) относительно \bar{S}_{10} и \bar{S}_{20} , получим:

$$\bar{S}_{10} = \frac{\alpha_1 P^2 + \delta_1 P + \gamma_1}{(P^2 + dP + f)P}, \quad (7)$$

$$\bar{S}_{20} = \frac{\alpha_2 P^2 + \delta_2 P + \gamma_2}{(P^2 + dP + f)P},$$

где

$$f = b_1^2 \left[\frac{b_2^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2} \left(\frac{b_1'^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2} \right) \right];$$

$$d = b_2^2 \left(1 + \frac{b_1'^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2} \right);$$

$$\gamma_1 = \left[- (H_2 - H_0) \left(\frac{b_1'^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2} \right) \frac{b_0^2}{b_1^2} - e \left(\frac{b_1'^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2} \right) \frac{1}{b_1^2} \right] b_1^2;$$

$$\delta_1 = \left[- \frac{b_0^2}{b_1^2} (H_2 - H_0) + \alpha_1 \left(\frac{b_1'^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2} \right) + \alpha_2 - \frac{e}{b_1^2} \right] b_1^2; \quad (8)$$

$$\gamma_2 = - \frac{b_1'^2}{b_1^2} \left[(H_2 - H_0) \frac{b_0^2}{b_1^2} + \frac{e}{b_1^2} \right] b_1^2;$$

$$\delta_2 = \left[\alpha_2 \left(1 + \frac{b_0^2}{b_1^2} \right) + \alpha_1 \frac{b_1'^2}{b_1^2} \right] b_1^2.$$

Для получения общего решения системы уравнений (5) нужно к найденному частному решению (7) прибавить общее решение однородной системы. Система однородных уравнений (5) по своему начертанию напоминает функцию Бесселя мнимого аргумента, решения которой будем искать в виде [4]:

$$\bar{S}_1 = A_1 K_0(\omega r) + B_1 J_0(\omega r); \quad (9)$$

$$\bar{S}_2 = A_2 K_0(\omega r) + B_2 J_0(\omega r).$$

где $I_0(\omega r)$ и $K_0(\omega r)$ — цилиндрические функции мнимого аргумента, соответственно первого и второго рода нулевого порядка.

Используя условия (4), получим:

$$\bar{S}_1 = A_1 K_0(\omega r), \quad (10)$$

$$\bar{S}_2 = A_2 K_0(\omega r).$$

Подставляя значение \bar{S}_1 и \bar{S}_2 в (5) и используя рекуррентные формулы Бесселя, получим:

$$[a_1^2 \omega^2 - (b_1^2 + b_2^2 + P)] A_1 + b_1^2 A_1 = 0, \quad (11)$$

$$b_2^2 A_1 + [a_2^2 \omega^2 - (b_1^2 + b_2^2 + P)] A_2 = 0.$$

Откуда для нетривиального решения получим:

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{aP + h \pm \sqrt{a^{11} P^2 + h^4 P + h^{11}}}{2a^2}. \quad (12)$$

Подставляя ω_1^2 и ω_2^2 в (12), находим значение A_1 и A_2 с точностью до постоянного множителя

$$A_{11} = A_{12} = 1, \quad (а)$$

$$A_{21,2} = a^{111} P + a^{1V} \sqrt{a^{11} P^2 + h^4 P + h^{11}} + a^V, \quad (б)$$

где

$$a^{11} = a_1^4 \left(1 - \frac{a_2^2}{a_1^2}\right)^2;$$

$$h^1 = 2a_1^4 b_1^2 \left[\frac{b_1^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2} - \frac{a_2^2}{a_1^2} \left(1 + \frac{b_1^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2}\right) + \frac{a_2^2}{a_1^2} \left(\frac{b_1^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2}\right) \right];$$

$$h^{11} = a_1^4 b_1^4 \left\{ \left(\frac{b_1^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2}\right)^2 + 2 \frac{a_2^2}{a_1^2} \left[\left(1 - \frac{b_0^2}{b_1^2}\right) \frac{b_1^2}{b_1^2} - \frac{b_2^2}{b_1^2} \left(1 + \frac{b_0^2}{b_1^2}\right) \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{a_2^2}{a_1^2} \left(\frac{b_1^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2}\right)^2 \right\};$$

$$h = a_1^2 b_1^2 \left[\frac{b_1^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2} + \frac{a_2^2}{a_1^2} \left(1 + \frac{b_0^2}{b_1^2}\right) \right];$$

$$a = a_1^2 \left(1 + \frac{a_2^2}{a_1^2}\right); \quad a^{1V} = -\frac{1}{2a_1^2 \cdot b_1^2 \cdot a_1^2}; \quad (13)$$

$$a^{111} = -\frac{1 - a_2^2/a_1^2}{2a_1^2/a_1^2 \cdot b_1^2}; \quad a^V = -\frac{b_1^2/b_1^2 + b_2^2/b_1^2 - a_2^2/a_1^2 (1 - b_1^2/b_1^2)}{2a_1^2/a_1^2}.$$

С учетом (а), (б) общее решение системы (5) можно представить в следующем виде:

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_{10} + C_1 A_{11} K_0(\omega_1 r) + C_2 A_{12} K_0(\omega_2 r); \quad (14)$$

$$\bar{S}_2 = \bar{S}_{20} + C_1 A_{21} K_0(\omega_1 r) + C_2 A_{22} K_0(\omega_2 r),$$

где C_1 и C_2 — постоянные, определяемые из условия (4)

$$C_1 = \frac{Q_0}{A \sqrt{aP + h + \sqrt{a^{II}P^2 + h^I P + h^{II} (P + q)}} \sqrt{a^{II}P^2 - h^I P - h^{II} K_1(\omega_1 r_0)}$$

$$C_2 = \frac{Q_0}{A \sqrt{aP - h - \sqrt{a^{II}P^2 + h^I P + h^{II} (P + q)}} \sqrt{a^{II}P^2 + h^I P + h^{II} K_1(\omega_2 r_0)}$$

где

$$A = \frac{1.41 \pi r_0 k_2 m_0}{a_1 \frac{a_1}{a_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_1} \cdot d_1}}$$

В дальнейшем членом $(aP + h)$ будем пренебрегать по сравнению с $\sqrt{a^{II}P^2 + h^I P + h^{II}}$ как величиной высшего порядка малости. Кроме того, нетрудно заметить, что при этом мы сохраняем все основные физические параметры, от которых зависит процесс фильтрации.

С учетом этого, подставляя значение C_1 и C_2 в систему (14) и переходя от отображающей функции к ее оригиналу, получим:

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \frac{e^{-t} (\gamma_1 t^2 + \delta_1 t + \gamma_1)}{\lambda (\lambda^2 + d\lambda + f)} d\lambda + \\ &+ \frac{Q_0(1-i)}{2\pi i A} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \frac{e^{-t} K_0(\omega r)}{\sqrt{(a^{II}\lambda^2 + h^I \lambda + h^{II})^2 (\lambda + q) K_1(\omega r_0)}} d\lambda + \\ S_2 &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \frac{e^{-t} (\gamma_2 t^2 + \delta_2 t + \gamma_2)}{\lambda (\lambda^2 + d\lambda + f)} d\lambda + \\ &+ \frac{Q_0}{2\pi i A} \left[a^{III} (1+i) \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \frac{e^{-t} K_2(\omega r)}{\sqrt{(a^{II}\lambda^2 + h^I \lambda + h^{II})^2 (\lambda + q) K_1(\omega r_0)}} d\lambda + \right. \\ &+ a^{IV} (1-i) \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \frac{e^{-t} K_0(\omega r)}{\sqrt{a^{II}\lambda^2 + h^I \lambda + h^{II} (\lambda + q) K_1(\omega r_0)}} d\lambda + \\ &\left. + a^V (1+i) \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \frac{e^{-t} K_0(\omega r)}{(a^{II}\lambda^2 + h^I \lambda + h^{II})^2 (\lambda + q) K_2(\omega r_0)} d\lambda \right], \quad (15) \end{aligned}$$

где

$$\omega = \frac{\sqrt{a^2 \lambda^2 + h^2} - h}{\sqrt{2a}}$$

Линейные интегралы для $S(r, t)$, полученные с помощью теоремы обращения, обычно вычисляются посредством перехода к замкнутому контуру и применением теоремы вычетов [5]. При вычислении линейных интегралов (15) возможны следующие случаи:

1. $\bar{S}(\lambda)$ есть однозначная функция от λ с счетным множеством полюсов. В этом случае, используя контур рис. 4, лемму Жордана и теорему Коши, интеграл (15) можно представить в следующем виде:

$$\int = 2\pi i \Sigma Res. \tag{16}$$

2. $\bar{S}(\lambda)$ имеет точку разветвления и только конечное число полюсов. В этом случае, используя контур рис. 5, интеграл (15) можно представить в виде

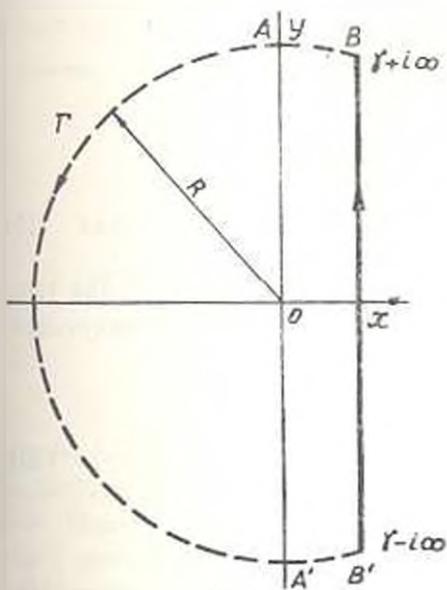


Рис. 4.

