

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Журнал издается с 1948 г.
Выходит 6 раз в год на русском языке

Կ Ի Բ Ը Յ Ը Չ Ը Ն Կ Ե Լ Ե Զ Ի Կ

Կասյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Աղսնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Աղեբաբեկի Վ. Վ., Զաղաթյան Մ. Ա., Հակոբյան Ռ. Ե.,
Յարգոյան Յու. Լ., Ստակյան Մ. Գ., Տեր-Ազարծ Ի. Ա.,
Փինեղյան Վ. Վ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Պատասխանատու քարտուղար Ստեփանյան Զ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор), Алоян Г. Т. (зам. ответ. редактора),
Алексеевский В. В., Акопян Р. Е., Зайдам М. А.,
Пинадосян В. В. (зам. ответ. редактора), Саркисян Ю. Л.,
Стакин М. Г., Тер-Азирьев Н. А.
Ответственный секретарь Степанян З. К.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А. П. КИРИЛЛОВ, А. В. МИНАСЯН

ВОЗДЕЙСТВИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ТОЛЧКОВ И УДАРОВ
 НА КОМБИНАЦИОННО-СЕЙСМОАДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

Комбинационно-сейсмоадаптивными системами являются сооружения и конструкции, которые оснащены комбинационными адаптивными элементами, часть из которых в процессе сильных землетрясений способна хрупко скачкообразно разрушаться, а другая часть — попрежидаться вследствие развития пластических деформаций [1, 2]. В наружных частях сооружений в качестве комбинированных систем могут быть использованы декоративные панели из бетона, керамзитобетона, пластмассы, эпителлина, а также их сочетания. Для этих целей также можно применять декоративные решетки, диагональные раскосы и растяжки. Панельные элементы, раскосы, жесткие ребра и т. д. могут быть применены в зонах сжатия.

В настоящей работе исследуется поведение комбинационно-сейсмоадаптивных АЭС под действием сейсмических толчков и ударов. При сильных и разрушительных землетрясениях движение почвы совершается прерывно, с резким изменением ускорения и скорости колебания (рис. 1). Землетрясения в г. Скопле (1963), Ташкенте (1966) и др. представляли собой последовательные повторные толчки [1, 2]. Явления толчка и удара связаны с возникновением свободных колебаний.

Пусть при землетрясении с момента времени $p\tau_i = \tau^*$ по τ^* (причем, $\tau_i^* - \tau \rightarrow 0$) действует сейсмический толчок. Уравнение движения в координатах Лагранжа второго рода можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^N (\Phi_{ik}^0)^2 M_i Q_k(\xi_p) + B_k^* Q_k(\xi_p) = - \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i \ddot{Q}_0(\xi_p); \quad (1)$$

$$p\tau < \tau^*, \quad (2)$$

где Φ_{ik}^0 — собственные функции; M_i — точечные массы; $Q_k(\xi_p)$ — собственный вектор; B_k^* — начальная жесткость; p — номер шага по времени; $Q_0(\xi_p)$ — заданная сейсмологическая информация.

Рассмотрим три случая. В первом случае система претерпевает толчок в связи с прерывностью внешних сил, тогда уравнение (1) при $p\tau > \tau^*$ принимает вид:

$$\sum_{i=1}^N (\Phi_{i0}^0)^2 M_i \ddot{Q}_k(\xi_p) + B_{ik}^* Q_k(\xi_p) = - \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [\ddot{Q}_0(\xi_p) + \delta Q_0]. \quad (3)$$

где δQ_0 характеризует прерывность внешних сил, а B_k^* — жесткость после переходного процесса.

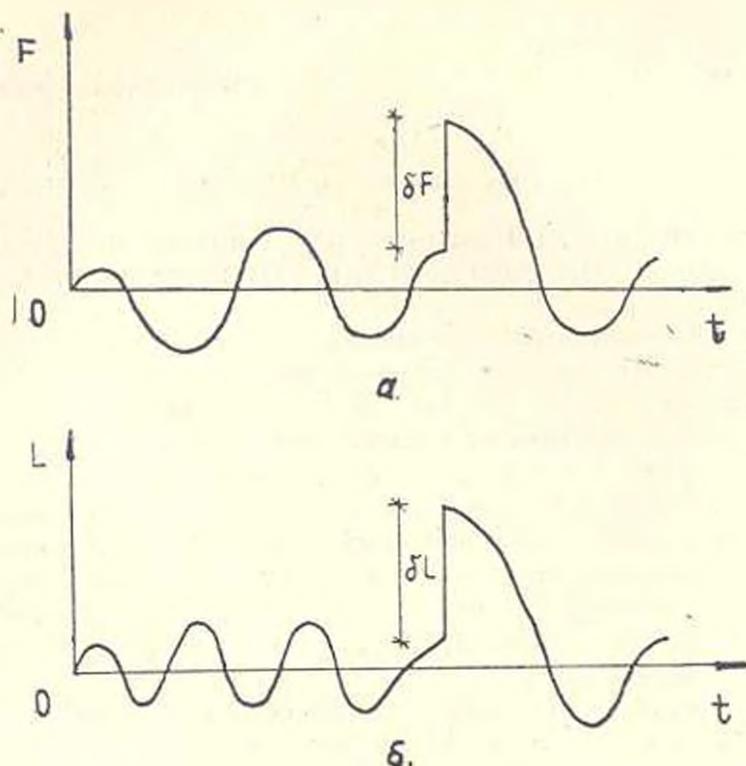


Рис. 1. Образование импульсов: а) случай сейсмического толчка; б) случай сейсмического удара.

Здесь можно выделить 2 процесса колебания:

- а) не включаются пластические шарниры в связях типа j^* ;
- б) включаются пластические шарниры.

В первом случае колебания имеем:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} B_k^*(\xi_p) = B_k^*. \quad (4)$$

Во втором случае толчок вызывает включение пластических шарниров:

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} B_k^*(\xi_p) = B_k^* - \delta B_k.$$

Подставляя соотношение (4) в уравнение (3), получаем следующее выражение, характеризующее колебания системы:

$$\sum_{i=1}^N (\Phi_{ik}^0)^2 M_i \ddot{Q}_k(\xi_p) + (B_k^* - \delta B_k) Q_k(\xi_p) = - \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [\ddot{Q}_0(\xi_p) + \delta Q_0]. \quad (5)$$

Вычитая из уравнения (5) выражение (2), после преобразований получаем:

$$\varepsilon \ddot{Q}_0 = \varepsilon B_k^* Q_k(\xi_p) \left[\sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i \right]^{-1}; \quad (6)$$

$$\varepsilon \ddot{Q}_0 \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i \right) = \varepsilon B_k^* Q_k(\xi_p) = \varepsilon F. \quad (6')$$

Согласно [3] система претерпевает сейсмический удар, если величина импульса значительно возрастает за короткое время действия ускорения. Воспользуемся этим положением и введем иной характер сейсмического удара, для чего построим функцию Лагранжа $L = L(T, C)$, где \bar{T} — кинетическая энергия, \bar{C} — силовая функция.

Аналогично уравнению (4), кинетическую энергию представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{T} = & \sum_{i=1}^N \{0,5 (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k(\tau_i^*)]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \{0,5 \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k(\tau_i^*)]^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Кинетическая энергия без учета импульсного эффекта будет

$$\begin{aligned} \bar{T} = & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Силовая функция не изменяется:

$$\bar{C} = -\frac{1}{2} B_k^* (Q_k(\tau^*))^2. \quad (8')$$

Функцию Лагранжа получаем следующим образом:

$$\begin{aligned} L = L(\bar{T}, \bar{C}) = & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau^*) + \dot{Q}_0(\tau^*)] - \frac{1}{2} B_k^* Q_k^2, \end{aligned} \quad (9)$$

а с учетом импульсного эффекта —

$$\begin{aligned} L_1 = L_1(\bar{T}, \bar{C}) = & \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k]^2 + \\ & + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{ik}^0 M_i [\dot{Q}_k(\tau_i^*) + \dot{Q}_0(\tau_i^*) + \varepsilon \dot{Q}_k]^2 - \frac{1}{2} B_k^* Q_k^2; \end{aligned} \quad (9')$$

$$\delta L = L_1 - L = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\Phi_{ik}^0)^2 M_i [\delta \dot{Q}_k^2 + 4\delta Q_k \dot{Q}_0]. \quad (10)$$

В этом случае: $\delta L = \delta \bar{T}$.

Рассмотрим выключение связей типа i^* за счет сейсмического удара. Предполагается, что движение почвы сопровождается скачком импульсного характера. Воспользуемся принципом получения функции Гамильтона. Приращение кинетической энергии в переходном процессе обусловлено выключением связей типа i^* , что сопровождается мгновенным снабдением потенциальной энергии. Как и в предыдущих случаях, время перераспределения энергии стремится к нулю. Учитывая эти положения, из функции Гамильтона получена вариация жесткости системы в переходном процессе

$$\delta B_k^* = 2[Q_k(\tau^*)]^{-2} \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [Q_k(\tau^*)] \delta Q_0(\tau^*) \quad (11)$$

или

$$\delta Q_0(\tau^*) = \delta B_k^* [Q_k(\tau^*)]^2 \left\{ \sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^0 M_i [Q_k(\tau^*)] \right\}^{-1}. \quad (12)$$

Смещения определяются по формулам:

$$W_i = \sum_{k=1}^N \Phi_{ik} Q_k, \quad (13)$$

где Q_k — значение собственного вектора, которое определяется по данным [4].

Поперечные нагрузки соответственно в начальном и переходном процессах определяются

$$q_i = B_i (W_i - W_{i-1}); \quad q_{in} = B_i^n (W_i - W_{i-1}), \quad (14)$$

где B_i и B_i^n — жесткости в начальном и переходном процессах.

В таблице представлены результаты расчета ядерного реактора на сейсмостойкость при 8-балльных сейсмических ударах. Жесткость, масса и коэффициент сейсмоадаптации имеют следующие значения:

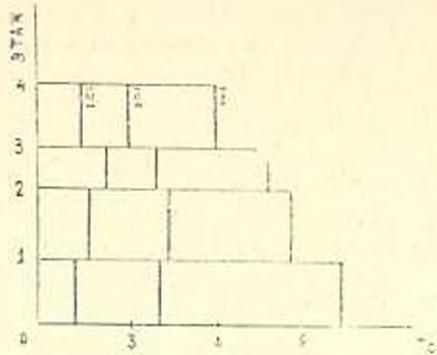
$$B = 6522 \frac{T}{\text{с.м}}; \quad M = 734 \frac{T\text{с}^2}{\text{м}}; \quad K = 1,75.$$

Таблица

Характеристика удара, с.м,с	Упругое смещение, с.м	Максимальное смещение, с.м	Сейсмическая сила (T)		
			без сейсмоадаптации	при разрушении элементов типа i^*	при разрушении элементов типа i^* и j^*
12,52	0,18	0,59	2741	2133	1320
19,07	0,27	1,03	4177	2460	1785

На рис. 2 изображены зависимости изменения сейсмических нагрузок по этажам внутреннего железобетонного каркаса АЭС. Жесткости этажей примерно идентичны, поэтому для каркаса приняты одинаковые характеристики жесткостей: $EI = 0,2 \cdot 10^{12} \text{ Н/см}^2$; $EF = 0,1 \cdot 10^{11} \text{ Н}$; поэтажные массы: $M_1 = 12 \cdot 10^4$; $M_2 = 14 \cdot 10^4$; $M_3 = 11,5 \cdot 10^4$; $M_4 = 18 \cdot 10^4 \text{ Н с}^2 \text{ см}^{-1}$. Сейсмические толчки и удары имеют интенсивность 8 баллов, а затухание системы определялось по данным [2].

Рис. 2. Характер изменения сейсмических сил по этажам внутреннего жб каркаса: I — без сейсмоадаптации; II — при однокомпонентной сейсмоадаптации; III — при комбинационной сейсмоадаптации.



Отношение жесткостей при учете влияния сейсмоадаптивных элементов и без учета их влияния назовем коэффициентом сейсмоадаптации, который в данном примере равен 1,75.

По данным исследования можно сделать следующие выводы. Система претерпевает удар, если:

- а) непрерывное движение почвы приводит к скачкообразному выключению связей, за счет чего в системе происходит перераспределение энергии;
- б) внешнее воздействие (скорость движения) дискретно и сопровождается мгновенным увеличением кинетической энергии. В последнем случае может не произойти выключения связей. Если они выключаются, то это обусловлено доведением системы предельного состояния под действием внешнего воздействия и удара;
- в) выявлено, что сейсмическая реакция комбинационно-сейсмоадаптивных сооружений в 2,5—3 раза меньше сейсмической реакции неадаптивных сооружений и в 1,5—2 раза меньше сейсмической реакции систем, оснащенных адаптивными элементами одного типа.