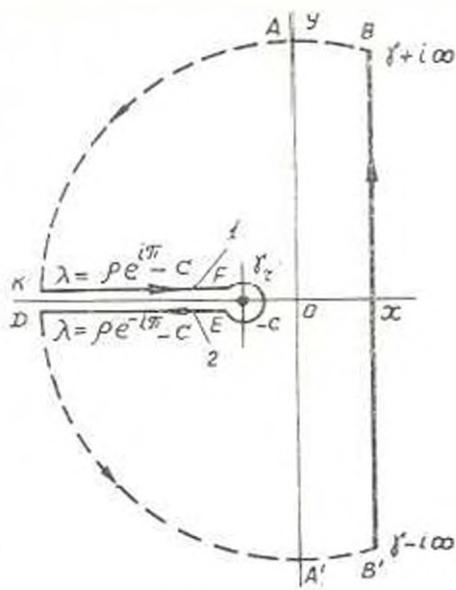


Рис. 5.

$$\int = \int_{KF} + \int_{ED} + \int_{\gamma_r} + \Sigma Res. \tag{17}$$

Первые подынтегральные функции системы уравнений (15) однозначные. Поэтому будем иметь

при $4f > d^2$

$$\int = e^{-\frac{c}{2}t} (\beta_1 \cos \varphi t + \beta_2 \sin \varphi t) + \frac{h}{f} \tag{18}$$

$$\int_0^{\varphi} e^{-\frac{d}{2}\varphi'} (\beta_1 \cos \varphi' + \beta_2 \sin \varphi') + \frac{\gamma_1}{f}; \quad (19)$$

при $4f < d^2$

$$\int_0^{\varphi} -e^{-\frac{d}{2}\varphi'} \left| \frac{e^{-\varphi'}}{2} (\beta_1 - \beta_2) + \frac{e^{-\varphi'}}{2} (\beta_1 + \beta_2) \right| + \frac{\gamma_1}{f}; \quad (18')$$

$$\int_0^{\varphi} -e^{-\frac{d}{2}\varphi'} \left| \frac{e^{-\varphi'}}{2} (\beta_1 - \beta_2^*) + \frac{e^{-\varphi'}}{2} (\beta_1 + \beta_2^*) \right| + \frac{\gamma_1}{f}; \quad (19')$$

где

$$\beta_1 = \alpha_1 - \frac{\gamma_1}{f}; \quad \beta_2 = \sqrt{4f - d^2} \frac{\alpha_1 f d - 2\beta_1 f + \gamma_1 d}{f(4f - d^2)}; \quad \beta_1^* = \alpha_2 - \frac{\gamma_2}{f};$$

$$\beta_2^* = \sqrt{4f - d^2} \frac{\alpha_2 f d - 2\beta_2 f + \gamma_2 d}{f(4f - d^2)};$$

$$\varphi = \sqrt{f - \frac{d^2}{4}}; \quad \varphi_1 = \sqrt{\frac{d^2}{4} - f};$$

$$\beta_2^* = \sqrt{d^2 - 4f} \frac{\alpha_1 f d - 2\beta_1 f + \gamma_1 d}{f(4f - d^2)};$$

$$\beta_1^* = \sqrt{d^2 - 4f} \frac{\alpha_2 f d - 2\beta_2 f + \gamma_2 d}{f(4f - d^2)}.$$

Остальные подынтегральные функции системы уравнений (15) многозначные. Вычисление их производится по формуле (17).

Вычисляя эти интегралы и подставляя в систему уравнений (15), расчетные формулы для S_1 и S_2 можно представить в следующем виде:

$$S_1(r, t) = \varphi_1(H) + \frac{Q_0}{r_0 k_2 m_2} \varphi_1(\varphi); \quad (20)$$

$$S_2(r, t) = \varphi_2(H) - \frac{Q_0}{r_0 k_2 m_2} \varphi_2(\varphi).$$

где

$\varphi_1(H)$ и $\varphi_2(H)$ определяются согласно (18) и (19) формулами:

$$\varphi_1(\varphi) = \varepsilon(B - G);$$

$$\varphi_2(\varphi) = \varepsilon \{ 2a^{III} D - (ca^{III} - a^V) B - G [a^{III}(2q - c) - a^V] \};$$

$$\varepsilon = \frac{1,41 \cdot a_2 \frac{a_2^2}{a_1^2} \sqrt{\frac{a_2^2}{a_1^2}} \cdot b_1^2 e^{-\varphi}}{ca^{III}}; \quad B = \int_0^{\varphi} \frac{e^{-\varphi'}}{\varphi'^2 [q - (\varphi' + c)]} M d\varphi';$$

$$G = \frac{\pi}{2} \frac{e^{a^{III} \varphi} K_0(\varphi \sqrt{c - q})}{(c - q)^{3/2} K_1(\varphi \sqrt{c - q})}; \quad D = \int_0^{\varphi} \frac{e^{-\varphi'}}{\varphi'^2 [q - (\varphi' + c)]} M d\varphi';$$

$$M = \frac{I_0(r_0x\sqrt{\rho}) Y_1(r_0x\sqrt{\rho}) - J_1(r_0x\sqrt{\rho}) Y_0(r_0x\sqrt{\rho})}{J_1^2(r_0x\sqrt{\rho}) + Y_1^2(r_0x\sqrt{\rho})};$$

$$x = \frac{a^{*1/2}}{a_1^2 \sqrt{2 \frac{a_2^2}{a_1^2}}}; \quad \alpha^* = \left(1 - \frac{a_2^2}{a_1^2}\right)^2; \quad c = \frac{b_1^2}{(1 - a_2^2/a_1^2)^2} (-Z \pm \sqrt{Z^2 - Z'});$$

$$Z = \frac{b_2'^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2} - \frac{a_2^2}{a_1^2} \left(1 + \frac{b_2'^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2} - \frac{b_2^2}{b_1^2}\right) + \frac{a_2^4}{a_1^4} \left(\frac{b_1'^2}{b_1^2} - \frac{b_0^2}{b_1^2}\right);$$

$$Z' = \left(1 - \frac{a_2^2}{a_1^2}\right)^2 \left\{ \left(\frac{b_1'^2}{b_1^2} + \frac{b_2^2}{b_1^2}\right)^2 + 2 \frac{a_2^2}{a_1^2} \left[\frac{b_1'^2}{b_1^2} \left(1 - \frac{b_0^2}{b_1^2}\right) - \frac{b_2^2}{b_1^2} \left(1 - \frac{b_0^2}{b_1^2}\right) \right] + \frac{a_2^4}{a_1^4} \left(\frac{b_1'^2}{b_1^2} + \frac{b_0^2}{b_1^2}\right)^2 \right\}.$$

Для облегчения расчетов функции (20) автором табулированы.

Предлагаемая формула позволяет решить задачу неустановившегося притока подземных вод к скважине в многослойной фильтрующей среде при переменном режиме излива или откачки.

Армянский сельскохозяйственный институт

Поступило 21.II.1967.

Վ. Ի. ՂԱՅՐՅԱՆ

ՔԱՐՏՈՒՆԵՐԻՑ ԳԵՆԵՐԱԳ ԽԵՃԱՎԱՅՐՈՒՄ ՍՏՈՐԵՄԿԵՑԱ ՋՐԵՐԻ ԿՆԵՐՆՈՍՄԱՆ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՋԸ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հողվածում արժում է ջրաբեր շերտերում ճշտումների հաշվման մեթոդ՝ ուղղաձիգ դրանից ինքնաթիփման և ջրահանման ցանկացած ուժիմաների դեպքում, Ընդունվում է, որ ստորերկրյա ջրերի ներհոսումը դեպի ջրհորները կարելի է դիտել առանցքով համարյա՝ անսահմանութան ձգտող եզրային պայմաններով:

Ինդիքը լուծված է (4) հավասարումների սխեմայի օդնոթումը սկզբնական ու եզրային (5) պայմանների դեպքում: Ոպերացիոն հաշվի մեթոդներով (4) հավասարումների սխեմայի լուծումից ստացվել է (20) հավասարումների սխեմայի (20) հավասարումների սխեմայի $\varphi_{1,2}(H)$ և $\varphi_{1,2}(\rho)$ ֆունկցիաներն աղյուսակավորվել են պարամետրների լայն դիապոզիտի համար, որը հնչուսցնում է խնդրի լուծումը տարբեր ֆիզրագիտությունների պայմանների դեպքում:

Ս Ի Ն Տ Ի Ր Ա Տ Ր Ա

1. Подубаринова-Кочина И. Я. Теория движения грунтовых вод. М. ГТТИ, 1952.
2. Матия А. И. Действие колодца в напорном бассейне подземных вод. Изв. Туркменского филиала АН СССР, № 1, 1946.
3. ԳԻ, № 4

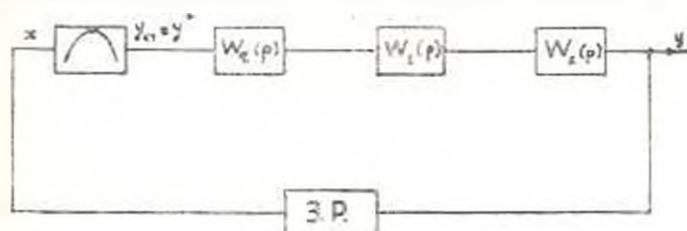
3. *Барои В. А.* Неустановившийся приток подземных вод к скважине вертикального дренажа. Изв. АН Узбекской ССР. Вопросы гидротехники, вып. 3, 1961.
4. *Ватсон Г. Н.* Теория Бесселевых функций. Часть вторая, II.1, 1949.
5. *Андре Анго.* Математика для электро- и радиотехников (перевод с французского). М., 1964.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. В. КАЗАКЕВИЧ, Р. С. РАФАЕЛЯН, Л. Р. АМИЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ШАГОВОГО ТИПА С ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЕМ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ЗНАЧЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ

Исследуется часто встречающаяся в технике шаговая система экстремального регулирования с объектом, представляемым последовательным соединением экстремального звена, звена чистого запаздывания и следующей за ними цепочки из двух апериодических звеньев первого порядка. Структурная схема показана на рис. 1; $y^* = f(x)$



$y^* = f(x)$ — экстремальная характеристика
 Э.Р. — экстремальное регулирование

Рис. 1.

представляет собой экстремальную характеристику, аналитическое выражение которой неизвестно, но известно, что она имеет только один экстремум, не имеет точек разрыва и допускает разрывы непрерывности $f'(x)$ второго рода. $W_i(p) = e^{-p\tau_i}$, где τ_i — время чистого запаздывания

$$W_i(p) = \frac{1}{T_i p + 1} \quad ; \quad i = 1, 2.$$

В работах [1, 2, 3] получены алгоритмы наискорейшего поиска экстремума в шаговых идеализированных системах экстремального регулирования (ШСЭР) второго, третьего и n -го порядков. Делалось допущение, что измерения свободны от ошибок, за счет чего получали точное решение системы уравнения. В настоящей работе учитывается влияние помех для системы 2-го порядка.

Связь между динамическим выходом y и статическим выходом $f(x)$ данной системы представляется уравнением:

$$e^{\tau_0 p} (T_1 p + 1) (T_2 p + 1) y = f(x). \quad (1)$$

Допустим в начальный момент времени $t = 0$, $x = x_0$ и

$$y = y_0, \quad y' = y_0' \quad (2)$$

(в общем случае $y_0 \neq f(x_0)$) и затем в момент $t = +0$ совершенно мгновенное смещение входа Δx , $|\Delta x| = k = \text{const}$. В течение времени чистого запаздывания $0 \leq t \leq \tau_3$ переходный процесс определяется начальными условиями (2) и возмущением $f(x_0) - y_0$, а начиная с момента $t = \tau_3$, переходный процесс будет определяться другими начальными условиями и новым значением возмущения $f(x_0 + \Delta x) - y_1$, где y_1 — решение уравнения (1) при $t = \tau_3$ с начальными условиями (2). Во временном интервале $[0, \tau_3]$ переходный процесс в координатах $\Delta = y - y_0$, t будет описываться уравнением:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \Delta = a_0, \quad (3)$$

где $a_0 = f(x_0) - y_0$ — возмущение.

В новой системе координат начальные условия примут вид:

$$\Delta(0) = 0; \quad \Delta'(0) = \Delta_0', \quad (4)$$

Решение уравнения (3) при начальных условиях (4) имеет вид:

$$\Delta(t) = a_0 \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \frac{\Delta_0' T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (5)$$

На рис. 2 кривые $y = f(x)$ и $\Delta = \Delta(t)$ условно изображены вместе. Начиная с момента $t = \tau_3$, динамика объекта описывается уравнением

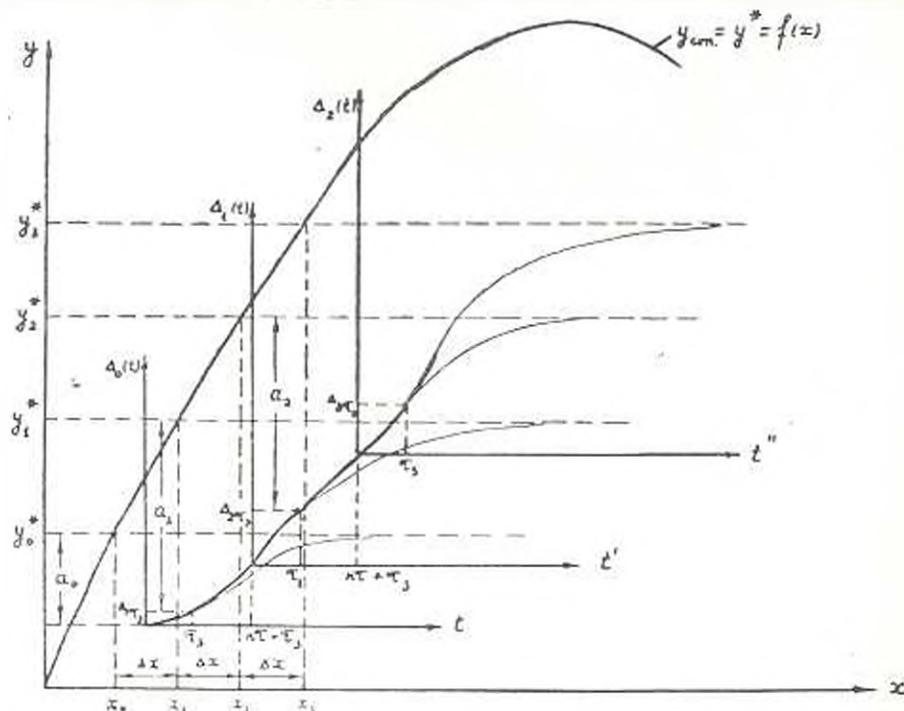


Рис. 2.

$$\Delta a_1 = \frac{\begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \Delta_{1i}, \quad \sum_{i=1}^n A_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta_{1i} A_i, \quad \sum_{i=1}^n A_i^2, \quad \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n \Delta_{1i} B_i, \quad \sum_{i=1}^n A_i B_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{array}}{\begin{array}{l} n, \quad \sum_{i=1}^n A_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i \\ \sum_{i=1}^n A_i, \quad \sum_{i=1}^n A_i^2, \quad \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n B_i, \quad \sum_{i=1}^n A_i B_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{array}}$$

Отсюда можно определить

$$y_1^* = y_0 + \Delta a_1 + a_1.$$

В [1] доказывается, что, поступая аналогичным образом, в интервале между двумя последовательными смещениями входа можно прогнозировать за короткий промежуток времени значение переходного процесса, вызванного смещением входа при произвольном k -м шаге при бесконечно большом t .

Причем, каждый следующий шаг делается после определения

$$\gamma_k = y_{k+1}^* - y_k^*$$

по признаку

$$\Delta x_{k-1} = k \cdot \text{sign}(\gamma_k \cdot \Delta x_k),$$

где

$$y_k^* = y_0 + \sum_{i=1}^{k-1} \Delta_{1i}^* + \Delta x_{k-1} + a_k,$$

при этом

$$a_k = \frac{\begin{array}{l} n_k, \quad \sum_{i=1}^n \Delta_{ki}, \quad \sum_{i=1}^n B_i \\ \sum_{i=1}^n A_i, \quad \sum_{i=1}^n \Delta_{ki} A_i, \quad \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n B_i, \quad \sum_{i=1}^n \Delta_{ki} B_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{array}}{\begin{array}{l} n, \quad \sum_{i=1}^n A_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i \\ \sum_{i=1}^n A_i, \quad \sum_{i=1}^n A_i^2, \quad \sum_{i=1}^n A_i B_i \\ \sum_{i=1}^n B_i, \quad \sum_{i=1}^n A_i B_i, \quad \sum_{i=1}^n B_i^2 \end{array}}$$

a Δ_{in}^* вычисляется из уравнения

$$\Delta_{in}^* = \Delta_{i-1} + a_i \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\pi T_1}{T_1 - T_2}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\pi T_2}{T_1 - T_2}} \right) + \frac{\Delta_i T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{\pi T_1}{T_1 - T_2}} - e^{-\frac{\pi T_2}{T_1 - T_2}} \right),$$

где Δ_{i-1} , a_i и Δ_i — значения, полученные из критерия наименьших квадратов.