Ա. Պ. ԿԵՐԵՂՈՎ, Ա. Վ. ԽՆԱՍՅԱՆ

ՆԻԿՐԱՇԱՐԺԱՎԱՆ ԶԱՐԿԱՆՆԵՐԻ ԵՎ ՀՐՈՒՄՆԵՐԻ ԱՉԴՆՑՈՒԹՅՈՒՆԸ
ՆԻԿՐԱՇԱՐԺԻՆ ԶԱՐԳԱՐՎՈՂ ԶՈՒԳԱԿՑՎԱՅ ԶԱՄԱԿԱՐԳՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Ստումնաիրվում է Երկրաշարժին հարմարվող զուգակցված համակարգերի վարքը Երկրաշարժի, հարվածների և հրումների ժամանակ: Դուրս են բեր-

ված բանաձևեր, որոնց միջոցով կարելի է որոշել նշված համակարգերի պարամետրերի փոփոխությունները անցումային ուժի մեծությունում: Ստացված են եզրակացություններ համակարգերում հարվածի և հրման երևույթների առաջացման վերաբերյալ, կախված հարմարվող կապերի բարձրությունից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кириллов А. П., Минасян А. В. Комбинационное повреждение сооружений и конструкций при динамических и сейсмических воздействиях — Строительство и архитектура, 1981, сер. 14, вып. 1, с. 20—23.
2. Минасян А. В. Динамика и эффективность комплексной сейсмоадаптации сооружений в приложении к атомным электростанциям: Автореф. Дис. ... канд. техн. наук.— Тбилиси, 1984.— 22 с.
3. Наларова А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил.— Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1959 — 286 с.
4. Кириллов А. П., Дирбинян С. С., Минасян А. В. Сейсмостойкость упруго-пластических систем с разрывными характеристиками.— ДАН АрмССР, 1982, т. LXXIV, № 2, 85—89

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В. Р. ИСРАЕЛЯН, К. О. КАРАМЯН, Б. Г. ИСРАЕЛЯН

МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА ВСПУЧИВАНИЯ
 ВУЛКАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

В процессе термообработки (вспучивания) вулканическое стекло претерпевает определенные деформации, для количественной оценки которых необходимо располагать исходными аналитическими выражениями, характеризующими пористую структуру вспучивающегося материала. В качестве расчетной можно принять модель пористого тела, состоящего из твердого скелета 1 и шарообразных пор 2 (рис. 1б). Ближе всего к этой модели стоит обсидиан (рис. 1а).

В основу единичного объема ячейки модели принят тетраэдр с ребрами длиной $2r_{1\max}$. До вспучивания центры шарообразных пор с одинаковыми радиусами r_0 расположены на вершинах тетраэдра. В процессе вспучивания происходит приращение радиусов на Δr , до величины $r_{1\max}$. Максимально возможное приращение при этом составляет

$$\Delta r_{1\max} = r_{1\max} - r_0.$$

В стадии максимального вспучивания в скелете тетраэдра возникают и развиваются и другие шарообразные поры. максимальный радиус одной из которых составляет $r_{2\max}$ (рис. 1в), а более мелкие поры могут иметь радиусы $r_{3\max}$, $r_{4\max}$, ..., $r_{n\max}$ с соответствующими количествами Π_3 , Π_4 , ..., Π_n .

Процесс увеличения общей пористости обсидиана Π_t при его вспучивании под воздействием температуры можно свести к увеличению общей пористости единичной тетраэдрической ячейки с суммарным объемом пор при данной температуре, равным V_t , т. е.

$$\Pi_t = \frac{V_t}{V_n} \quad (1)$$

где V_n — общий объем тетраэдра:

$$V_n = 0,9432r_{1\max}^3 \quad (2)$$

Выражение для определения суммарного объема пор в тетраэдре при его вспучивании при температуре t можно представить в следующем виде:

$$V_i = V_{1i} + V_{2i} + V_{3i} + \dots + V_{ni}. \quad (3)$$

где V_{1i} — суммарный объем пор ячейки радиусом $(r_{01} + \Delta r_{1i})$:

$$V_{1i} = \frac{2}{9} \pi (r_{01} + \Delta r_{1i})^3. \quad (4)$$

а

$$V_{2i} = \frac{4}{3} \pi (r_{02} + \Delta r_{2i})^3; \quad V_{3i} = \frac{4}{3} \pi (r_{03} + \Delta r_{3i})^3; \dots \quad (5)$$

$$V_{ni} = \frac{4}{3} \pi (r_{0n} + \Delta r_{ni})^3.$$

Совместно решая (1), (2), (4) и (5), получаем:

$$P_i = \frac{\left[\frac{2}{3} \pi (r_{01} + \Delta r_{1i})^3 + \frac{4}{3} \pi (r_{02} + \Delta r_{2i})^3 + \dots + \frac{4}{3} \pi n (r_{0n} + \Delta r_{ni})^3 \right]}{0,9432 r_{\max}^3}. \quad (6)$$

Согласно (6), при максимальной пористости испучивания

$$(r_{01} + \Delta r_{1i} = r_{1\max}, r_{02} + \Delta r_{2i} = r_{2\max}, \dots, r_{0n} + \Delta r_{ni} = r_{n\max})$$

очевидно, что основная пористость обсидиана образуется увеличением объемов пор радиусом r_{1i} . Действительно,

$$P_{1\max} = \frac{2\pi r_{1\max}^3}{9 \cdot 0,9432 r_{1\max}^3} = 0,7402,$$

а второй член уравнения дает пористость

$$P_{2\max} = \frac{4\pi \left(\frac{1,3 - 1,2}{1,2} \right)^3 r_{1\max}^3}{3 \cdot 0,9432 r_{1\max}^3} = 0,0505.$$

Остальные члены уравнения составляют всего 0,08 доли пористости обсидиана. Поэтому выражение (6) для определения пористости испучивания можно представить только с его первым членом:

$$P_i = \frac{0,7402 (r_{01} + \Delta r_{1i})^3}{r_{1\max}^3}. \quad (7)$$

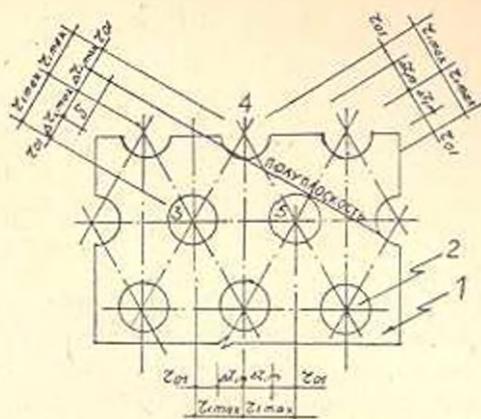
Таким образом, выявление закона изменения пористости обсидиана под воздействием температуры сводится к определению приращения радиусов r_{0i} пор тетраэдра Δr_{1i} , исходя из его напряженно-деформированного состояния.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние при повышении давления пара p , в порах и при наличии внешнего давления p_* .

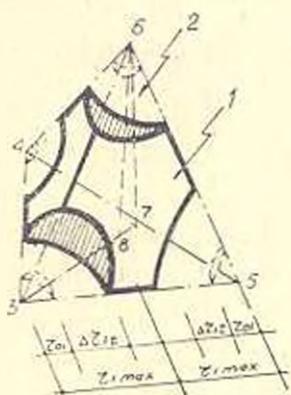
(рис. 1б, г) на матрице модели, разрезанной полуплоскостью, перпендикулярной линии 3—4 и проходящей на расстоянии $r_0 = r_{01} + 2\Delta r_{1,max}$ от центра поры 3.



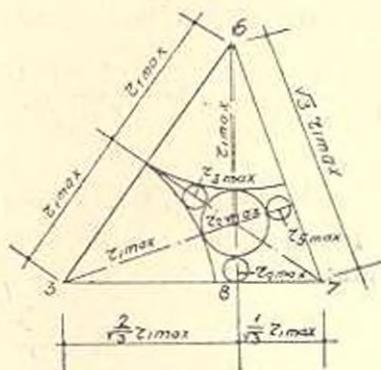
а.



б.



в.



г.

Рис. 1. Модель вулканического стекла с шарообразными порами. а — распределение шарообразных пор в обсидиане (340х); б — распределение пор в матрице модели; в — единичная тетраэдрическая ячейка модели; г — сечение тетраэдрической ячейки по плоскости 3—6—7. 1 — твердый скелет, 2 — шарообразные поры.

Доказано [1], что для плоскости, проходящей по точкам 3—4—6, можно использовать следующие выражения для определения максимальных тангенциальных напряжений и относительных деформаций σ_4 и ϵ_4 при $r = r_{01}$:

$$\begin{aligned} (z)_{r_{\max}} &= \frac{p_t r_1^3 - p_n (r_{01} + \delta)^3}{(r_{01} - \delta)^3 - r_{01}^3} + \frac{(p_t - p_n) (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]} = \\ &= \frac{p_t [2r_{01}^3 + (r_{01} + \delta)^3] - 3p_n (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} z_{r_{\max}} &= \frac{\Delta r_1}{r_1} \cdot \frac{1}{E_t} \left\{ (1 - \nu) \frac{p_t r_{01}^3 - p_n (r_{01} + \delta)^3}{(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3} + \right. \\ &\quad \left. + (1 + \nu) \frac{(p_t - p_n) (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]} \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для количественной оценки процессов вспучивания из представленных выше формул удобно воспользоваться выражением (9), в левую часть которого включена главная величина Δr_1 приращения объема шарообразных пор радиусом r_1 . В правую часть выражения (9) включены величины давления пара p_t в порах, внешнее давление p_n , модуль деформации и коэффициент Пуассона обсидиана.

Там же представлены также основные геометрические параметры единичной ячейки модели — начальный радиус пор r_{01} и расстояние между поверхностями соседних шаров δ_{\max} .

Выражение (9) можно представить в следующем виде:

$$\Delta r_{1t} = \frac{r_0}{E_t} \left\{ (1 - \nu) \frac{p_t r_{01}^3 - p_n (r_{01} + \delta)^3}{(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3} + (1 + \nu) \frac{(p_t - p_n) (r_{01} + \delta)^3}{2 [(r_{01} + \delta)^3 - r_{01}^3]} \right\}. \quad (10)$$

В выражении (10) величина модуля деформации обсидиана связана с температурой t и меняется по следующей эмпирической зависимости:

$$E_t = E_0 \cos^n \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{t_{\max}} \right), \quad (11)$$

где $E_0 = 0,09 \cdot 10^8$ МПа — начальный модуль деформации исходного обсидиана; $t_{\max} = 1200$ С — максимальная температура вспучивания обсидиана; $n = 4$ — константа эксперимента.

Установлено также повышение коэффициента Пуассона ν , в зависимости от роста температуры t :

$$\nu_t = \nu_0 + (\nu_{\max} - \nu_0) \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t}{t_{\max}} \right), \quad (12)$$

где $\nu_0 = 0,25$ — начальное и $\nu_{\max} = 1$ — максимальные значения коэффициента Пуассона, $\nu = 6$ — константа эксперимента.

Принимая в основу процесса вспучивания уравнение пористости II, (7) и подставляя значение величины приращения Δr_{1t} радиусов пор, получаем окончательное выражение для описания процессов вспучивания обсидиана под воздействием температуры.

Рассмотрим процесс вспучивания при отсутствии внешнего давления ($p_{II} = 0$):

$$\Delta r_{II} = \frac{p_I r_{0I}}{E} \left\{ (1 - \nu_I) \frac{r_{0I}^3}{(r_{0I} + \delta)^3 - r_{0I}^3} + (1 + \nu_I) \frac{(r_{0I} + \delta)^3}{2[(r_{0I} + \delta)^3 - r_{0I}^3]} \right\}. \quad (13)$$

Для правильного описания процесса вспучивания удобно выражение (13) представить при соотношении r_{0I} и δ , равном 3, которое обеспечивает начальную (минимальную) пористость обсидиана, равную 0,05. Тогда:

$$\Delta r_{II} = \frac{p_I}{E_I} [0,0159(1 - \nu_I) + 0,508(1 + \nu_I)]. \quad (14)$$

Подставляя значения Δr_{II} из (14) в (7) и учитывая, что при этом $r_{max} = r_{0I} + \frac{\delta}{r} = 2,5$, получаем:

$$P_t = 0,0473 \left\{ 1 + \frac{p_I}{E_I} [0,0159(1 - \nu_I) + 0,508(1 + \nu_I)] \right\}, \quad (15)$$

где число 0,0473 есть начальная (минимальная) пористость обсидиана.

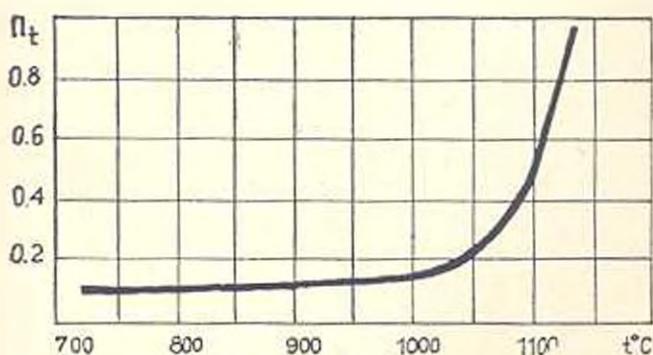


Рис. 2. График вспучиваемости обсидиана при термообработке (при отсутствии внешнего давления).

На рис. 2 приведена кривая изменения пористости обсидиана при вспучивании под воздействием температуры при отсутствии внешнего давления p_{II} . При наличии внешнего давления p_{II} продолжительность процесса порообразования увеличивается, что приводит к повышению коэффициента вспучиваемости.

В результате проведенного исследования разработана модель и получены аналитические связи, характеризующие процесс вспучивания обсидиана. Предлагаемая модель может быть применена и к материалам, обладающим закрытой пористостью и физико-механическими параметрами, близкими к вспучивающимся вулканическим стеклам.

Ա. Վ Ֆ Ո Ֆ Ո Ւ Վ

Հրաքիսածին ապակու փրժան ժամանակ նյութի կրած դեֆորմացիաների քանակական գնահատական տալու համար մշակված է նյութի ծակոսկեն կառուցվածքը բնորոշող մոդելը: Մոդելի համար որպես հիմք ընդունված է օրսիդիանի կառուցվածքը: Ատացված են վերլուծական արտահայտություններ, որոնք բնորոշում են փրժան մեխանիզմը, նյութի կրած փոփոխությունները քերմաստիճանի բարձրացման պայմաններում:

Ցույց է տրված, որ բոլոր այն նյութերը, որոնք ենթարկվում են դուրս բերված բանաձևերին, ընդունակ են փրվել այնպես, ինչպես հրաքիսածին ապակիները (օրսիդիանները):

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Карамян К. О. Температурно-влажностные деформации напряжения ограждающих конструкций из легкого бетона.— Ереван: Айзетп, 1976.— 307 с.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А. С. ШАХКАМЯН

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ
 НЕУРАВНОВЕШЕННОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ

Мостовые неуравновешенные схемы постоянного тока нашли широкое применение в средствах измерения неэлектрических величин [1]. В настоящее время в измерительных преобразователях сигналов термопреобразователей сопротивления (ТС) в основном применяется неуравновешенная мостовая схема с трехпроводным соединением ТС. Соединение ТС с мостовой схемой большей частью осуществляется медным кабелем (при этом согласно ГОСТ 9736—80 и ГОСТ 13384—80 максимальное номинальное сопротивление каждого провода линии связи должно быть 15 Ом), а в плечах мостовой схемы применяются высокостабильные резисторы типа С2-29В, которые имеют малый температурный коэффициент сопротивления (*м. к. с.*). В широком рабочем диапазоне температур окружающей среды нельзя пренебречь температурными изменениями сопротивлений плеч мостовой схемы и сопротивлений проводов линии связи ТС.