Следовательно,

$$\delta_k = y_{k-1} - y_k = (\Delta_{in}^* - \Delta_{k+1}) - (a_{k+1} - a_k). \quad (12)$$

В общем случае для $(k+1)$ -го шага имеем:

$$\Delta_{k+1} = k \cdot \text{sign} \{ |(\Delta_{kn}^* - \Delta_k) + \Delta_{i(k-1)} - (a_{k-1} - a_k)| \cdot \Delta x_k \}. \quad (13)$$

Выражением (13) определяется стратегия ИСЭР в случае объекта, представляемого звеном чистого запаздывания и двумя инерционными звеньями. Данная стратегия обеспечивает более быстрый поиск экстремума по сравнению с обычными ИСЭР.

Рассмотрим важный случай, когда $\tau_3 = 0$, т. е. имеется объект, представляемый двумя аperiodическими звеньями первого порядка, следующими за звеном с экстремальной характеристикой. При этом переходный процесс, вызванный k -м шагом, будет определяться уравнением:

$$\Delta_k(t) = a_k \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \frac{\Delta_k T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (14)$$

Из $\tau_3 = 0$ следует, что $\Delta_{k+1} = \Delta_{i(k-1)} = 0$ и (12) получает вид:

$$\delta_k = \Delta_{ik}^* - (a_{k+1} - a_k)$$

и для $(k+1)$ -го шага получаем алгоритм:

$$\Delta_{k+1} = k \cdot \text{sign} \{ |[\Delta_{kn}^* + (a_{k+1} - a_k)] \Delta x_k \}. \quad (15)$$

Часто в процессе работы объект меняет некоторые из своих параметров. Так, например, постоянные времени T_1 и T_2 могут колебаться под влиянием различных факторов в некоторых пределах. При этом применение выведенного алгоритма поиска экстремума может вызвать ошибочное изменение исходного параметра. Следовательно, не всегда можно считать заданными постоянными T_1 и T_2 уравнения (14). Считая T_1 и T_2 неизвестными параметрами объекта, определим алгоритм поиска экстремума.

Сделав n ($n > 4$) измерений значений переходного процесса через равные промежутки времени τ , получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{k1} &= a_1 \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \\
 &\quad + \frac{\Delta_1 T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \\
 \Delta_{k2} &= a_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \\
 &\quad + \frac{\Delta_2 T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \\
 \Delta_{kn} &= a_n \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right) + \\
 &\quad + \frac{\Delta_n T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right).
 \end{aligned} \tag{16}$$

Положив

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta_1 T_1 T_2 - T_1}{T_1 - T_2} &= C_1, \quad e^{-\frac{t}{T_1}} = U_1, \\
 \frac{\Delta_2 T_1 T_2 - T_2}{T_1 - T_2} &= D_1, \quad e^{-\frac{t}{T_2}} = U_2
 \end{aligned}$$

и сделав соответствующие преобразования в уравнениях системы (16)* получим:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{k1} &= a_1 - C_1 U_1^2 - D_1 U_1^2, \\
 \Delta_{k2} &= a_2 + C_2 U_1^2 - D_2 U_2^2, \\
 \Delta_{kn} &= a_n + C_n U_1^2 - D_n U_2^2.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Составив первые разности уравнений системы (17), определим C_k и D_k из двух уравнений новой системы и подставив в оставшиеся уравнения системы, получим

$$\begin{aligned}
 b_{k1} U_1 U_1 - b_{k2} (U_1 - U_2) + b_{k3} &= 0, \\
 b_{k2} U_2 U_2 - b_{k1} (U_1 - U_2) - b_{k3} &= 0, \\
 b_{k(n-1)} U_1 U_2 - b_{k(n-2)} (U_1 - U_2) - b_{k(n-1)} &= 0.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Если в систему (18) подставить какую-нибудь систему значений $\{U_1, U_2\}$, то $(n-3)$ результаты подстановки в общем случае будут равны $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{n-3}$. Определим $\{U_1, U_2\}$ таким образом, чтобы сумма квадратов ошибок была минимальной.

Из этого условия получается следующая система двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial (U_1 U_2)} &= U_1 U_2 \sum_{i=1}^{n-3} b_{ki}^2 - (U_2 + U_1) \sum_{i=1}^{n-3} b_{ki} b_{k(i+1)} + \\ &+ \sum_{i=1}^{n-3} b_{ki} b_{k(i+2)} = 0, \\ \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial (-U_1 - U_2)} &= U_1 U_2 \sum_{i=1}^{n-3} b_{ki} b_{k(i+1)} - (U_1 - U_2) \sum_{i=1}^{n-3} b_{k(i+1)} + \\ &+ \sum_{i=1}^{n-3} b_{k(i+1)} b_{k(i+2)} = 0, \end{aligned} \right\} (19)$$

Пусть $\{U_1^*, U_2^*\}$ — решение системы (19), не противоречащее физическому смыслу задачи. Тогда, так как

$$U_1^* = e^{-\frac{\tau_1^*}{T_1}}, \quad U_2^* = e^{-\frac{\tau_2^*}{T_2}},$$

то получим:

$$T_1^* = \frac{\tau_1^*}{\ln U_1^*} \quad \text{и} \quad T_2^* = \frac{\tau_2^*}{\ln U_2^*}.$$

Следовательно, система уравнений (16) запишется в виде

$$\begin{aligned} \Delta_{k1} &= a_k E_{k1} + \Delta_k D_{k1}, \\ \Delta_{k2} &= a_k E_{k2} + \Delta_k D_{k2}, \\ \Delta_{kn} &= a_k E_{kn} + \Delta_k D_{kn}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} E_{ki} &= \frac{T_1^*}{T_1^* - T_2^*} e^{-\frac{\tau_i}{T_1^*}} + \frac{T_2^*}{T_1^* - T_2^*} e^{-\frac{\tau_i}{T_2^*}}, \\ D_{ki} &= e^{-\frac{\tau_i}{T_1^*}} - e^{-\frac{\tau_i}{T_2^*}}. \end{aligned}$$

Таким образом получили в общем случае несовместную систему из n уравнений с неизвестными a_k , Δ_k .

Тогда сумма квадратов ошибок

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (a_k E_{ki} + \Delta_k D_{ki} - \Delta_{ki})^2.$$

Из условия минимума E получаем

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial a_k} &= a_k \sum_{i=1}^n E_{ki}^2 + \Delta_k \sum_{i=1}^n D_{ki} E_{ki} - \sum_{i=1}^n \Delta_{ki} E_{ki} = 0, \\ \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial \Delta_{k-1}} &= a_k \sum_{i=1}^n E_{ki} D_{ki} + \Delta_{k-1} \sum_{i=1}^n D_{ki}^2 - \sum_{i=1}^n \Delta_{ki} D_{ki} = 0. \end{aligned}$$

Откуда

$$\alpha_k = \frac{|\Delta \sigma_k|}{|\Delta|}$$

Подставляя полученное значение α_k в (14), получим для системы экстремального регулирования второго порядка постоянные времени, T_1 и T_2 , которых неизвестны, алгоритм быстрого поиска экстремума с полутным определением T_1 и T_2 в интервале между двумя последовательными смещениями входа.

Московский полиграфический
институт

Поступило 20.IV.1967.

Վ. Վ. ԿԱԶԿՎԻՉ, Պ. Ս. ԿԱՅԱՆՈՎԱՆ, Լ. Ռ. ԱՐՅԱՆ

ՆԱԿԱԿԱՆ ՀԱՆՎԱՐԿՈՒՄՈՎ ԲԱՅՎԱՅԻՆ ՏԻՊԻ ԷԿՍՏՐԵՄԱԼ ԿԱՌԱՎՈՐՄԱՆ
ՍԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԿԱՆԳԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԱՐԿԱՅՈՒԹՅԱՄԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Հետազոտվում են բարձր հաճախականության խանգարումների ազդեցության տակ գտնվող 2-րդ կարգի քայլային ախտի ինքնըզոն էքստրեմալ սխեմաները: Գտնվում է աչդպիսի սխեմաների էքստրեմալ կառավարման սարատեղիան, որը թույլ է տալիս կարճ ժամանակում (համեմատած եղած սարատեղիաների հետ) գտնել էքստրեմումը: Միաժամանակ այդ սարատեղիան փոքրացնում է խարուսիկ քայլերի հաճախականությունը:

Տվյալ սարատեղիայի առավելություններին է նաև այն, որ պետք չէ անպատճառ իմանալ օբյեկտի բոլոր պարամետրերը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Каказевич В. В.* О процессе экстремального регулирования инерционных объектов при наличии возмущений. Тр. I международного конгресса ИФАК, том II, изд. АН СССР, 1961.
2. *Каказевич В. В.* Об алгоритме наибоыстрейшего поиска в импульсных системах экстремального регулирования. Автоматика и телемеханика, № 12, 1966.
3. *Каказевич В. В., Рафаэлян Р. С.* Об алгоритме наибоыстрейшего поиска экстремума в инерционных системах n -го порядка. Труды III Всесоюзного симпозиума (в печати).

Լ. Օ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ОБ ОДНОМ ПРЕДЕЛЬНОМ ПЕРЕХОДЕ ПРИ РЕШЕНИИ
 УРАВНЕНИЙ ЛИНИЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

При комплексной автоматизации сложных энергосистем зачастую приходится передавать энергию либо информацию на большие расстояния. Каналами передачи могут служить как электрические, так и пневматические длинные линии, переходные процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. В связи со сложностью расчета синтеза упомянутых систем автоматического регулирования часто прибегают к математическому моделированию, причем общеизвестно, что аналогом длинных линий являются цепочные схемы с сосредоточенными параметрами.

Систему уравнений, описывающих цепочные схемы, можно получить, пользуясь либо классическими методами четырехполюсников, либо методом дискретного преобразования Лапласа. Для решения цепных схем с большим успехом может быть применен также метод производящих функций.

Автором статьи предлагается метод предельного перехода от уравнения цепочных схем к уравнениям, описывающим переходные процессы в линиях с распределенными параметрами.

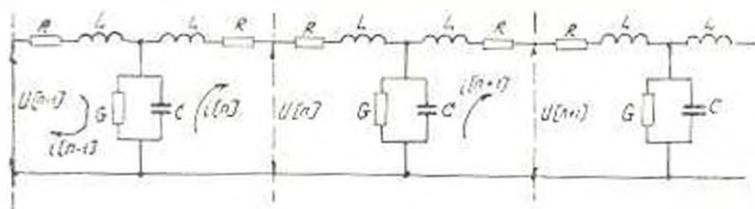


Рис. 1.

Рассмотрим систему уравнений, описывающих цепочную схему, представленную на рис. 1]:

$$U[n] = U[0] \cdot \operatorname{ch} x \cdot n - i[0] \cdot Z \cdot \operatorname{sh} x \cdot n, \tag{1}$$

$$i[n] = i[0] \cdot \operatorname{ch} x \cdot n - U[0] \cdot I \cdot \operatorname{sh} x \cdot n.$$

Здесь $x = \operatorname{arch} |1 + (PL + R)(G + PC)|$,

$$Z = \frac{1}{I} - \frac{1}{G + PC} \cdot \sqrt{(R + PL)(G + PC)^2 - (R + PL)(G - PC)}.$$

Обозначим параметры погонного метра длинной линии соответственно L_0, R_0, C_0, G_0 , а длину линии — l . Приведенную цепочную схему можно рассмотреть как грубый аналог длинной линии и тогда можем записать следующие соотношения:

$$R = \frac{R_0 l}{2n}, \quad L = \frac{L_0 l}{2n}, \quad G = \frac{G_0 l}{n}, \quad C = \frac{C_0 l}{n},$$

где n — количество цепочек, соответствующих длине l .

Чем большее количество цепочек соответствует данной длине l , тем с меньшей ошибкой можно отождествлять процессы, происходящие в цепочных схемах с процессами в длинных линиях. При $n \rightarrow \infty$ цепочная схема окончательно переходит в длинную линию.

Найдем предел аргумента xn при $n \rightarrow \infty$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} xn = \lim_{n \rightarrow \infty} n \operatorname{arch} \left| 1 + \frac{l^2}{2n^2} (PL_0 + R_0) (G_0 + PC_0) \right|.$$

Обозначим

$$(PL_0 + R_0) (PC_0 + G_0) = v^2$$

и после несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} xn &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \ln \left| 1 + \frac{l^2 v^2}{2n^2} + \sqrt{\left(1 + \frac{l^2 v^2}{2n^2}\right)^2 - 1} \right| \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n \cdot \ln \left(1 + \frac{lv}{n}\right) = lv. \end{aligned} \quad (2)$$

Определим теперь значения Z и I , входящих в уравнение (1)

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} Z &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{R_0 + PL_0}{G_0 + PC_0} \left| 2 + (R_0 + PL_0) (G_0 + PC_0) \right|} = \\ &+ \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{R_0 + PL_0}{G_0 + PC_0} \left| 2 + \frac{l^2}{2n^2} (R_0 + PL_0) (G_0 + PC_0) \right|} = \\ &= \sqrt{\frac{R_0 + PL_0}{G_0 + PC_0}} = Z_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя полученные результаты (2) и (3) в систему уравнений (1), окончательно получим систему уравнений, описывающих процессы в линиях с распределенными параметрами:

$$\begin{aligned} U(l) &= U(0) \cdot \operatorname{ch} lv - i(0) \cdot Z_0 \operatorname{sh} lv, \\ i(l) &= i(0) \operatorname{ch} lv - U(0) \cdot I_0 \operatorname{sh} lv. \end{aligned} \quad (4)$$

Указанный предельный переход от уравнений цепочных схем к уравнениям длинных линий легко осуществить на любой стадии расчета переходных процессов.

Покажем, например, что, исходя из окончательного уравнения переходного режима в короткозамкнутой цепочной схеме без потерь, при включении постоянного э.д.с.

$$U_s = E \left[1 - \frac{S}{n} - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \operatorname{ctg} \frac{k\pi}{2n} \sin \frac{k \cdot S \cdot \pi}{n} \cdot \cos \frac{2 \sin \frac{k \cdot \pi}{2n}}{\sqrt{2LC}} \cdot t \right] \quad (5)$$

(здесь в отличие от [2] вместо \sqrt{LC} взято $\sqrt{2LC}$, чтобы придерживаться рис. 1), нетрудно получить уравнение, описывающее переходный процесс в короткозамкнутой линии без потерь с распределенными параметрами при включении постоянного в.д.с. При этом представляется возможность миновать громоздкие преобразования, которыми обычно оперируют для вывода уравнения переходного процесса в длинных линиях. В предельном случае, когда $n \rightarrow \infty$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S}{n} = \frac{x}{l}, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \sin \frac{k \cdot S \cdot \pi}{n} = \sin \frac{k \cdot x \cdot \pi}{l},$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \operatorname{ctg} \frac{k\pi}{2n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\cos \frac{k\pi}{2n}}{n \cdot \sin \frac{k\pi}{2n}} = \frac{2}{k\pi}.$$

Пользуясь соотношением $2L = \frac{l_0 l}{n}$ и $C = \frac{C_0 l}{n}$, получим

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 \cdot \sin \frac{k \cdot \pi}{2n}}{\sqrt{2LC}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n \cdot \sin \frac{k \cdot \pi}{2n}}{l \sqrt{L_0 C_0}} = \frac{k\pi}{l \sqrt{L_0 C_0}}.$$

Подставляя найденные выражения в (5), окончательно получим искомое уравнение:

$$U(x) = E \left[1 - \frac{x}{l} - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{k \cdot x \cdot \pi}{l} \cdot \cos \frac{k \pi}{l \sqrt{L_0 C_0}} \cdot t}{k} \right]. \quad (6)$$

Систему уравнений (4) и (6) обычно получают решением системы дифференциальных уравнений с частными производными.

Дифференциальными уравнениями с частными производными описывается также процесс передачи сигналов через длинные пневматические трубопроводы, процесс передачи тепла через однородную стенку, диффузионные процессы, а также другие явления, являющиеся предметом изучения математической физики.

Очевидно, что в каждом из этих случаев представляется возможность применения рассмотренного выше предельного перехода.

Ереванский филиал
ВНИИЭЛЕКТМАШ

Поступило 24.XII.1966.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыкин Я. Э. Переходные и установившиеся процессы в импульсных цепях. Госэнергоиздат, 1951.
2. Конторович М. И. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. СИТЭЛ, 1955.

С. Г. ИОННИСЯН

ОБ УЧЕТЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ПРИ ОЦЕНКЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Расчет трещиностойкости железобетонных конструкций производится в предположении однократного статического нагружения конструкции без учета длительного воздействия нагрузки, а также изменения внешней нагрузки в процессе эксплуатации конструкции. Как известно, длительное воздействие нагрузки на железобетонный элемент приводит к изменению его напряженного состояния. Бетон во времени растружается, в исклепругаемой арматуре напряжения увеличиваются, а предварительно напряженной арматуре имеют место потери напряжений. Указанные процессы количественно меняются в зависимости от процента армирования элемента обычной и предварительно напряженной арматурой, величины и характера изменения внешней нагрузки, физико-механических свойств бетона и т. д.

Определенное соотношение указанных факторов может привести к тому, что в элементе, заведомо рассчитанном на восприятие сжимающих усилий, могут возникнуть растягивающие напряжения и трещины. Это может быть в конструкциях, собственный вес которых составляет небольшую часть действующей нагрузки, причем режим эксплуатации конструкции предусматривает периодическую его разгрузку. Одним из таких примеров был описан А. А. Гвоздевым [1]. На одном промышленном предприятии емкости поддерживались железобетонными рамами. Согласно технологическому процессу емкости большую часть времени были заполнены, но периодически опорожнялись на несколько часов. Вследствие ползучести бетон колонн под нагрузкой в значительной мере разгружался, тогда как арматура испытывала высокие сжимающие напряжения. При опорожнении емкостей арматура удлинялась и разрывала бетон колонн.