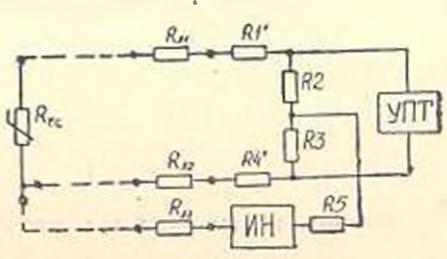


Рис.

Поэтому оценка дополнительной температурной погрешности мостовой схемы представляет актуальную инженерную задачу.

В статье дается методика расчета дополнительной температурной погрешности неуравновешенной мостовой схемы, работающей с ТС (рис.). Вопросы расчета параметров неуравновешенной мостовой схемы рассмотрены в [2]. Выходное напряжение мостовой схемы определяется выражением [1]:

$$U_{\text{вых}} = \frac{(R_2 R_3 - R_1 R_4) U_0}{R_2(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (1)$$

где R_{TC} — сопротивление ТС; U_0 — напряжение питания; $R_1 = R_1' + R_{11}$; $R_2 = R_2' + R_{12}$ — сопротивление проводов линии связи; $R_3 = R_3' + R_{TC} + R_{11}$.

Для упрощения расчетов принимаем следующие обозначения:

$$R_1 = R_{10} (1 + \alpha_1 \theta) + \Delta R; \quad R_2 = n R_{10} (1 + \alpha_2 \theta);$$

$$R_3 = \rho R_{10} (1 + \alpha_3 \theta); \quad R_4 = R_{10} (1 + \alpha_4 \theta); \quad R_5 = \rho R_{10} (1 + \alpha_5 \theta),$$

где $R_{10} = R'_1 + R_{д1} + R_{ТС(норм)}$ — сопротивление первого плеча при нормальной температуре для начальной точки диапазона измерения; θ — отклонение температуры окружающей среды от нормальной; $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ — эквивалентные т. к. с. сопротивлений соответствующих плеч; ΔR — изменение сопротивления ТС в рабочем диапазоне измерения температуры; n, ρ — постоянные для данной схемы коэффициенты.

Тогда для выходного напряжения получаем:

$$U_{вых} = \frac{U_n \epsilon n (1 + \alpha_4 \theta)}{m_1 \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \theta + \frac{m_3}{m_1} \theta^2 \right)}, \quad (3)$$

где $\epsilon = \Delta R / R_{10}$ — относительное изменение сопротивления первого плеча:

$$m_1 = 1 + 2(n + \rho + n\rho) + n^2 + \epsilon(1 + n + \rho);$$

$$m_2 = n^2(\alpha_2 + \alpha_3) + n\rho(\alpha_2 + \alpha_3 + 2\alpha_5) + n(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4) + \rho(\alpha_1 + \alpha_4 + 2\alpha_5) + (\alpha_1 + \alpha_4) + \epsilon(n\alpha_2 + \alpha_4 + \rho\alpha_5);$$

$$m_3 = n(\alpha_1\alpha_3 + \alpha_2\alpha_4 + n\rho\alpha_5) + n\rho\alpha_5(\alpha_2 + \alpha_3) + \rho\alpha_5(\alpha_1 + \alpha_4) + \alpha_1\alpha_4;$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{\epsilon} \left[\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_4 + \alpha_3(1 + \epsilon) \right].$$

Анализ выражения (3) показывает, что температурная погрешность схемы имеет максимальное значение при разных знаках α_1, α_2 и α_3, α_4 . Принимая, что для наихудшего случая т. к. с. плеч имеют максимальные значения, т. е. $\alpha_2 = -\alpha_3 = -\alpha_4 = \alpha_1 = \alpha_m$, получаем:

$$m_1 = \alpha_m [2\rho(n + 1) + (\alpha_1/\alpha_m - 1)(n + \rho + 1) + \epsilon(n + \rho - 1)]; \quad (4)$$

$$m_2 = \alpha_m [\alpha_1(n + \rho - 1) + \alpha_m(n - n^2 - \rho)];$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{\epsilon} \left[\alpha_1 + \alpha_m(3 + \epsilon) \right].$$

При применении резисторов С2-29В получаем: $m_2 \gg m_1$, поэтому для практических расчетов можно принять

$$U_{вых} = \frac{U_n n \epsilon (1 + \alpha_4 \theta)}{m_2 (1 + \alpha_m \theta)}, \quad (5)$$

где $\alpha_m = m_2/m_1$.

Отметим, что *т. к. с.* первого плеча α_1 зависит как от *т. к. с.* резистора R_{10} , так и от изменения сопротивления линии и можно принять

$$\alpha_1 = K_1 \alpha_m, \quad (6)$$

где

$$K_1 = R_{10}/R_{10} + \alpha_m R_{10}/\alpha_m R_{10}; \quad \alpha_m = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C};$$

R_{10} — начальное сопротивление линии.

Анализ выражения (7) показывает, что при ничтожно малом сопротивлении медного соединительного провода линии можно пренебречь вторым членом коэффициента K_1 и для большинства мостовых схем можно принять $K_1 \approx 0,5$. Тогда для температурных коэффициентов α_4 и α_{311} :

$$\alpha_4 = K_4 \alpha_m, \quad \alpha_{311} = K_{311} \alpha_m, \quad (7)$$

где

$$K_4 = 1 + 3,5/\varepsilon;$$

$$K_{311} = \frac{(n+1)(2\rho-0,5) - 0,5\rho + \varepsilon(n+\rho+1)}{1 + 2(n+\rho+n\rho) + n^2 + \varepsilon(n+\rho+1)}.$$

Выходное напряжение мостовой схемы при этом можно представить в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_n n \varepsilon (1 + K_4 \alpha_m \theta)}{m_1 (1 + K_{311} \alpha_m \theta)}. \quad (8)$$

Для большинства мостовых схем $\varepsilon \leq 0,4$ [2], поэтому для минимального значения коэффициента K_4 получаем $K_4 > 9,8$, а для режима равновесия выражение (8) можно представить в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_n \cdot n \cdot 3,5 \alpha_m \theta}{m_1 (1 + K_{311} \alpha_m \theta)}. \quad (9)$$

Расчеты показывают, что при $\theta \leq 30$ C и $|\alpha_m| \leq 75 \cdot 10^{-6}$ 1/°C (для резисторов группы А) для приборов класса точности 0,5 значением K_4 можно пренебречь и тогда:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_n \cdot n \varepsilon}{m_1} (1 + K_4 \alpha_m \theta). \quad (10)$$

Если сопротивлением медного провода соединительной линии нельзя пренебречь, то *т. к. с.* плеч 1 и 4 будут зависеть в основном от *т. к. с.* провода линии связи и с достаточной для практики точностью можно принять $\alpha_1 = \alpha_4 = K_1 |\alpha_m|$. При этом для рассмотренного выше случая получаем $K_1 < 18$, а наибольшее значение m_2 определится при $\alpha_m > 0$ и тогда можно пользоваться следующими выражениями:

$$K_4 = 1 + 2/\varepsilon;$$

$$K_{311} = \frac{2\rho(n+1) + 2K_1(n+\rho+1) + \varepsilon(n+\rho+K_1)}{1 + 2(n+\rho+n\rho) + n^2 + \varepsilon(n+\rho+1)}.$$

Изменением K_{211} от ε практически можно пренебречь и в расчетах можно принять значения K_{211} при $\varepsilon = 0$. Сравнение значений K_1 и K_{211} для этого случая (см. таблицу) показывает, что при минимальном значении $K_1 = 6$ значением K_{211} нельзя пренебречь. Следовательно, выходное значение мостовой схемы можно представить в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{nU_n}{m_1} z (1 + \alpha_{\text{вых}} \theta),$$

где $\alpha_{\text{вых}} \approx (K_1 - K_{211}) \alpha_m$ — температурный коэффициент выходного напряжения.

Приведенную выше методику расчета температурной погрешности можно использовать и для расчета дополнительной погрешности от годовой нестабильности сопротивлений плеч, устанавливая в полученные выражения вместо $\alpha_m \theta$ значения годовой нестабильности сопротивлений.

Таблица

ε	n	K_{211} при $\varepsilon = 0$ и K_1			
		$K_1 = 1$	$K_1 = 3$	$K_1 = 5$	$K_1 = 10$
0	5	0,33	1	1,66	3,33
	10	0,18	0,55	0,91	1,82
	15	0,12	0,38	0,63	1,25
5	5	0,85	1,31	1,77	2,92
	10	0,62	0,9	1,16	1,86
	15	0,49	0,69	0,9	1,4
10	5	0,97	1,38	1,79	2,82
	10	0,76	1,01	1,26	1,87
	15	0,65	0,82	1,01	1,45

Ա. Ս. ՇԱԳՅԱՆՅԱՆ

ՉՇԱՎԱՍԱՐԱԿՆՈՎԱԾ ԿԱՄՐՉԱԿԱՅԻՆ ՍԽԵՄԱՅԻ ՋԵՐՄԱՍԻՏԻՃԱՆԱՅԻՆ
ՍԽԵՄԻ ՀԱՇՎԱՐԿ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. Վ.

ՉՇավասարակնոված կամրչակային սխեման լայն տարածում է ստացել ոչ էլեկտրական մեծությունների չափիչ սարքերում: Ստացված են բանաձևեր սխեմայի ջերմաստիճանային սխալի հաշվարկի համար, երբ կախված չըջապատի ջերմաստիճանից փոխվում են կամրչակի նյութերի դիմադրությունները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Каракошев К. В. Специальные методы электрических измерений. — М.: ГЭИ, 1983. — 344 с.
2. Шахмян А. С., Петросян Р. А., Ходжиян ԿՃ. Մ. Расчет мостового измерительного преобразователя сигнала термометра сопротивления. — Измерительная техника, 1973, № 8, с. 41—43.

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

С. В. ПАМБУХЧЯН, Л. С. КОСТАВЯН, А. Л. БЕГЛЯРН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ
 ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ НА ФАЗОВОМ
 ПРОСТРАНСТВЕ

Пусть объект управления автоматической системы (АС) имеет линейную математическую модель:

$$\dot{X} = AX + BY, \quad \dot{Y} = U. \quad (1)$$

Требуется перевести из данного начального многообразия (X_1^0) в состояние покоя (X_0^0), обеспечивая минимум функционала:

$$I = \lim_{T_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{2T_1} \int_0^{T_1} (X^T \lambda_x X + Y^T \lambda_y Y + U^T \lambda_u U) dt \quad (2)$$

при условии

$$|Y| \leq U_{\text{доп}}, \quad |Y| \leq Y_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где X, Y — векторы (матрицы столбцы) соответственно фазовых координат ($n \times 1$) и управляющих воздействий ($m \times 1$); A, B — матрицы коэффициентов объекта ($n \times n$) и управляющих воздействий ($n \times m$); $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_u$ — заданные диагональные матрицы весовых коэффициентов; T — знак транспонирования. При этом матрица закона управления переменной структуры U известна [1].

В настоящей работе определяются моменты переключения законов управления переменной структуры на фазовом пространстве. Ввиду того, что движение системы в n -мерном фазовом пространстве геометрически построить невозможно, обратимся к простейшим объектам второго и третьего порядка, анализ которых позволяет сделать обобщение о движении системы в n -мерном пространстве.

Сначала рассмотрим объект второго порядка, описывающийся следующей системой уравнений:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Известно [1, 2], что оптимальный закон управления при наличии условий (2) и (3):

$$u = \begin{cases} -x_1 - \sqrt{3} x_2 & \text{при } |x_2| < x_{2\text{дон}}; \\ 0 & \text{при } |x_2| \geq x_{2\text{дон}}. \end{cases} \quad (5)$$

Оптимальная траектория на фазовой плоскости для открытой области в дифференциальной форме описывается следующим уравнением:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = -\frac{x_1}{x_2} - \sqrt{3}. \quad (6)$$

Интегрируя (6), можно убедиться в том, что траектория представляет собой семейство логарифмических спиралей (рис. 1). Уравнение изоклина, которое получается из условия $dx_2/dx_1 = 0$, будет $-x_1 - \sqrt{3}x_2 = 0$.

Учтем ограничения (3) поэтапно. а) $|x_2| = U_{\text{дон}} = 1$. При этом решая (6), получаем фазовую траекторию системы, описываемую уравнением параболы (рис. 1, участок МК):

$$x_1 - \frac{x_2^2}{2} = 0, \quad (7)$$

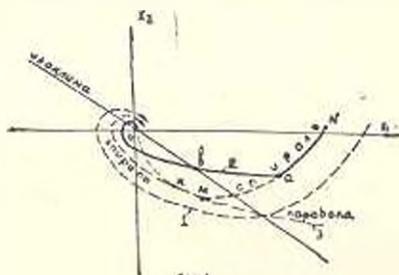


Рис. 1.