Близкая к описанной картина наблюдалась и при исследовании деформаций обычных и предварительно напряженных балок из легкого железобетона под длительной нагрузкой [2]. На рис. 1 показано напряженное состояние сечения предварительно напряженной балки до загрузки внешней длительно действующей нагрузкой и после разгрузки через 2,5 года. В результате

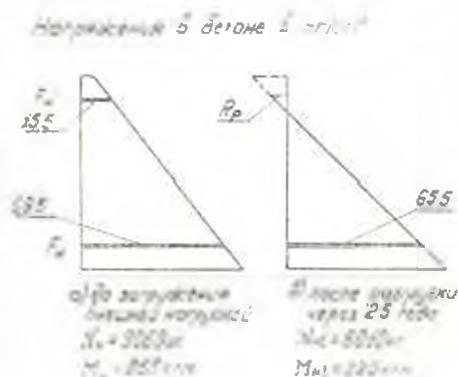


Рис. 1.

результате ползучести и усадки бетона сжатой зоны предварительные напряжения в арматуре F_0 были практически погашены, в связи с чем

усилие обжатия бетона уменьшилось, но изгибающий момент его относительно центра тяжести сечения увеличился. При разгрузке балок, находившихся длительное время под нагрузкой в бетоне сжатой зоны, возникли трещины.

Таким образом, в железобетонных конструкциях в процессе эксплуатации трещины могут возникнуть в зонах, работающих под нагрузкой на сжатие. В связи с этим увеличивается деформативность конструкций, создается возможность коррозии арматуры и т. д. Учитывая сказанное, при проектировании сжатых, сжато-изогнутых и изгибаемых железобетонных элементов, работающих в условиях указанных режимов загрузки, следует при необходимости произвести проверку трещиностойкости.

Рассмотрим условие трещиностойкости центрально сжатого железобетонного элемента, армированного в общем случае обычной и предварительно напряженной арматурой. Оценку напряженно-деформированного состояния элемента производим методами теории старения [3]. Условие трещиностойкости в общем виде можно записать в виде

$$P_s - P_n \leq P_b, \quad (1)$$

где P_s — усилие в ненапрягаемой арматуре;

P_n — усилие в предварительно напряженной арматуре;

P_b — усилие в бетонном сечении.

Раскрывая (1), получим

$$[\sigma_{sa} + \sigma_s(t)] \mu - [\sigma_{oa} - \sigma_{oa}(t)] \mu_n \leq R_t + \sigma_{б. пост.}, \quad (2)$$

Здесь

$$\sigma_{sa} = \sigma_{sa} - \varepsilon_p E_a + n_s \sigma_{б. пост.}, \quad (3)$$

где σ_{sa} — напряжения в арматуре F_a к моменту загрузки элемента внешней длительно действующей нагрузкой. Сюда входят напряжения от ползучести бетона под влиянием усилия предварительного напряжения и напряжения от полной усадки бетона;

$\varepsilon_p E_a$ — приращения напряжений в F_a при предельных деформациях растяжения в бетоне;

$n_s \sigma_{б. пост.}$ — напряжения в F_n от постоянной части длительно действующей внешней нагрузки;

$\sigma_s(t)$ — приращение напряжений в арматуре F_a во времени под влиянием эксплуатационной нагрузки, которое равно:

$$\sigma_s(t) = \sigma_{б.} \left(C \frac{\Phi}{\mu_s} + n_s \Phi \right). \quad (4)$$

Здесь $\sigma_{б.}$ — полные напряжения в бетоне после загрузки элемента длительно действующей эксплуатационной нагрузкой;

$\Phi = 1 - e^{-\mu t}$ — табулированная функция, определяемая по [3] в соответствии с геометрическими характеристиками сечения и физико-механическими свойствами бетона

$$\mu_s = \mu_n + C \mu, \quad \mu_n = \frac{F_n}{F_b}, \quad \mu = \frac{F_s}{F_b}, \quad C = \frac{n_s}{n_n}.$$

Первый член выражения в скобке в формуле (4) учитывает увеличение напряжений в арматуре F_a от ползучести бетона, второй — от изменения величины упругого обжатия бетона во времени.

Аналогичным образом можно получить выражение в скобке в формуле (2) для предварительно напряженной арматуры $F_{пн}$. Здесь будем иметь:

$$\sigma_{пн} = \sigma_{пн} + \epsilon_p E_n - \mu_p \sigma_{сж, пост} \quad (5)$$

$$\sigma_{пн}(t) = \sigma_{пн} \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} + \mu_p \Phi \right) \quad (6)$$

$\sigma_{сж, пост}$ — сжимающие напряжения в бетоне от постоянной части длительно действующей нагрузки.

В выражениях (2) — (6) увеличение модуля упругости бетона во времени не учтено. Отсчет времени для предварительно напряженных элементов ведется со дня обжатия бетона, для обычных элементов — со дня загрузки их внешней нагрузкой.

В случае, если аналогичная задача ставится для сжато-изогнутых или изгибаемых конструкций, принцип построения расчетных формул остается таким же. Следует проанализировать изменение напряжений в обычной и предварительно напряженной арматуре во времени и с учетом полученных величин усилий и моментов обжатия, а также характера изменения внешней нагрузки проверить трещиностойкость конструкции [1]. В заключение отметим, что указанные здесь факторы, влияющие на трещиностойкость железобетонных конструкций, будут более ярко проявляться в элементах из легких бетонов ввиду их относительно повышенной деформативности и сниженной прочности на растяжение.

АНСМ

Поступило 15.XII.1966.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаврилов А. А. Некоторые механические свойства бетона, существенно важные для строительной механики железобетонных конструкций. Труды НИИЖБ, вып. 4, 1959.
2. Ноникян С. Г. Исследование деформаций изгибаемых элементов из высокопрочных легких бетонов, армированных стержневой арматурой повышенной прочности. Научные сообщения АНСМ под ред. проф. В. В. Пинаджяна, вып. 8, 1966.
3. Удницкий И. И., Чжан-Чжун-Яо, Гольманов А. Б. Расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов.
4. Дмитриев С. А., Колатуров Б. А. Расчет предварительно напряженных конструкций, 1964.

М. Г. АРАКЕЛЯН

ДИНАМИКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА НА СФЕРИЧЕСКОМ ПОДШИПНИКЕ С ВОЗДУШНОЙ СМАЗКОЙ

В статье рассматривается метод определения динамических параметров испытательного стенда на сферическом подшипнике с воздушной смазкой. Стенд предназначен для моделирования вращения спутника вокруг центра масс. Чувствительность стенда к внешним моментам обеспечивается применением сферического подшипника с воздушной смазкой. Эти подшипники [1] имеют весьма малые моменты трения и трогания и обеспечивают три степени свободы по вращению. Задача решена для случая, когда система вращается вокруг одной вертикальной оси.

Для измерения угловой скорости вращения платформы был применен оптический фотоэлектронный метод [2]. На вращающейся платформе А (рис. 1) были сделаны прорезы В на одинаковых друг от друга расстояниях. Над платформой устанавливался источник света S.

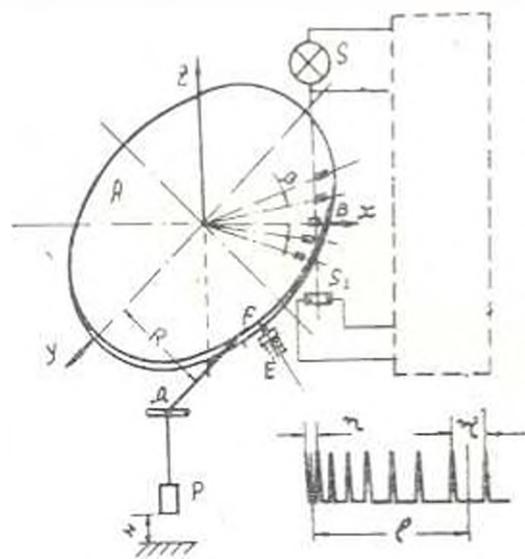


Рис. 1.

При вращении платформы свет через прорезы попадал на фотосопротивление типа ФС—К1. Последующая электронная схема передавала эти импульсы на автоматический регистратор типа 11380 с записью на ленту.

Если обозначить число прорезей на диске через N , то для мгновенного значения угловой скорости вращения будем иметь:

$$\omega = \frac{2\pi v_0}{N} \frac{1}{\tau} \text{ сек}^{-1}, \quad (1)$$

где τ — длина прохождения диаграммной ленты от одного импульса до следующего в мм, а v_0 — скорость перемещения ленты в мм/сек.

Если изменение угловой скорости $\omega = \omega_0 + \epsilon t$ происходит в течение малого промежутка t , то для среднего значения углового ускорения будем иметь:

$$\epsilon^2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{t}, \quad (2)$$

или принимая обозначения рис. 1,

$$\varepsilon^2 = \frac{2\pi V_0^2}{N} \frac{\eta - \eta^2}{\eta \eta^2 L} \text{ сек}^{-2}. \quad (3)$$

Для определения момента инерции и момента трения системы А (рис. 1) относительно его оси вращения используется комплект эталонных грузов. В точке В через неподвижную ось подвешивается груз Р. При помощи фиксатора Е вся система А устанавливается так, чтобы прибор получил импульс засвета и линия (нить) С была тангенциальна к окружности вращения. При освобождении системы от фиксатора, под действием веса Р и момента трения платформа начинает вращаться вначале равномерно ускоренно, до падения груза на пол, а далее под действием только момента трения платформа будет вращаться равномерно замедленно.