б) $|x_2| = x_{2\text{дон}} = \text{const}$. В этом интервале движения отключаются обратные связи системы [1]. При этом из (6) получаем с одной стороны $dx_2/dx_1 = 0$, т. к. $x_2 = \text{const}$,

а с другой $-\frac{x_1}{x_2} - \sqrt{3} = \frac{-x_1 - \sqrt{3}x_2}{x_2} \neq 0$, т. к. координата x_1 меняется непрерывно. Движение системы продолжается на границе области состояний (прямой ab). В момент (точка b на линии изоклина), когда $u = -x_1 - \sqrt{3}x_2 = 0$, снова окажется справедливым (6):

$$\frac{dx_2}{dx_1} = 0, \quad u = -\frac{x_1}{x_2} - \sqrt{3} = 0. \quad (8)$$

Если в этот момент произвести включение обратных связей, то система плавно выйдет на новую спиральную траекторию bo и движение продолжится по ней до состояния покоя ($x_1 = 0, x_2 = 0$).

в) $|x_2| = U_{\text{дон}} = 1$ и $|x_2| = x_{2\text{дон}} = \text{const}$. Движение AC начинается из некоторой начальной точки N по спирали. Если вблизи точки a успеет выполняться условие $|x_2| = 1$, то движение пройдет по параболе до точки a . Начиная с точки a , где $x_2 = x_{2\text{дон}}$, движение продолжается по прямой ab . С точки b снова выходит спираль и остается на ней, пока снова не выполнится условие $|x_2| = 1$, которому соот-

ответствует парабола. Дальнейшее движение системы, где $|x_2| < 1$, $|x_2| < x_{2\text{доп}}$, до точки покоя o происходит по спирали. Таким образом, траектория движения оптимальной АС второго порядка, в самом общем случае состоит из следующих участков: спираль — парабола — прямая — спираль — парабола — спираль. Отметим, что линия изоклины для объекта второго порядка является линией включения обратных связей.

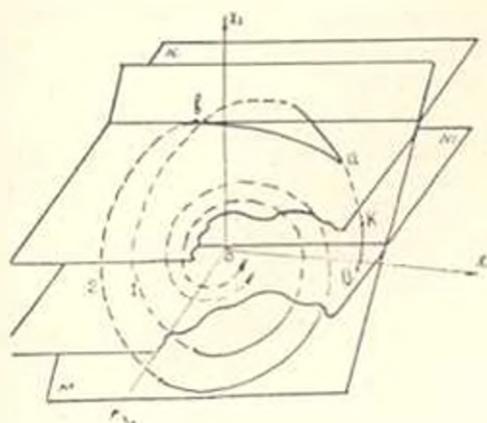


Рис. 2.

Теперь рассмотрим объект третьего порядка, система уравнений которого имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Оптимальным законом управления при условии (2), (3) является

$$u = \begin{cases} -x_1 - 2,42x_2 - 2,42x_3 & \text{при } |x_2| < x_{2\text{доп}}; \\ 0 & \text{при } |x_2| > x_{2\text{доп}}. \end{cases} \quad (10)$$

Определяя значение фазовых координат x_1 , x_2 , x_3 из (9) с учетом (10), убедимся, что движение системы в открытой области происходит по пространственной спирали (кривая 1, рис. 2), экстремуму которого по x_3 соответствует уравнение плоскости M :

$$x_1 + 2,42x_2 + 2,42x_3 = 0. \quad (11)$$

При $|x_2| < x_{2\text{доп}}$ и $|x_2| = U_{\text{доп}} = 1$. Траектория движения o, a будет состоять из двух участков: а) o, k (пространственная спираль); б) ka , определяемый выражением:

$$x_1 = \frac{t^2}{6} + c_1 \frac{t^2}{2} + c_2, \quad x_2 = \frac{t^2}{2} + c_1 t + c_2, \quad x_3 = t + c_1. \quad (12)$$

которое получается решением (9). Здесь и в дальнейшем c_i — постоянные интегрирования.

Как только $x_2 = x_{2\text{доп}}$ (точка a), отключаются обратные связи, движение АС переходит на плоскость N_1 (или N_2) и описывается уравнением параболы

$$x_1 = \frac{x_2^2}{2c_4} + c_5. \quad (13)$$

Из частных дифференциальных уравнений, которые получаются делением третьего уравнения в системе (9) поочередно на первое и второе, и учитывая (10), получаем:

$$\frac{\partial x_2}{\partial x_1} = \frac{\partial x_2}{\partial x_2} = 0, \quad \text{но} \quad \frac{x_1 + 2,42x_2 + 2,42x_2}{x_2} \neq 0, \quad (14)$$

$$\frac{x_1 + 2,42x_2 + 2,42x_2}{x_2} \neq 0.$$

Неравенства в (14) обусловлены тем, что $x_1(0+) \neq x_1(0-)$ и $x_2(0+) \neq x_2(0-)$. В точке b , находящейся одновременно на плоскостях M и N , левая часть неравенства будет равна нулю, следовательно:

$$\frac{\partial x_2}{\partial x_1} = - \frac{x_2 + 2,42x_2 + 2,42x_2}{x_2}, \quad \frac{\partial x_2}{\partial x_2} = - \frac{x_1 + 2,42x_2 + 2,42x_2}{x_2}. \quad (15)$$

В точке b , где снова имеет место (15), должно произойти включение обратных связей. Дальнейшее движение происходит снова по пространственной спирали до состояния покоя (кривая 2), если при этом $|x_2| = u_{\text{доп}} = 1$, то движение в промежуточном интервале описывается выражением (12). Следовательно, плоскость M для объекта третьего порядка является плоскостью включения обратных связей.

Движение системы n -го порядка начинается внутри замкнутой области по сложной фазовой траектории. При выходе любого управляющего воздействия y_i из зону ограничения, движение системы происходит на границе заданной области. Причем, для каждого перехода y_i из зоны насыщения в зону линейности (или наоборот), вид траектории меняется. Движение будет продолжаться на границе области до тех пор, пока не выйдут все y_i из зоны насыщения. Для оптимального движения системы при каждом пересечении фазовой траектории с поверхностями переключения, которые определяются уравнениями $u_i = 0$ ($i = 1, \dots, m$), должно произойти включение обратных связей соответствующего канала управления.

Для нахождения коэффициентов в выражениях закона управления составлена программа решения системы уравнений, описывающих объект 6-го порядка с 2 каналами управления. По составленной программе найден закон управления переменной структуры объекта с математической моделью:

$$\begin{cases}
 x_1 = 0,5(x_2 - x_4) = 0,5x_0; \\
 x_2 = x_1; \\
 x_3 = 0,01x_2 - 0,1x_4 + 0,004x_5 + 0,058y_1 - 0,07y_2; \\
 x_4 = x_2 - 0,17x_1 + 0,01x_5 + 0,028y_1 - 0,18y_2; \\
 x_5 = x_4; \\
 x_6 = 0,11x_2 - 0,2x_4 - 3,12x_5 - 2,66x_6 + 0,5y_1 + 3,02y_2; \\
 y_1 = u_1; \\
 y_2 = r_2.
 \end{cases} \quad (15)$$

а) В открытой области:

$$\begin{cases}
 y_1 = 9,9x_1 - 13,1x_2 - 24,3x_3 + 9,1x_4 - 0,19x_5 - 0,18x_6 - \\
 \quad - 1,57y_1 - 0,248y_2; \\
 y_2 = -47,1x_1 - 24,8x_2 - 12,7x_3 + 20x_4 - 6,6x_5 - \\
 \quad - 0,71x_6 - 0,175y_1 - 3,14y_2;
 \end{cases}$$

б) при выходе y_2 на ограничение $|y_2| = Y_{2\text{ном}}$:

$$\begin{cases}
 y_1 = -56,6x_1 - 64,5x_2 - 54,5x_3 + 46,7x_4 - 3,51x_5 - 0,234x_6 - 2,02y_1; \\
 y_2 = 0;
 \end{cases}$$

в) при выходе y_1 на ограничение $|y_1| = Y_{1\text{ном}}$:

$$\begin{cases}
 y_2 = 48x_1 - 36,4x_2 - 38,3x_3 - 32,5x_4 - 6,9x_5 - 0,66x_6 - 3,22y_1; \\
 y_1 = 0.
 \end{cases}$$

Анализ полученных результатов показывает, что динамические свойства объекта (качество переходных процессов) при переменной структуре АС, когда переключения происходят по разработанной методике, лучше, чем системы постоянной структуры, где не учитываются ограничения управляющих воздействий. Результаты моделирования на аналоговой машине приведены в таблице.

Таблица

Вид структуры	Время переходного процесса			
	x_0	x_2	x_4	x_6
Постоянная структура	39	43,5	44	37
Переменная структура	19	21	26	25

Разработанная методика нахождения моментов переключения переменной структуры можно применять при синтезе АС многофазных

Ս. Վ. ՓԱՐԲԵՐԵՉՅԱՆ, Լ. Ս. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ, Ա. Լ. ԲԵՂԱԲՅԱՆ

**ՆԱԶԱՅԻՆ ՏԱՐԱՅՈՒԹՅՈՒՆՈՒՅՄ ՈՊՏԻՄԱԿ ՀԱՐԺՄԱՆ ԳԵՊՔՈՒՄ
ՓՈՒՆԱՆՋԱՏՄԱՆ ԿՈՄԵՆՏՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Ա մ փ ո ֆ ո ռ մ

Ղեկավարող կորորդինատների վրա սահմանափակման պայմաններում, 2-րդ և 3-րդ կարգի օբյեկտների համար ֆադային տարածությունում որոշված ևն փոփոխական կառուցվածքի ղեկավարման օրենքի փոխանջատման մոմենտները: Ստացված արդյունքները ընդհանրացվում են Ո կապուղով ղեկավարվող Ո-րդ կարգի օբյեկտի համար: Ըստ կազմված ծրագրի, Երկու ղեկավարման կապուղով 6-րդ կարգի օբյեկտի համար որոշված է ղեկավարման օրենքը: Ստացված արդյունքները ցույց են տալիս փոփոխական կառուցվածքով համակարգի առավելությունը հաստատունի նկատմամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лукомский Ю. А., Памбучьян С. В. Анализ многоканальной автоматической системы при ограниченных управляющих воздействиях — Изв. вузов. Приборостроение, 1974, т. XVIII, № 1, с. 47—50.
2. Памбучьян С. В. Синтез многоканальной аstatической АС при ограниченных управляющих воздействиях. — В кн.: Межвуз. сб. науч. тр. Автоматика и вычислительная техника, Ереван, 1977, вып. III, с. 166—169.

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

А. М. АГАНОВ, В. Р. МАРТИРОСЯН

АЛГОРИТМ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ,
 ИСКАЖЕННЫХ ЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ С НЕИЗВЕСТНЫМИ
 ПАРАМЕТРАМИ

Вопросу восстановления изображений, искаженных различными системами формирования, посвящена обширная литература. Как известно, процесс формирования изображения в некогерентной линейной изопланатической системе описывается уравнением свертки (для простоты приводится одномерный случай):

$$g(x) = \int_{Y_1}^{Y_2} f(y)h(x-y)dy + n(x), \quad |x| \leq X, \quad (1)$$

где $g(\cdot)$, $f(\cdot)$, $n(\cdot)$ — интенсивности соответственно зарегистрированного изображения (записи), объекта и шума регистратора (ошибок измерения). В оптических задачах $h(\cdot)$ называется функцией рассеяния точки (ФРТ) системы формирования изображения и представляет собой распределение интенсивности изображения при наличии на входе единичного точечного источника. Задача восстановления объекта сводится в этом случае к решению уравнения (1) относительно функции $f(\cdot)$ при наличии шума в записи и относится к классу некорректно поставленных.

В настоящей работе рассматривается случай, когда вид ФРТ неизвестен, но имеется некоторая минимальная информация другого характера, и предлагается новый алгоритм получения оценки объекта в условиях большой априорной неопределенности.

Одним из дискретных аналогов уравнения (1) является векторно-матричное уравнение [1]:

$$\bar{g} = [h] \bar{f} + \bar{n}, \quad (2)$$

где \bar{g} , \bar{f} , \bar{n} — m -мерные векторы соответственно записи, объекта и шума, а $[h]$ — квадратная матрица отсчетов ФРТ размерности $m \times m$.

В условиях, когда $[h]$ неизвестна, нельзя утверждать о строгом решении или даже квазирешении уравнения (2), поэтому сформулируем задачу следующим образом. Пусть $\bar{\delta}$ обозначает m -мерный вектор искажения: $\bar{\delta} = \bar{f} - \bar{g}$ и задан квадрат его длины («энергия» искажения):

$$E^2 = \|\hat{\delta}\|^2 = \sum_{i=1}^m \hat{\delta}_i^2 = \sum_{i=1}^m (f_i - g_i)^2. \quad (3)$$

Найдем такую оценку вектора искажения $\hat{\delta}$, которая обеспечит быструю оценку объекта

$$\hat{f} = \bar{g} + \hat{g}, \quad (4)$$

существенно более близкую к \hat{f} , чем вектор записи \bar{g} .

Предварительно рассмотрим следующую математическую задачу [2]. Сегмент единичной длины делится случайным образом на m частей так, что величины отдельных отрезков, перечисленных слева направо, суть u_1, \dots, u_m , причем

$$\sum_{i=1}^m u_i = 1, \quad 0 < u_i < 1, \quad i = 1, \dots, m.$$

Определим теперь величины v_i . Пусть они подчинены условиям

$$\sum_{i=1}^m v_i = 1, \quad 0 < v_1 < \dots < v_m.$$

Требуется определить $\langle v_i \rangle$, т. е. среднее по множеству случайных делений значение длины i -ого по малости отрезка. Решение данной задачи, аналитически полученное Нейманом, дается формулой

$$\langle v_i \rangle = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^i \frac{1}{m-1-j}, \quad i = 1, \dots, m. \quad (5)$$

Сопоставим вышеприведенную задачу деления сегмента на m частей с задачей «деления» квадрата длины вектора искажения на квадраты его компонент, суммой которых он является, и зададимся следующей задачей. Будут ли упорядоченные по возрастанию величины z_1, z_2, \dots, z_m , наименьшее из $\hat{\delta}_i^2/E^2, z_2$ — второе по малости; \dots, z_m — наибольшее из $\hat{\delta}_i^2/E^2$, иметь распределение, близкое к (5)? Численный эксперимент подтверждает это; в частности, 64-точечный объект, показанный на рис. 1, сворачивался с ФРТ

$$h(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

при $\sigma = 2$ (в шагах дискретности) и к результату добавлялся случайный гауссовский шум со стандартным отклонением 0,1. На рис. 2 видно хорошее согласие распределений величин $\langle v_i \rangle$ и z_i , как функций номера i . Будем считать, что искомая оценка вектора искажения $\hat{\delta}$ принадлежит множеству из $m!$ векторов длины E , нормированных и упорядоченных по возрастанию, квадраты компонент которых определяются формулой (5). Теперь открытым остается лишь вопрос о том, какой из этих векторов выбрать в качестве оценки вектора искажения, т. е.