Уравнения моментов относительно оси zz до падения груза на пол будут:

$$\left(I + \frac{P}{g} R \right) \varepsilon = PR - M_{тр}, \quad (4)$$

$$I \varepsilon^2 = - M_{тр}.$$

Имеем систему двух уравнений (4) с тремя неизвестными: ε , I и $M_{тр}$.

При заданной высоте H и равноускоренном вращении, когда начальная скорость равна нулю:

$$a = \frac{V^2}{2H}.$$

Тогда с учетом (1), имея в виду, что $a = \varepsilon R$, $v = \omega R$, получим

$$\varepsilon = \frac{2\pi V_0^2 R}{HN^2} \cdot \frac{1}{\eta^2}. \quad (5)$$

Из системы уравнений (4) и (5) получим:

$$I = \frac{PR(g - R\varepsilon)}{g(\varepsilon - \varepsilon^2)}, \quad (6)$$

$$M_{тр} = \frac{\varepsilon^2 PR(g - R\varepsilon)}{g(g^2 - \varepsilon^2)}. \quad (7)$$

В табл. 1 даются результаты измерения величин погрешности измерения, полученные на стендах трех размеров конструкции автора.

Таблица 1

Вес стенда кг	p	H	R	η	η^2	l	I	M _{тр}	Погреш- ность из- мерения, %
1	2	3				4	5	6	

Диаметр подшипника 35,03. мм N = 30.

4,2	53,17	2,5	282,5	1,85	2,25	252,5	98·10 ²	0,15	3,43
6,6	53,17	10	282,5	1,15	1,55	283,4	135·10 ²	0,53	5,42
9,1	53,17	10	282,5	1,60	2,25	159,7	271·10 ²	1,47	3,31

Продолж. табл. 1

1	2	3			4	5	6		
Диаметр подшипника 90,20 мм, $\Lambda' = 30$.									
57,5	78,0	20	282,5	1,60	1,70	95,9	80,10 ³	1,44	4,31
67,4	78,08	20	282,5	2,50	2,65	132,3	197,10 ³	1,58	2,75
70,4	78,08	20	282,5	3,20	3,45	214,7	323,10 ³	1,61	2,31
Диаметр подшипника 210,00 мм, $\Lambda' = 30$.									
455	102,60	40	497,5	9,30	9,40	235,3	84,10 ³	1,28	0,75
532	102,60	40	197,5	9,80	9,90	269,1	9,10 ³	1,68	0,72
585	102,60	40	197,5	11,50	11,80	350,4	110,10 ³	1,84	0,57

Как видно из таблицы, достоверность результата измерения повышается с увеличением интервала τ .

ИРФЭ АН АрмССР

[Поступило 31.III.1965.]

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бабаева Н. Ф. и др. Детали и элементы гидроскопических приборов. Судпромгиз, 1962.
2. Утямышев Р. И. Техника измерения скоростей вращения. Госэнергоиздат, 1961.

А. М. ГАСПАРЯН, Р. М. МИРЗАХАНИЯ

ПНЕВМОТРАНСПОРТ КРУПНОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Пусть в колонку с сетчатым дном засыпана навеска G зернистого материала, образующего рыхлый, неподвижный слой высотой h_0 , концентрацией φ_0 . Если снизу в колонку внести поток воды, то при соответствующей скорости потока слой подвергнется псевдооживлению и расширению до высоты H . Если частицы материала достаточно монодисперсны, то каждой данной скорости v воды будет соответствовать определенная высота H и концентрации φ' псевдооживленного слоя. Таким образом можно создать взвесь (слой) частиц с любой концентрацией, начиная от φ_0 до нуля. В этом случае слой взвеси по всей высоте H имеет практически одинаковую концентрацию, то есть, как принято говорить, имеет место равномерное псевдооживление. Псевдооживление слоя водой широко известно и описано в литературе.

Если же тот же слой частиц подвергать псевдооживлению газом, то псевдооживленный слой получается неравномерным. На рис. 1 приведены фотоснимки псевдооживленных воздухом слоев: а) свинцовых шариков (размер частиц $d = 1,22$ мм, плотность $\rho = 11$ г/см³), б) кварцевого песка ($d = 0,175$ мм, $\rho = 2,64$) и в) алюмосиликатных сфер

Продолж. табл. 1

1	2	3			4	5	6		
Диаметр подшипника 90,20 мм, $\Lambda' = 30$.									
57,5	78,04	20	282,5	1,60	1,70	95,9	80,10 ³	1,44	4,31
67,4	78,08	20	282,5	2,50	2,65	132,3	197,10 ³	1,58	2,75
70,4	78,08	20	282,5	3,20	3,45	214,7	323,10 ³	1,61	2,31
Диаметр подшипника 210,00 мм, $\Lambda' = 30$.									
455	102,60	40	497,5	9,30	9,40	235,3	84,10 ³	1,28	0,75
532	102,60	40	197,5	9,80	9,90	269,1	95,10 ³	1,68	0,72
585	102,60	40	197,5	11,50	11,80	350,4	110,10 ³	1,84	0,57

Как видно из таблицы, достоверность результата измерения повышается с увеличением интервала τ .

ИРФЭ АН АрмССР

[Поступило 31.III.1965.]

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бабаева Н. Ф. и др. Детали и элементы гидроскопических приборов. Судпромгиз, 1962.
2. Утямышев Р. И. Техника измерения скоростей вращения. Госэнергоиздат, 1961.

А. М. ГАСПАРЯН, Р. М. МИРЗАХАНИЯ

ПНЕВМОТРАНСПОРТ КРУПНОЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Пусть в колонку с сетчатым дном засыпана навеска G зернистого материала, образующего рыхлый, неподвижный слой высотой h_0 , концентрацией φ_0 . Если снизу в колонку внести поток воды, то при соответствующей скорости потока слой подвергнется псевдооживлению и расширению до высоты H . Если частицы материала достаточно монодисперсны, то каждой данной скорости v воды будет соответствовать определенная высота H и концентрации φ' псевдооживленного слоя. Таким образом можно создать взвесь (слой) частиц с любой концентрацией, начиная от φ_0 до нуля. В этом случае слой взвеси по всей высоте H имеет практически одинаковую концентрацию, то есть, как принято говорить, имеет место равномерное псевдооживление. Псевдооживление слоя водой широко известно и описано в литературе.

Если же тот же слой частиц подвергать псевдооживлению газом, то псевдооживленный слой получается неравномерным. На рис. 1 приведены фотоснимки псевдооживленных воздухом слоев: а) свинцовых шариков (размер частиц $d = 1,22$ мм, плотность $\rho = 11$ г/см³), б) кварцевого песка ($d = 0,175$ мм, $\rho = 2,64$) и в) алюмосиликатных сфер

($\delta = 2,45$, $r = 1,26$). Как видно из снимков, неравномерность псевдооживленного слоя заключается в том, что он состоит из отдельных цилиндрических сгустков (темные участки) материала — из „поршней“, разделенных цилиндрами воздуха — „пузырями“. Это явление, названное „поршневым режимом“ псевдооживления широко известно, однако еще не объяснено. Не известен также ответ на вопрос, возможно ли вообще получение равномерно-псевдооживленного слоя воздухом? В настоящем сообщении сделана попытка разъяснить эти и некоторые другие вопросы, связанные с теорией псевдооживленного воздухом слоя.

1. Концентрации материала φ_0 в „поршнях“ нами определялись двумя способами. Первый из них заключался в снятии фотографий, наподобие приведенных на рис. 1. На таком фотоснимке можно с определенной точностью определить общую высоту всех „поршней“ и, следовательно, занятый ими общий объем. Зная вес и плотность загруженного в колонку материала, легко подсчитать среднюю концентрацию φ_0 в поршнях. При помощи таких снимков, сделанных при различных скоростях оживляющего воздуха, находились φ_0 для ряда материалов.

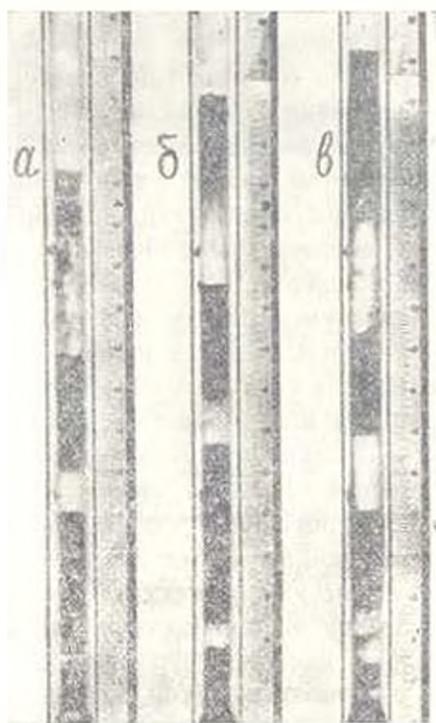


Рис. 1.