какой координате m -мерного пространства приписать i -ую по малости компоненту искажения.

В работе [3] показано, что для узких ФПТ, у которых $m_1 = \int xh(x) dx \approx 0$ (что типично для оптических систем), величина искажения в каждой точке, в первом приближении, пропорциональна второй производной записи в данной точке с обратным знаком. В первом приближении можно считать, что из $|\Delta^{(2)} g_i| > |\Delta^{(2)} g_j|$ следует $|\delta_i| > |\delta_j|$, где $\Delta^{(2)} g = g_{i-1} - 2g_i + g_{i+1}$, причем, это выполняется тем точнее, чем уже функция $h(\cdot)$ и ниже уровень шума $n(\cdot)$.

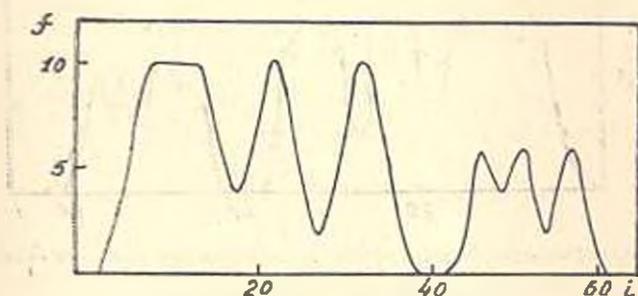


Рис. 1. Исходный 64-точечный объект.

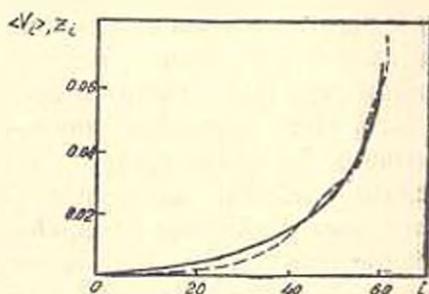


Рис. 2. Распределение величин v_i (сплошная кривая) и z_i (пунктирная кривая).

Обозначив через $R(\Delta^{(2)} g_i)$ порядковый номер $|\Delta^{(2)} g_i|$ в упорядоченной по возрастанию последовательности модулей вторых разностей записи, возьмем оценку квадрата i -ой координаты искажения, равной

$$\bar{\delta}_i^2 = E^2 \langle v_{R(\Delta^{(2)} g_i)} \rangle. \quad (7)$$

Тогда с учетом (4), (5), (7) оценка i -ой координаты объекта будет:

$$f_i = g_i - \text{sign}(\Delta^{(2)} g_i) E \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^{R(\Delta^{(2)} g_i)} \frac{1}{m+1-j} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Формула (8) полностью описывает предлагаемый метод улучшения качества размытых изображений. На рис. 3 показана зашумленная свертка объекта (рис. 1) с ФРТ, определяемой формулой (6) (пунктирная кривая) и оценка объекта (сплошная кривая), полученная по формуле (8) при значении $E^2 = 75,2$. При этом наблюдается улучшение сигнала, «угаданы» главные пиковые значения, хотя имеются умеренные шумовые выбросы и произошло ложное расщепление последнего пика.

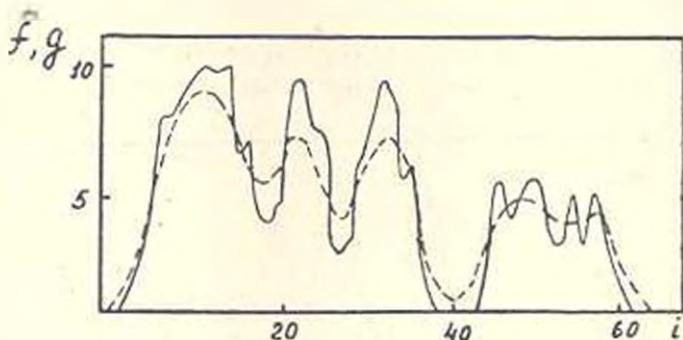


Рис. 3. Зарегистрированное изображение g (пунктирная кривая) и полученная оценка объекта f (сплошная кривая).

Квадрат нормы ошибки восстановления равен: $E_i^2 = \sum_i (f_i - \hat{f}_i)^2 = 37$, в то время, как при восстановлении того же сигнала одним из применяемых итерационных алгоритмов: $E_i \approx 25-30$, причем, разрешение малых правых пиков неудовлетворительно. Таким образом, используемое в других алгоритмах априорное знание ФРТ не дает во многих случаях существенного выигрыша в точности оценки объекта, ввиду некорректности исходной задачи и наличия шума в данных. Предлагаемый метод обладает быстройдействием, поскольку все операции производятся в пространственной области (без использования преобразования Фурье), а вычисление суммы в (8) может осуществляться рекурсивным способом, например, от больших значений к меньшим.

Из формулы (8) видно, что единственной априорной информацией является число E . Если оно неизвестно и не может быть как-либо оценено в конкретной ситуации, можно предложить следующие варианты применения метода. С ростом числа E будет наблюдаться практически монотонное увеличение среднего контраста оценки:

$$c_{\hat{f}} = \left(\sum_{i=1}^m (\hat{f}_i - \bar{\hat{f}}_0)^2 \right)^{1/2} \bar{\hat{f}}_0, \quad (9)$$

где $\bar{\hat{f}}_0 = \sum_{i=1}^m \hat{f}_i$, и если средний контраст объекта известен, нетрудно организовать поиск требуемого значения E из условия $c_{\hat{f}} = c_f$.

В случае, если неизвестен контраст объекта, но известна его принадлежность к некоторому классу характерных объектов (например,

человеческих лиц), то поиск удовлетворительной оценки можно осуществить в интерактивном режиме. Для этого нужно вычислить оценку вектора искажения $\hat{\delta}_e$ при достаточно малом $E = E_0$, а затем организовать простейшую итерационную процедуру вида

$$\hat{f}^{(k+1)} = \hat{f}^{(k)} + \hat{\delta}_0, \quad \hat{f}^{(0)} = \bar{g},$$

где оценка, получаемая на каждом шаге $\hat{f}^{(k)}$, визуализируется, а останов производится по усмотрению пользователя.

Ա. Մ. ԱՐԱՆՈՎ, Վ. Բ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ԱՆՀԱՅՏ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻՐ ՈՒՆԵՑՈՂ ԳՄԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՎ
ԱՂԱՎԱՂՎԱԾ ՊԱՏԿԻՐՆԵՐԻ ՈՐԱԿԻ ԼԱՎԱՑՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ռ մ

Առաջարկված է աղավաղված պատկերների որակի լավացման ալգորիթմորը չի պահանջում աղավաղող ֆունկցիայի իմպլիցիտնր։ Որպես նախնական տեղեկություն սզտագործված է աղավաղման լրիվ կներգիան կամ ճշմարիտ պատկերի միջին կոնտրաստը։ Բերված է ալգորիթմի կիրառման արդյունքը միաչափ դեպքի համար։

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Andrews H. C., Hunt B. R. Digital image restoration. — New Jersey: Prentice — Hall, INC., Englewood Cliffs, 1977. — 376p.
2. Прикладная комбинаторная математика /Под ред. Э. Беккенбаха.— М.: Мир. 1968.— 360 с.
3. Мартиросян В. Р. Итерационный алгоритм восстановления изображения с переменной шириной коридора оценки.— Автометрия. 1984, № 5, с. 87—92.

Г. С. ГАБАЯН, С. Ш. ПУРИДЖАНИЦ, В. С. САРКԻՍԻԱՆ

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ И КАНАЛОВ В ПОЛУОГРАНИЧЕННУЮ ОБЛАСТЬ

Фильтрация из водохранилищ и каналов вызывает подпор уровня грунтовых вод, возникает угроза засоления и заболачивания обширных территорий. Это в свою очередь приводит в негодность огромные площади сельскохозяйственных угодий, вызывает осадки фундаментов сооружений, способствует возникновению оползневых явлений и т. д. Поэтому для правильного прогноза и эффективной борьбы с подобными явлениями, необходимо постоянное совершенствование теории и методов фильтрационных расчетов.

Работа ирригационных водохранилищ носит сезонный характер. Учет его особенно важен для водохранилищ, построенных в горной местности. Задача нестационарной фильтрации рассмотрена в [1] при мгновенном и линейном законах подъема и сработки уровня воды, а в [2, 3] учитывается влияние на процесс фильтрации последовательных циклов наполнений и сработок водохранилища.

Рассмотрим задачу фильтрации воды из водохранилища в полуограниченную область при колебании уровня воды в нем по закону:

$$h(\tau) = A_1 + A_2 \cos(2\pi\tau); \quad A_1 = 0,5(h_1 + h_2); \quad A_2 = 0,5(h_2 - h_1). \quad (1)$$

Здесь h_1 и h_2 — соответственно максимальная и минимальная глубины воды в водохранилище (канале); $\tau = t/T$; T — период одного полного цикла колебания уровня воды в водохранилище; t — время.

Зависимость (1) получена на основе анализа большого количества данных натуральных наблюдений за уровнями водохранилищ.

Для прогноза режима фильтрации используем уравнение

$$\partial h / \partial \tau = a T \partial^2 h / \partial x^2, \quad (2)$$

где h — глубина грунтового потока на расстоянии x от уреза воды в водохранилище в момент времени τ ; a — коэффициент фильтрации.

Краевые условия поставленной задачи запишутся в виде

$$h(x, 0) = h_0, \quad h(0, \tau) = A_1 + A_2 \cos(2\pi\tau) = \varphi(\tau), \quad h(\infty, \tau) = \infty, \quad (3)$$

где h_0 — уровень грунтовых вод при $\tau = 0$.

Для решения задачи представим $h(x, \tau)$ в виде суммы двух функций $h(x, \tau) = v(x, \tau) + w(x, \tau)$, где функции $v(x, \tau)$ и $w(x, \tau)$ удовлетворяют уравнениям

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = aT \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = aT \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5)$$

при крайних условиях

$$v(x, 0) = h_0, \quad v(0, \tau) = 0, \quad (6)$$

$$w(x, 0) = 0, \quad w(0, \tau) = \varphi(\tau). \quad (7)$$

Решения уравнений (4) и (5) при крайних условиях (6) и (7) запишутся в виде:

$$v(x, \tau) = h_0 \Phi(i); \quad (8)$$

$$w(x, \tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\bar{x}} \varphi\left(\tau - \frac{x^2}{4aT\mu^2}\right) \exp(-\mu^2) d\mu. \quad (9)$$

где

$$i = \frac{x}{2\sqrt{a\tau T}}; \quad \Phi(i) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^i \exp(-z^2) dz.$$

Подставляя (3) в (9), после преобразований получаем выражение для $h(x, \tau)$:

$$h(x, \tau) = A_1 + (h_0 - A_1) \Phi(i) + A_2 \cos(2\pi\tau - \bar{x}) \exp(-\bar{x}) - \psi, \quad (10)$$

где

$$\psi = \frac{2A_2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\bar{x}} \cos\left[2\pi\left(\tau - \frac{x^2}{4\pi\mu^2}\right)\right] \exp(-\mu^2) d\mu; \quad \bar{x} = x \sqrt{\frac{\tau}{aT}}.$$

После нескольких лет эксплуатации водохранилища (канала) в заданном режиме процесс фильтрации воды из него принимает квазистационарный характер, т. е. в дальнейшем начальное условие задачи не влияет на процесс фильтрации. При этом уровень грунтовых вод определится из уравнения (10) при $\lambda \rightarrow 0$

$$h(x, \tau) = A_1 + A_2 \cos(2\pi\tau - \bar{x}) \exp(-\bar{x}). \quad (11)$$

На рис. 1 приведены кривые депрессионной поверхности грунтовых вод в различные моменты времени. Как видно из (11), депрессионная поверхность грунтовых вод от воздействия водохранилища меняется по закону затухающих колебаний и имеет многоэкстремальный характер.

Экстремумы определяются путем приравнивания к нулю первой производной по x выражения (11)

$$x^* = \sqrt{\pi a T} (2\tau + n - 0,25), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

где x^* — удаление точки экстремума от уреза воды в водохранилище (канале) в момент времени τ .

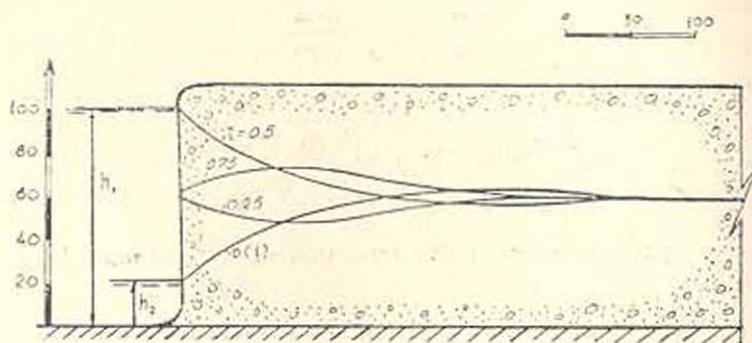


Рис. 1. Кривые депрессионной поверхности грунтовых вод в различные моменты времени.

Из (12) видно, что x^* для любого момента времени τ зависит от фильтрационных характеристик грунта, периода колебания уровня воды в водохранилище и не зависит от амплитуды этих колебаний. Расстояние между последующими экстремумами постоянное и равно $\Delta x^* = \sqrt{\pi a T}$. В связи с затуханием процесса колебания уровня грунтовых вод для практических целей вызывает интерес лишь изучение первых экстремумов. Фильтрационный расход $q(x, \tau)$ в любом сечении, согласно закону Дарси, определяется из выражения.

$$q(\bar{x}, \tau) = A_2 k \sqrt{\frac{2\pi}{aT}} \cos\left(\frac{\pi}{4} + 2\pi\tau - \bar{x}\right) \exp(-\bar{x}) \times \\ \times [A_1 + A_2 \cos(2\pi\tau - \bar{x})] \exp(-\bar{x}), \quad (13)$$

где k — коэффициент фильтрации.

Фильтрационный расход на урезе водохранилища (канала) определяется из (13) при $x = 0$:

$$q(0, \tau) = A_2 k \sqrt{\frac{2\pi}{aT}} \cos\left(\frac{\pi}{4} + 2\pi\tau\right) [A_1 + A_2 \cos(2\pi\tau)]. \quad (14)$$

Из (14) следует, что фильтрационный расход $q(0, \tau) = 0$ при

$$\tau = (1 + 4n)/8, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Экстремальные значения расходов определяются решением следующего трансцендентного уравнения

$$A_1 \sin\left(\frac{\pi}{4} + 2\pi\tau\right) + A_2 \sin\left(\frac{\pi}{4} + 4\pi\tau\right) = 0, \quad (15)$$

Объем воды в любой промежуток времени $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ рассчитывается интегрированием выражения (14) по τ в пределах от τ_1 до τ_2 :

$$W = kA_2^2 \sqrt{\frac{T}{2a\pi}} \left| \frac{A_1}{A_2} \left[\sin\left(\frac{\pi}{4} + 2\pi\tau_2\right) - \sin\left(\frac{\pi}{4} + 2\pi\tau_1\right) \right] + 0.25 \left[\sin\left(\frac{\pi}{4} + 4\pi\tau_2\right) - \sin\left(\frac{\pi}{4} + 4\pi\tau_1\right) \right] + \frac{\pi}{\sqrt{2}} (\tau_2 - \tau_1) \right| \quad (16)$$

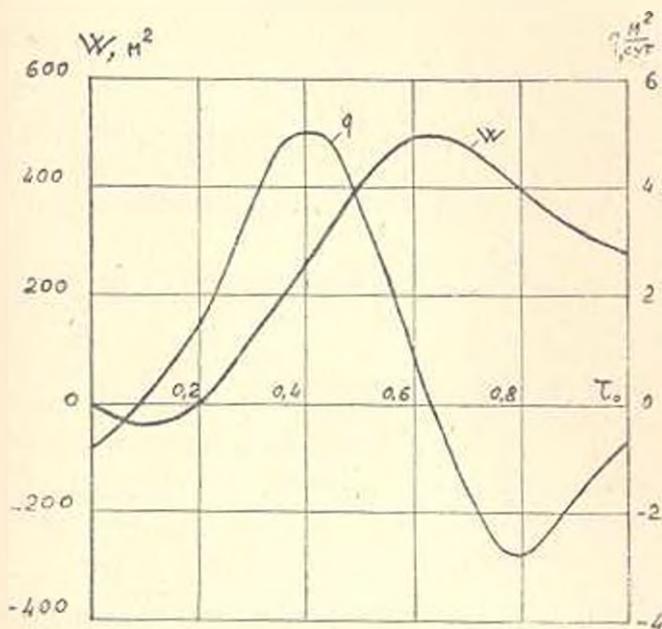


Рис. 2. Зависимости фильтрационного расхода и объема стока от времени.

На рис. 2 приведена кривая зависимости фильтрационных расходов от времени τ . В начальный период наблюдается инфильтрация воды из борта в водохранилище и этот процесс продолжается до $\tau = 1/8$. Грунтовый сток за этот период определяется из (17)

$$w = kA_2^2 \sqrt{\frac{T}{2a\pi}} \left| \left(\frac{2 - \sqrt{2}}{2} \right) \frac{A_1}{A_2} + \frac{\pi}{8\sqrt{2}} \right| \quad (17)$$

В дальнейшем происходит фильтрация воды из водохранилища в борт. При этом фильтрационный расход, достигая некоторого наибольшего значения, определяемого из (16), уменьшается и приравнивается к нулю при $\tau = 5/8$.

Объем воды фильтрующей из водохранилища в указанный период составит

$$W_1 = kA_2^2 \sqrt{\frac{T}{2a\pi}} \left| \frac{\sqrt{2}\pi}{4} - 2 \frac{A_1}{A_2} \right| \quad (18)$$

В дальнейшем снова наблюдается инфильтрация воды в водохранилище, объем которой равен

$$W_2 = kA_2^2 \sqrt{\frac{T}{2a\pi}} \left[-\frac{3\pi}{8} + \left(\frac{2 + \sqrt{2}}{2} \right) \frac{A_1}{A_2} \right] \quad (19)$$

Как видно из рис. 2, вокруг чаши водохранилища образуется некоторая зона «подземного водохранилища», которая в период времени $1/8 < \tau < 5/8$ принимает некоторый объем воды, в дальнейшем частично возвращающейся в водохранилище. Объем «подземного водохранилища» будет равен

$$W_3 = W_1 + W_2 = kA_2^2 \sqrt{\frac{T}{2a\pi}} \left(2 \frac{A_1}{A_2} + \frac{1 - \sqrt{2}}{4} \pi \right) \quad (20)$$

Потери воды из водохранилища в течение одного цикла колебания уровня будут

$$W_{\text{пот}} = W_{\text{от}} - W_3 = \frac{kA_1^2}{2} \sqrt{\frac{\pi T}{a}} \quad (21)$$

Полученные зависимости позволяют определить гидродинамические характеристики пластов при наличии натуральных исследований за балансом воды в водохранилище.

ЕрПН им. К. Маркса

26. III 1981

Գ. Ս. ՉԻՐԵՅԱՆ, Ս. Ե. ՊԵՐԵՉԱՆՅԱՆ, Վ. Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԿԻՍԱՍԱԶԻՄԱՆԱՓԱԿ ԵՐՐՈՒՅԹՈՒՄ ՊԿՍՏՈՒՆԱՑՎԱԾ ՄԻԱՆՑՈՒՄ
ՋՐԱՄԲԱՐՆԵՐԻՑ ԵՎ ՋՐԱՆՅՔՆԵՐԻՑ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Դիտարկվում է կիսասամանափակ տիրույթում շփոթանցված ծծանցման խնդիրը, երբ ջրամբարում ջրի մակարդակի տատանումը տեղի է ունենում կոսինուսի օրենքով: Ստացված են լուծումներ, որոնք ներառություն են տալիս որոշել գրունտային ջրերի մակարդակը ջրամբարի հզոր ռոշակի հեռավորության վրա, ծծանցման հարը ցանկացած մոմենտին, ինչպես նաև գրունտային ջրերի հոսքը դեպի ջրամբար և տարվա ընդհանուր ծծանցման կորուստները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Веригин Н. Н. Режим грунтовых вод при колебании горизонта водохранилища.— Гидротехническое строительство, 1952, № 11, с. 34—37.
2. Саркисян В. С. Гидродинамический метод оценки грунтового стока рек.— В сб. Материалы к совещанию молодых специалистов.— М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1965, с. 79—87.
3. Саркисян В. С., Курянова В. С. Фильтрация из водохранилища (канала) при переменном уровне воды в них и режим береговых водозаборов.— В сб. Труды ВОДГЕО—М.: 1981, с. 41—48.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

А. Г. МИРЗАХАНИЯН, Р. Е. АКОПЯН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ
ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В ранее опубликованных работах [1, 2] описан способ тонкого разделения полидисперсных материалов на любые узкие фракции. Такое разделение может найти широкое применение в обогащительных, стекольных и других производствах. Классификация проводится в пертикальном аппарате переменного сечения, где полидисперсный материал псевдооживается потоком воды. Профиль аппарата рассчитывается из условия постоянства объемной концентрации частиц и их полной сепарации по высоте псевдооживленного слоя [1, 2].

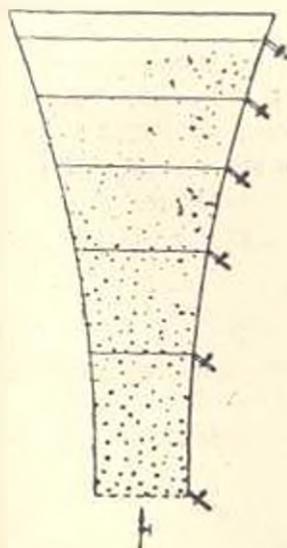


Рис. Схема опытного гидравлического классификатора.

Для установления зависимости степени сепарации от концентрации частиц и их размеров по описанному способу был рассчитан, изготовлен и испытан гидравлический классификатор кварцевого песка с размерами частиц $\delta = 0,1 - 0,4$ м.м. Высота рабочей части классификатора равна 74,9 см, диаметры нижней и верхней частей — 3 см и 9,48 см (рис.). В классификаторе разделялись кварцевые пески в рассчитанных количествах различных фракций так, чтобы получить различные объемные концентрации частиц, постоянные по всей высоте псевдооживленного слоя.

Осуществлено разделение песка при следующих значениях концентрации: $\varphi = 0,1; 0,15; 0,25; 0,3$ и $0,4$ объемные доли.

На боковой поверхности классификатора, в сечениях, соответствующих крайним значениям ситовых фракций (0,4, 0,315, 0,25, 0,2 и 0,16 мм) имеются штуцера для отбора частиц на анализ. Фракция отбиралась последовательно, начиная сверху, при постоянном расходе воды. Ситовой анализ каждой снятой фракции показывает ее состав. Результаты ана-

лиза, показывающие степень сепарации в массовых долях, приведены в таблице.

Таблица

№	φ	d_c , м.м	Y_1	Y_{12}	№	φ	d_c , м.м	Y_1	Y_{12}
1	0,1	0,13	0,853	0,845	16	0,3	0,13	0,941	0,935
2		0,18	0,856	0,852	17		0,18	0,949	0,942
3		0,225	0,859	0,859	18		0,225	0,954	0,949
4		0,2825	0,875	0,867	19		0,2825	0,961	0,957
5		0,3575	0,89	0,878	20		0,3575	0,971	0,969
6	0,15	0,13	0,884	0,9	21	0,4	0,13	0,85	0,852
7		0,18	0,892	0,907	22		0,18	0,86	0,859
8		0,225	0,907	0,913	23		0,225	0,868	0,866
9		0,2825	0,914	0,922	24		0,2825	0,87	0,874
10		0,3575	0,92	0,932	25		0,3575	0,873	0,885
11	0,25	0,13	0,943	0,944					
12		0,18	0,957	0,952					
13		0,225	0,961	0,958					
14		0,2825	0,972	0,967					
15		0,3575	0,973	0,978					

Цель настоящей работы — получить математическую модель процесса сепарации твердых частиц кварцевого песка при их жидкостном псевдооживлении, т. е. путем обработки экспериментальных данных найти зависимость степени сепарации Y от концентрации частиц в слое φ и их средних размеров d_c .

Экспериментальные данные показывают, что при данном постоянном значении концентрации φ степень сепарации Y возрастает с увеличением диаметра частиц d_c , а при заданном значении диаметра d_c степень сепарации Y имеет максимальное значение в зависимости от концентрации φ . Исходя из этого, зависимость степени сепарации Y от концентрации φ и диаметра частиц d_c представляем в виде уравнения регрессии типа

$$Y = b_0 + b_1\varphi + b_2d_c + b_{11}\varphi^2 \quad (1)$$

где b_0, b_1, b_2, b_{11} — коэффициенты регрессии, определяемые методом наименьших квадратов.

По приведенным в [3] методам составляются нормальные уравнения:

$$\begin{aligned} b_0N + b_1\sum\varphi + b_2\sum d_c + b_{11}\sum\varphi^2 &= \sum Y; \\ b_0\sum\varphi + b_1\sum\varphi^2 + b_2\sum\varphi d_c + b_{11}\sum\varphi^3 &= \sum Y\varphi; \\ b_0\sum d_c + b_1\sum\varphi d_c + b_2\sum d_c^2 + b_{11}\sum\varphi^2 d_c &= \sum Yd_c; \\ b_0\sum\varphi^2 + b_1\sum\varphi^3 + b_2\sum\varphi^2 d_c + b_{11}\sum\varphi^4 &= \sum Y\varphi^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Входящие в систему (2) величины, вычисляемые по данным таблицы, равны: $N = 25$ (число опытов); $\sum\varphi = 6$; $\sum d_c = 5,87$; $\sum Y = 22,762$; $\sum\varphi^2 = 1,725$; $\sum\varphi d_c = 1,41$; $\sum\varphi^3 = 0,555$; $\sum Y\varphi = 8,116$; $\sum d_c^2 = 1,538$; $\sum\varphi^2 d_c = 0,4054$; $\sum Yd_c = 5,372$; $\sum\varphi^4 = 0,1911$; $\sum Y\varphi^2 =$

= 1,567. Подставляя эти величины в систему уравнений (2) и решая последнюю, получаем значения коэффициентов регрессии и, следовательно, вид уравнения (1):

$$Y = 0,6532 + 2,1594\varphi + 0,1441d_c - 4,2735\tau^2. \quad (3)$$

Адекватность полученного уравнения регрессии проверяется по критерию Фишера

$$F = S_y^2/S_{\text{ад}}^2, \quad (4)$$

где S_y^2 — относительная средняя дисперсия; $S_{\text{ад}}^2$ — дисперсия адекватности. Дисперсии S_y^2 и $S_{\text{ад}}^2$ определяются по формулам:

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (Y_j - \bar{Y})^2; \quad (5)$$

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (Y_j - Y_{j,l})^2. \quad (6)$$

В этих формулах Y_j — результат опыта j ($j = 1, 2, \dots, N$); l — число коэффициентов регрессии ($l = 4$); $Y_{j,l}$ — расчетные по уравнению регрессии значения функции в опыте j (приведены в таблице); \bar{Y} — среднее арифметическое от всех опытов Y_j :

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j. \quad (7)$$

Для рассматриваемого случая гидросепарации, рассчитанные по формулам (7), (5) и (6) величины равны: $\bar{Y} = 0,91048$; $S_y^2 = 0,001897$; $S_{\text{ад}}^2 = 0,0000661$; $F = 28,69$.