Второй способ заключался в следующем: в колонке ставились два пробковых крана, изготовленных из органического стекла, имеющих круглый проход с диаметром, равным диаметру трубы и соединенных между собой рычагами так, что они точно одновременно закрывались и открывались. В открытом состоянии их отверстия точно совпадали с внутренним проходом колонки. Расстояние между осями кранов 188 мм. Подвергнув материал псевдооживлению, следили за движением „поршней“, и когда один из них заполнял все пространство между кранами, быстро его отсекали закрытием кранов. Зная вес отсеченного материала из „поршня“ и объем между кранами, определяли φ_0 . Одновременно с замерами φ_0 , описанными выше способами производились замеры φ_1 , как это было описано ранее в [1]. Результаты проведенных опытов показали, что концентрация φ_0 материала в „поршнях“ практически равна концентрации φ_0 рыхлого слоя. Иначе говоря, рыхлый неподвижный слой материала воздухом оживляется без ощутимого изменения концентрации, или пористости.

или объема слоя: псевдооживленный воздухом слой в отличие от псевдооживленного водой слоя имеет постоянную концентрацию φ_0 , не зависящую (до определенного предела) от скорости сжижающего воздуха.

2. Если слой материала более 1 м, то после псевдооживления всего слоя образуются несколько поршней и пузырьков, как это видно на рис. 1. Поршни все время двигаются вверх, так как под каждым из них имеет место непрерывное накопление избытка воздуха, который не в состоянии пройти через вышерасположенный поршень. Одновременно с движением вверх и, по всей вероятности, по причине этого движения, имеет место непрерывный отрыв отдельных частиц и их групп нижнего торца поршня, которые, падая сквозь пузырь, накапливаются на верхнем торце нижерасположенного поршня. Таким образом, каждый из поршней непрерывно уменьшается снизу и растет сверху, за исключением самого верхнего поршня, который только уменьшается и поэтому через некоторый промежуток времени исчезает. Самый же нижний поршень, который нижним торцом упирается на сетку, только растет и, достигая определенной высоты, порождает новый поршень, идущий вверх. Так, непрерывно происходит исчезновение поршней в верхней части слоя и зарождение новых поршней в нижней части слоя.

Пропускная способность поршней данного слоя по воздуху зависит, во-первых, от среднего давления воздуха в данном поршне и, во-вторых, от скорости движения самого поршня. С уменьшением давления в слое его пропускная способность уменьшается, следовательно, накопление воздуха в пузырьках растет с высотой трубы, т. е. с высотой трубы размер пузырька должен увеличиваться. С другой стороны пропускная способность по воздуху должна расти с ростом скорости подъема поршня, так как перепад давления в поршне зависит также от сил трения поршня об стенку трубы.

Обработка кадров киноъемки псевдооживленного слоя в поршневом режиме и расчеты показали, что размер пузыря по высоте увеличивается. Это значит, что пропускная способность поршней, которая зависит от двух противоположных воздействий, все же с высотой трубы уменьшается. Таким образом, становится очевидным, что возникновение пузырей и, как следствие этого, образование поршней является следствием неодинаковости весовой пропускной способности по воздуху этих поршней.

3. В [2] было отмечено, что с увеличением давления в цилиндрической колонке, разница в весовых пропускных способностях отдельных поршней по воздуху резко уменьшается и существует такое давление, при котором псевдооживление газом становится равномерным. Осуществление равномерного псевдооживления в цилиндрической трубе практически очень трудно из-за необходимости высоких давлений. Следовательно, невозможен также пневмотранспорт ма-

териалов по цилиндрическим трубам без образования поршней и пузырей.

Нами было показано, что существует другой теоретически обоснованный и практически осуществимый способ получения равномерного псевдоожженного слоя воздухом. Для этого нужно обеспечить постоянство весовой пропускной способности слоя по воздуху по всей высоте слоя. Это условие можно выполнить путем непрерывного увеличения поперечного сечения колонки снизу вверх так, чтобы скорость воздуха в каждом сечении была равна скорости стесненного падения частиц в этом же сечении.

Этим методом нами были рассчитаны и изготовлены три следующие колонки:

Для свинцовых сфер $d = 1-1,6$ мм, $Re_0 = 1620$, высотой 90 см, с начальным и конечным диаметрами в 15 и 17 мм.

Для кварцевого песка $d = 0,25-0,35$ мм, $Re = 46,8$, высотой 120 см и диаметрами 32,8 и 34 мм.

Для алюмосиликатных сфер $d = 3-5$ мм, $Re = 3090$, высотой 70 см и диаметрами 102,5 и 104 мм.

Экспериментально было показано, что в этих колонках слои, состоящие из соответствующих частиц, воздухом псевдооживаются сразу по всей высоте и равномерно, при скорости подачи воздуха, соответствующей скорости стесненного падения слоя, имеющей концентрацию φ_0 .

Институт органической химии
АН АрмССР

Поступило 11.XI.1966.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаспарян А. М., Мирзаханян Р. М. Известия АН АрмССР, серия ТН, № 6, 1966.
2. Гаспарян А. М., Мирзаханян Р. М. ДАН АрмССР, т. XLII, № 5, 1966.

Բ ՈՎ Ա Ն Գ Ա Կ ՈՒ Թ Յ ՈՒ Ն

ԷԼԵԿՏՐՈՏԵԿՆԻԿԱ

Վ. Բ. Սանակով, Բ. Ս. Մեկունյան, Սինխրոն մեքենայի հասարակական կանոնադրերի սահմանման մեթոդը	2
Կ. Ա. Կանկունան, Վեկտորային ինքնադրուստով հաճախականության անկանտակառուցիկ կիրառությունը միանշանային աչղարկման կլեմենտները	11

ՂԵՐՄԱՏԵԿՆԻԿԱ

Ս. Ս. Կուսիլյան, Հորիզոնական կայան-կողմադրների ազդեցությունը մասայով հոնորֆուրային պատվարի աստիճանի վրա	16
Ա. Կ. Անուսիյան, Փոփոխականության գործակցի կապը ջրաէլեկտրոկենտր մեքենաբաշխման հոսքի մոդուլի	20
Ս. Մ. Կարաբյան, Բազմաշերտ ֆիլտրող մեխանիզմում ստորերկրյա ջրերի ներհոսման արժեքի շարժը	25

ՀԱՆՎՈՂԱԿԱՆ ՏԵԿՆԻԿԱ

Վ. Վ. Կուզակիչ, Ռ. Ս. Թաֆալյան, Լ. Ռ. Ամյան, Նախնական աչղարկումով քայլային աչղակի կառուցման կառավարման սխեմաների Տեսողությունը իանչարումների առկայությամբ	33
---	----

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՒԹՅՈՒՆ

Պ. Շ. Ալեյախան, Համաստ գեղերի սոցիալառնակները բառերը առմանային անցման մեթոդով	44
Ս. Ն. Իսկիրյան, Էլեկտրոնային կրկարատե ազդեցության հաշվառումը կրկայինատե կենսադրուստների էսթրակառուցյունը գեոմետրիա	47
Ս. Մ. Ասաբեյան, Ազալին յուղումը սֆերիկ առանցիկազգայով փորձարկման տեղի դինամիկան	50
Ա. Ս. Փասպուրյան, Ռ. Մ. Միլզախանյան, Խոշորահատ նյութերի պլեմտրանսպորտ ինտեգրումով	52

СОДЕРЖАНИЕ

Электротехника

- В. Н. Сняков, Д. С. Милковичи.* Метод определения частотных характеристик синхронной машины гармоническим анализом кривой затухания постоянного тока 3
- Г. А. Шагинян.* Элементы расчета одномашинных бесконтактных преобразователей частоты с конденсаторным самовозбуждением ОБПЧ-К 11

Гидротехника

- С. С. Арикелян.* Влияние горизонтальных швов-надрезов на напряженное состояние массивно-конгрессорной плотины 16
- А. Н. Агаронян.* Связь между коэффициентом изменчивости и модулем среднего многолетнего стока взвешенных наносов 20
- С. М. Казарян.* А вопросу неустановившегося притока подземных вод в многослойной фильтрующей среде 25

Вычислительная техника

- В. В. Казикевич, Р. С. Рафасяни, Л. Р. Алиян.* Исследование системы экстремального регулирования шагового типа с предвычислением установившегося значения при наличии помех 35

Научные заметки

- Д. О. Аветисян.* Об одном предельном переходе при решении уравнений линий с распределенными параметрами 44
- С. Г. Ионнисян.* Об учете длительного полдействия нагрузки при оценке трещиностойкости железобетонных конструкций 47
- М. Г. Аракелян.* Динамика испытательного стенда на сферической подшипнике с воздушной смазкой 50
- А. М. Гаспарян, Р. М. Мирзаханян.* Пневмотранспорт крупнозернистых материалов в плотном слое 52