Табличное значение критерия Фишера F_1 при уровне значимости $P = 0,05$ и числах степени свободы $f_1 = N - 1 = 24$, $f_2 = N - l = 21$ равно $F_1 = 2,07$ [3]. Так как $F > F_1$, уравнение регрессии адекватно описывает рассмотренный процесс гидросепарации.

Приравняв нулю частную производную Y по φ , можем найти то значение φ , при котором функция Y приобретает оптимальное (максимальное) значение

$$\frac{\partial Y}{\partial \varphi} = 2,1594 - 2 \cdot 4,2735\varphi = 0, \quad (6)$$

откуда $\varphi_{\text{опт}} = 0,25$.

ЕрПИ им. К. Маркса

5. VIII. 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Аюбян Р. Е., Мирзаханян А. Г., Мирзаханян Р. М. Псевдооживление твердых частиц жидкостью. — В кн.: Межвуз сб науч. тр. хим. технология, Ереван, 1977, сер. 19, вып. III, с. 114—116.
2. Мирзаханян А. Г. Гидравлический классификатор для разделения полидисперсных материалов. — Инф. лист. АрмНИИТИ, 1980, № 62—80.
3. Бондирь А. Г. Математическое моделирование в химической технологии. — Киев: Вища школа, 1973. — 279 с.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Э. В. КАРСЛЯН, В. Г. АЛЕКСАНДРЯН

ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ
 АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЛАВНЫХ
 ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ И НАПРАВЛЕНИЙ

Рассмотрим соотношения «вход—выход» линейной непрерывной многомерной системы автоматического управления (МСАУ) с постоянными параметрами:

$$y(s) = W(s)r(s), \quad (1)$$

где $y(s)$ и $r(s)$ — m -мерные вектор-столбцы преобразований Лапласа соответственно входных и выходных сигналов отдельных каналов; $W(s)$ — матричная передаточная функция (МПФ), элементы которой являются дробно-рациональными функциями комплексной переменной s . МПФ $W(s)$ при каждом s можно трактовать как матрицу линейного оператора $\bar{W}(s)$, который назовем операторной передаточной функцией (ОПФ).

Известно [1], что любому линейному оператору $\bar{W}(s)$ соответствуют единственный сопряженный оператор $\bar{W}^*(s)$ и эрмитовые операторы $\bar{W}^*(s)\bar{W}(s)$ и $\bar{W}(s)\bar{W}^*(s)$ с ортонормированными системами собственных векторов:

$$\{\bar{v}^{(1)}(s), \bar{v}^{(2)}(s), \dots, \bar{v}^{(m)}(s)\}; \quad (2)$$

$$\{\hat{z}^{(1)}(s), \hat{z}^{(2)}(s), \dots, \hat{z}^{(m)}(s)\}, \quad (3)$$

которые назовем главными входными и выходными направлениями $\bar{W}(s)$. Известно также [2], что любому оператору \bar{W} в m -мерном комплексном пространстве соответствуют комплексные числа

$\{\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_m\}$, такие, что

$$W\bar{v}^{(i)} = \bar{w}_i \hat{z}^{(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

причем, $\sqrt{\bar{w}_i \bar{w}_i}$ — так называемые, сингулярные числа [1].

Разлагая входной и выходной векторы $r(s)$ и $y(s)$ соответственно в главных входных и выходных направлениях, с учетом (4) получаем:

$$y(s) = \sum_{i=1}^m \langle r(s), \bar{v}^{(i)}(s) \rangle \bar{w}_i(s), \quad (5)$$

где $\langle a, b \rangle = b^T a$ — скалярное произведение. Таким образом, линейная МСАУ в главных направлениях ведет себя как одномерная система с передаточной функцией $\bar{w}_i(s)$, называемой i -ой главной передаточной функцией (ГПФ).

Согласно (5), i -ая ГПФ представляет собой отношение координаты выходного вектора $y(s)$ по i -ому главному выходному направлению $\bar{z}^{(i)}(s)$ к координате входного — $r(s)$ по i -ому главному входному направлению $\bar{v}^{(i)}(s)$ [3], т. е.

$$\bar{w}_i(s) = \frac{\langle y(s), \bar{z}^{(i)}(s) \rangle}{\langle r(s), \bar{v}^{(i)}(s) \rangle}, \quad \langle r(s), \bar{v}^{(i)}(s) \rangle \neq 0, \quad \forall i = \overline{1, m}, \quad (6)$$

Обозначим через $\hat{V}(s)$ и $\hat{Z}(s)$ матрицы, составленные из вектор-столбцов главных входных и выходных направлений соответственно, условие (6) можно записать в виде:

$$y(s) = \hat{Z}(s) \text{diag} \{ \bar{w}_i(s) \} \hat{V}^*(s) r(s); \quad (7)$$

$$y(s) = \sum_{i=1}^m \langle r(s), \bar{v}^{(i)}(s) \rangle \bar{w}_i(s) \bar{z}^{(i)}(s), \quad (8)$$

Эти соотношения дают представление о внутренней структуре и поведении линейной МСАУ. На рис. 1 приведена структурная схема, иллюстрирующая в развернутой скалярной форме описание (8).

В качестве примера рассмотрим линейную МСАУ с МПФ:

$$W(s) = \begin{bmatrix} \frac{s+1}{s(s+2)} & \frac{2}{s(s+2)} \\ \frac{1}{s(s+2)} & \frac{s}{s(s+2)} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В соответствии с (7) ее можно представить в виде:

$$W(s) = \begin{bmatrix} \sqrt{0,5} & -\sqrt{0,5} \\ \sqrt{0,5} & \sqrt{0,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s+2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{0,5} & \sqrt{0,5} \\ -\sqrt{0,5} & \sqrt{0,5} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Соответствующая структурная схема МСАУ дана на рис. 2.

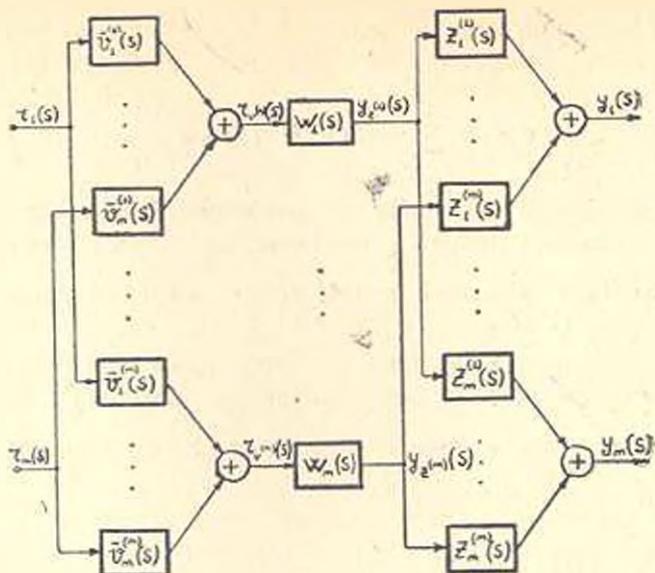


Рис. 1. Развернутая скалярная структурная схема линейной МСАУ.

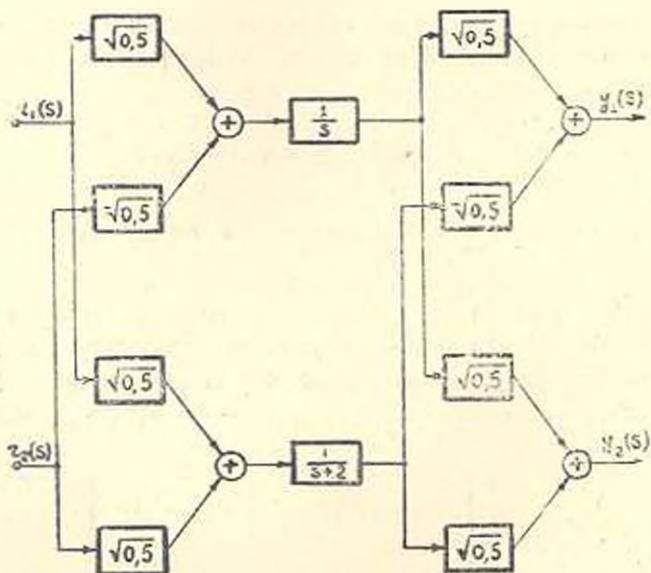


Рис. 2. Развернутая скалярная структурная схема линейной двумерной САУ.

Если на входы МСАУ подать гармонические воздействия с одинаковой частотой ω (все полюсы ПФФ $W(s)$ лежат в левой полуплоскости), то в установившемся режиме выходы отдельных каналов будут гармоническими сигналами той же частоты. Соответствующие соотношения в этом случае могут быть получены заменой $s = j\omega$ в (1)–(8), причем, (6) будет определять уже частотную ПФФ, которую можно представить в виде:

$$\widehat{w}_i(j\omega) = A_i(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)}; \quad (11)$$

$$A_i(\omega) = |\widehat{w}_i(j\omega)| = \{\widehat{w}_i(j\omega) \overline{\widehat{w}_i(j\omega)}\}^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

$$\varphi_i(\omega) = \arctg \{ \operatorname{Im} \widehat{w}_i(j\omega) / \operatorname{Re} \widehat{w}_i(j\omega) \} + k\pi, \quad k = 0, \pm 1, \dots, \quad (13)$$

где $A_i(\omega)$ — i -ая главная амплитудно-частотная функция, ее график — амплитудно-частотная характеристика (ГАЧХ), а аргумент $\varphi_i(\omega)$ — i -ая главная фаза-частотная функция, ее график — главная фазочастотная характеристика (ГФЧХ).

Введем понятие обобщенного усиления МПФ:

$$A_r(\omega) = \frac{\|y_1(j\omega)\|_E}{\|r_1(j\omega)\|_E} = \left[\frac{\langle y(j\omega), y(j\omega) \rangle}{\langle r(j\omega), r(j\omega) \rangle} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (14)$$

$$A_r(\omega) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n A_i^2(\omega) r_{\alpha(i)}^2(\omega)}{\sum_{i=1}^n r_{\alpha(i)}^2(\omega)} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Обобщенное усиление зависит от направления входного вектора $r(j\omega)$. В частности, когда $r(j\omega)$ направлен вдоль i -го главного входного направления, имеет место равенство

$$A_r(\omega) = A_i(\omega). \quad (16)$$

Введя обозначения

$$A_{\max}(\omega) = \max A_i(\omega), \quad A_{\min}(\omega) = \min A_i(\omega), \quad (17)$$

можно записать, что

$$A_{\min}(\omega) \leq A_r(\omega) \leq A_{\max}(\omega). \quad (18)$$

Аппарат главных передаточных функций применяется для исследования устойчивости, чувствительности и ослабления возмущений линейных МСАУ при наличии ошибок и неопределенностей в исходной информации, что характерно для реальных технических систем. Так, например, в [4] показано, что $A_{\min}(\omega)$ матрицы возвратной разности линейной МСАУ являются надежной мерой ее грубости.

Для определения ГАЧХ $A_i(\omega)$ используются разработанные к настоящему времени надежные пакеты прикладных программ для вычисления сингулярных чисел комплексных матриц [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Воеводин В. В. Линейная алгебра.—М.: Наука, 1974.—336 с.
2. Amir-Moeg Ali R. On Pseudo-proper values of a linear transformation. — *Monatsh. Math.*, 1968, 72, №1 p. 6—8.
3. Карсаян Э. В. Главные передаточные функции и главные направления линейных многомерных систем автоматического управления.—В сб.: Межвуз. тематич. сб. научн. тр. по автомат. вычисл. техн. и электронике.—Ереван: Изд-во ЕрПИИ, 1984, с. 24—28.
4. Солдатовичи В. В., Карсаян Э. В. О грубости линейных многомерных систем автоматического управления.—В кн.: Создание и внедрение автоматизированных и автоматических систем управления непрерывными и дискретно-непрерывными технологическими процессами. Тез. докл. X Всесоюз. научн. тех. совещ., Алма-Ата: 1983, с. 196—197.
5. Dongarra J. J., Moler C. B., Bunoh J. R., Stewart G. W. LINPACK User's Guide. — Philadelphia: SIAM, 1979. — p. 368.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Յ. Վ. ԿՏԵՎՈՍՅԱՆ, Ն. Խ. ԱԿՕՅԱՆ, Ա. Ե. ՏԱՐԿԻՍՅԱՆ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ ГЛАВНОЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОСИ
 ИНЕРЦИИ ПРИ БАЛАНСИРОВКЕ ЦЕНТРИРОВАНИЕМ

В НПО «Армстанок» разработан способ балансировки жестких роторов центрированием, заключающийся в том, что измеряют колебания опор ротора под действием сил дисбаланса в двух плоскостях, затем прикладывают к вращающемуся ротору механические колебания, чтобы амплитуды и фазы колебаний опор были такими же, как при измерении, одновременно обрабатываются центровые отверстия, а главная центральная ось инерции ротора (ГЦОИ) остается при этом принудительно неподвижной [1]. После этого осуществляется обработка цапф на новых центровых отверстиях.

Поскольку ротор жесткий, балансировка производится на технологической частоте вращения на его цапфах. Производительность при данном способе балансировки составляет 100—110 деталей в час при кратности снижения начального дисбаланса $\frac{D_{\text{исп.}}}{D_{\text{исп.}}} = 10—15$. Таким образом, точность балансировки при данном способе определяется величиной начального дисбаланса. Для роторов турбокомпрессоров с начальными дисбалансами 20 гсм точность балансировки составляет 1,5—2 гсм.

Кратность снижения начального дисбаланса, определяющая точность балансировки, зависит от точности измерения колебаний опор ротора под действием сил дисбаланса.

Известно, что комплексные амплитуды колебаний опор балансируемого ротора с двумя подвижными опорами (рис. 1) определяются следующими выражениями [2]:

$$\bar{A} = \frac{\bar{D}_1}{m} \left(\frac{l_1 h_1}{\rho_s^2} + 1 \right) - \frac{\bar{D}_2}{m} \left(\frac{l_2 h_2}{\rho_s^2} - 1 \right); \quad (1)$$

$$\bar{B} = -\frac{\bar{D}_1}{m} \left(\frac{l_2 h_1}{\rho_s^2} - 1 \right) + \frac{\bar{D}_2}{m} \left(\frac{l_2 h_2}{\rho_s^2} + 1 \right), \quad (2)$$

где \bar{D}_1 , \bar{D}_2 — векторы дисбалансов в плоскостях коррекции ротора в и II; m — масса, равная сумме масс ротора m_r и колеблющейся си-

стемы m ; h_1 , h_2 и l_1 , l_2 — расстояния центра масс от соответствующих плоскостей коррекции и измерения; $r_y = \sqrt{\frac{I_y}{m}}$ — радиус инерции ротора с колеблющейся системой.

Обозначив

$$\begin{aligned} \frac{1}{m} \left(\frac{L_1 h_1}{r_y^2} + 1 \right) &= a_{11}, \\ -\frac{1}{m} \left(\frac{L_2 h_1}{r_y^2} - 1 \right) &= a_{21}, \\ -\frac{1}{m} \left(\frac{L_1 h_2}{r_y^2} - 1 \right) &= a_{12}, \\ \frac{1}{m} \left(\frac{L_2 h_2}{r_y^2} + 1 \right) &= a_{22}. \end{aligned}$$

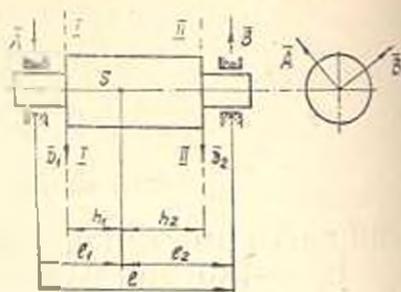


Рис. 1. Расчетная схема балансируемого ротора на подвижных опорах.

выражения (1), (2) можно представить в следующей форме:

$$\bar{A} = a_{11} \bar{D}_1 + a_{12} \bar{D}_2; \quad \bar{B} = a_{21} \bar{D}_1 + a_{22} \bar{D}_2,$$

где a_{ij} — коэффициент передачи от плоскости коррекции j к плоскости измерения i .

При традиционных способах автоматической балансировки, когда балансировка осуществляется путем нанесения или удаления корректирующих масс, с целью определения дисбалансов \bar{D}_1 и \bar{D}_2 , осуществляется разделение плоскостей коррекции, или с помощью цепи разделения плоскостей коррекции (ЦРПК) образуются такие линейные комбинации сигналов \bar{A} и \bar{B} , каждая из которых зависит от дисбаланса только одной из плоскостей коррекции

$$\bar{y}_1 = \bar{A} + \psi_1 \bar{B} = a_1 \bar{D}_1, \quad \bar{y}_2 = \bar{B} + \psi_2 \bar{A} = a_2 \bar{D}_2,$$

где

$$\psi_1 = -\frac{a_{11}}{a_{22}}; \quad \psi_2 = -\frac{a_{21}}{a_{12}}; \quad a_1 = a_{11} - \frac{a_{21} a_{12}}{a_{22}}; \quad a_2 = a_{22} - \frac{a_{21} a_{12}}{a_{11}}.$$

В отличие от традиционных методов при автоматической балансировке центрированием осуществляется совмещение ГЦОИ с осью вращения путем смещения центровых отверстий с оси вращения на ГЦОИ ротора и дальнейшей обработки базовых поверхностей ротора по кругу вновь образованных центровых отверстий. При этом нет необходимости определять дисбалансы \bar{D}_1 и \bar{D}_2 .

Учитывая, что $\bar{D}_1 + \bar{D}_2 = \bar{D}_c$ — главный вектор дисбалансов ротора, $\bar{D}_1 h_1 - \bar{D}_2 h_2 = \bar{M}_c$ — главный момент дисбалансов ротора, выражения (1), (2) можно представить в следующем виде

$$\bar{A} = \frac{\bar{D}_{cr}}{m} + \frac{l_1}{m\rho_{s1}^2} \bar{M}_D = k_{cr} \bar{D}_{cr} + k_{s1} \bar{M}_D; \quad (3)$$

$$\bar{B} = \frac{\bar{D}_{cr}}{m} - \frac{l_2}{m\rho_{s2}^2} \bar{M}_D = k_{c1} \bar{D}_{cr} + k_{s2} \bar{M}_D, \quad (4)$$

где

$$k_{cr} = \frac{1}{m}; \quad k_{s1} = \frac{l_1}{m\rho_{s1}^2}; \quad k_{s2} = -\frac{l_2}{m\rho_{s2}^2}.$$

Из (3) и (4) получим выражения главного вектора и главного момента в зависимости от колебаний опор

$$\bar{D}_{cr} = \frac{\bar{A}k_{s2} - \bar{B}k_{s1}}{k_{cr}(k_{s2} - k_{s1})}, \quad \bar{M}_D = \frac{\bar{A} - \bar{B}}{k_{s1} - k_{s2}},$$

которые можно привести к следующему виду:

$$\bar{D}_{cr} = m \frac{\bar{A}l_2 + \bar{B}l_1}{I}; \quad \bar{M}_D = \frac{m\rho_{s1}^2}{I} (\bar{A} - \bar{B}),$$

где $I = I_1 + I_2$.

Если центр масс свободного ротора совпадает с центром масс системы ротор-колеблющаяся система, то \bar{D}_{cr} и \bar{M}_D для свободного ротора и для системы ротор — колеблющаяся система будут одинаковыми, и колебания свободного ротора можно определить следующим образом:

$$\bar{A}' = k'_{cr} \bar{D}_{cr} + k'_{s1} \bar{M}_D; \quad \bar{B} = k_{c1} \bar{D}_{cr} + k_{s2} \bar{M}_D,$$

где $k'_{cr} = \frac{1}{m_p}$, $k'_{s1} = \frac{l_1}{m_p \rho_{s1}^2}$, $k'_{s2} = -\frac{l_2}{m_p \rho_{s1}^2}$ — коэффициенты передачи свободного ротора; $\rho_{s1} = \sqrt{\frac{I}{m_p}}$ — радиус инерции свободного ротора.

Поскольку для симметричных роторов конструкторскими мерами несложно обеспечить совмещение центра масс системы ротор-колеблющаяся система с центром масс свободного ротора, то для симметричных роторов можно предложить следующую схему определения свободных колебаний (рис. 2а).

Однако при балансировке центрированием консольных роторов выполнение условия совмещения центра масс системы ротор-колеблющаяся система с центром масс свободного ротора трудно реализовать, поэтому в данном случае следует воспользоваться традиционной цепью разделения плоскостей коррекции (ЦРПК), дополнив ее элементами, реализующими выражения колебаний свободного ротора:

$$\bar{A}_{cr} = a'_{11} \bar{D}_1 + a'_{12} \bar{D}_2; \quad \bar{B}_{cr} = a_{21} \bar{D}_2 + a_{22} \bar{D}_1,$$

где a'_{ij} — коэффициент передачи от плоскости коррекции j к плоскости измерения i для свободного ротора.

Таким образом, структурная схема измерения свободных колебаний консольного ротора будет иметь вид, представленный на рис. 2б.

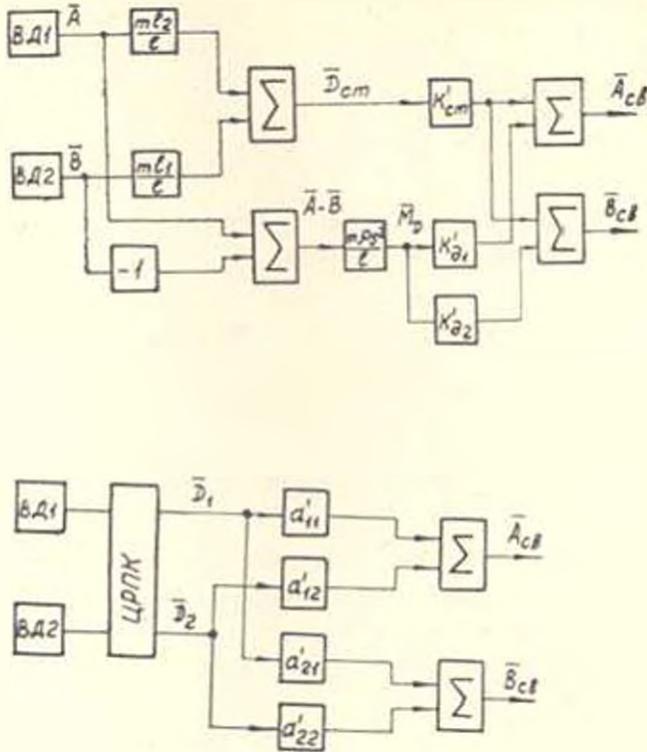


Рис. 2: Схема расчета свободных колебания ротора: а) симметричного, б) консольного.

Эксперименты показали, что при использовании структурных схем рис. 2а, б. точность балансировки центрированием увеличивается на 20—25%.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. с. 1060958 (СССР). Способ балансировки роторов /И. Х. Аюбян, Л. Э. Варталиян, А. Е. Саркисян.— Опубл. в Б. И., 1983, № 46
2. Основы балансировочной техники /Под ред. В. А. Шелетильянова. М.:— Машиностроение, т. 1, 1975. — 528 с.

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ Ո Ւ Ն

էջ

ՇՐՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ՄԵՆԱՆԿԱ

Ա. Գ. Կիւրիով, Ա. Վ. Միլնայան: Կրկնաշարժական հարվածների և հրումների ազդեցությունը հրկրաշարժին հարմարվող համակարգերի վրա 3

ՇՐՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ԿՈՆՍՏՐՈՒԿՑԻԱՆԵՐ

Վ. Ռ. Խորակլան, Կ. Հ. Քարամյան, Բ. Գ. Խորակլան: Հրաքիածին ապակու փրման բեխացքի մեխանիզմը 9

ՉԱՓՈՂԱԿԱՆ ՏԵՆՆԻԿԱ

Ա. Ս. Շալիգովյան: Զհավասարակշռված կամրջակային սիմետրիկ շերմաստիճանային սխալի հաշվարկը 15

ՏԵՆՆԻԿԱԿԱՆ ԿՐՈՆՈՒՆԵՏԻԿԱ

Ա. Վ. Փամբուխչյան, Լ. Ս. Կասաբյան, Ա. Լ. Ուզլարյան: Ֆեզային տարածությունում ուլտրաձայն շարժման դնայում փոխանցատման մոմենտի որոշումը 19

Ա. Մ. Ալանով, Վ. Ռ. Մաթիսոյան: Անհալտ պարամետրներ ունեցող զծային համակարգերով աղաղակազմ պատկերներին որակի լավացման ալգորիթմը 25

Հ Ի Գ Ր Ո Տ Ե Ն Ի Կ Ա

Գ. Ս. Փարսյան, Ս. Շ. Լուրիվանյան, Վ. Ս. Ասրզոյան: Կիսասահմանափակ տիրույթում լիպտունացված ձձանցում ջրամբարներից և ջրանցքներից 30

Գ Ի Տ Ի Կ Ա, Ն Ե Ո Ւ Թ Ս Ի

Ա. Գ. Միրզախանյան, Ռ. Ն. Հակոբյան: Պալիդիսպերս նյութերի հիդրոսփիլիական բաժանման արոցների մաթեմատիկական մոդելավորումը 35

Է. Վ. Կուրսյան, Վ. Գ. Ալեխանդրյան: Բազմաշափ ավտոմատ կառավարման համակարգերի նկարագրումն ու հետազոտումը գլխավոր փոխանցման ֆունկցիաների և ուզդուկյունների հիման վրա 38

Է. Վ. Քաղեսոյան, Ն. Խ. Հակոբյան, Ա. Ս. Ասրզոյան: Գոտորի իներցիայի կենտրոնական առանցքի շեղման որոշումը կենտրոնավորմամբ հավասարակշռելու դեպքում 43

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

- А. П. Кириллов, А. В. Минасян.* Воздействие сейсмических толчков и ударов на комбинационно-сейсмоадаптивные системы 3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- В. Р. Исраелян, К. О. Карамян, Б. Г. Исраелян.* Механизм процесса вспучивания вулканического стекла 9

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- А. С. Шахкян.* Расчет температурной погрешности неуравновешенной мостовой схемы 15

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

- С. В. Памбухчян, Л. С. Костаняк, А. П. Бегларян.* Определение моментов переключения при оптимальном движении на фазовом пространстве 19
- А. М. Агапов, В. Р. Мартиросян.* Алгоритм улучшения качества изображений, искаженных линейными системами с неизвестными параметрами 25

ГИДРОТЕХНИКА

- Г. С. Габаян, С. Ш. Нуриджанян, В. С. Саркисян.* Нестационарная фильтрация из водохранилища и каналов в полуграниченную область 30

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

- А. Г. Мирзаханян, Р. Е. Акопян.* Математическое моделирование процесса гравитационной классификации полидисперсных материалов 35
- Э. В. Карслян, В. Г. Александрян.* Описание и анализ многомерных систем автоматического уравнения на основе главных передаточных функций и направлений 48
- Э. В. Татевосян, Н. Х. Акопян, А. Е. Саркисян.* Определение смещения главной центральной оси инерции при балансировке централизованном 43