

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Журнал издается с 1947 г.
Выходит 6 раз в год на русском языке

Խ Ր Ա Դ Ր Ա Կ Ա Ն Կ Ո Ւ Ե Դ Ի Ա

Կասյան Մ. Վ. (պատ. խմբագիր), Աղոնց Հ. Տ. (պատ. խմբագրի տեղակալ),
Ալիբեկյանի Վ. Վ., Անանյան Ա. Կ., Զուգրյան Մ. Ա., Հակոբյան Ռ. Ն.,
Սարգսյան Յակ. Լ., Ստուկյան Մ. Գ., Տեր-Ազարյան Ի. Ա.,
Փինացյան 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., Анания А. К., Аюбян Р. Б., Задоян М. А.,
Пинайбян В. В. (зам. ответ. редактора), Саркисян Ю. Л.,
Стамян М. Г., Тер-Азизьев Н. А.
Ответственный секретарь Степанян Э. К.



СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

А. П. КИРИЛЛОВ, А. В. МИНАСЯН

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ КОМБИНАЦИОННОМ ПОВРЕЖДЕНИИ

Существующие методы оценки несущей способности конструкций за пределом упругости можно разделить на две основные группы. Первые устанавливают критерии с учетом зависимости «напряжение — деформация» и наиболее распространены при статических воздействиях. Вторые позволяют оценить несущую способность системы с помощью функции повреждаемости, при обоснованном значении которой имеет место полное разрушение. Поведение конструкции и элементов за пределом упругости при динамических воздействиях зависит от характера разрушения. В случае пластических течений основным фактором повреждаемости является перераспределение усилия, а при хрупком разрушении — перераспределение энергии [1, 2]. Экспериментальные исследования [3—6] показали, что циклическое повреждение зависит от числа циклов нагружения. В наиболее общем виде функцию повреждаемости можно представить следующим образом:

$$\Phi_k = \Phi_k(\delta V_{kf}, \delta W_{kf}, \delta N_{kf}, V_k, W_k, N_k, R_k, \tau), \quad (1)$$

где δV_{kf} — скачок скорости при скачкообразном разрушении; δW_{kf} — величина пластического смещения; δN_{kf} — число циклов нагружения, при котором существует циклическая повреждаемость; V_k , W_k , N_k — соответственно, скорость, смещение и число циклов нагружения; R_k — реакция в точке k ; τ — параметр времени; N — степень свободы системы; $k = 1, 2, 3, \dots, N$.

Повреждаемость является функцией, зависящей от параметров δV_{kf} , δW_{kf} , δN_{kf} . В упругой стадии колебания эти параметры равны нулю и возрастают с появлением повреждаемости:

$$\delta V_{kf} > 0; \quad \delta W_{kf} > 0; \quad \delta N_{kf} > 0. \quad (2)$$

С учетом компонентов повреждаемости, зависимость (1) можно представить в виде:

$$\Phi_k = \Phi_{k0}(V_k, \tau, R_k) \delta V_{kf} + \Phi_{k1}(W_k, \tau, R_k) \delta W_{kf} + \Phi_{k2}(N_k, \tau, R_k) \delta N_{kf} \quad (2')$$

Если неравенство (2) полностью сохраняется, то Ψ_k носит квази-компонентный характер:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi_k}{\partial V_{kf}} &= \Psi_{kv}; & \frac{\partial \Psi_k}{\partial W_{kf}} &= 0; & \frac{\partial \Psi_k}{\partial N_{kf}} &= 0; \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial V_{kf}} &= 0; & \frac{\partial \Psi_k}{\partial W_{kf}} &= \Psi_{kw}; & \frac{\partial \Psi_k}{\partial N_{kf}} &= 0; \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial V_{kf}} &= 0; & \frac{\partial \Psi_k}{\partial W_{kf}} &= 0; & \frac{\partial \Psi_k}{\partial N_{kf}} &= \Psi_{kN}. \end{aligned} \quad (3)$$

Совместно решая уравнения (2) и (3), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi_k}{\partial V_{kf}} &= \Psi_{kv}(V_k, W_k, R_k); \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial W_{kf}} &= \Psi_{kw}(W_k, V_k, R_k); \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial N_{kf}} &= \Psi_{kN}(N_k, V_k, R_k). \end{aligned} \quad (4)$$

Зависимости (4) показывают, что компоненты повреждаемости зависят от ∂V_{kf} , ∂W_{kf} , ∂N_{kf} и если (4) линейные, можно записать:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi_k}{\partial V_{kf}} &= \xi_{kv} \Theta_{ok}(\Psi_k); \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial W_{kf}} &= \xi_{kw} \Theta_{ok}(\Psi_k); \\ \frac{\partial \Psi_k}{\partial N_{kf}} &= \xi_{kN} \Theta_{ok}(\Psi_k), \end{aligned} \quad (5)$$

где ξ_{kv} , ξ_{kw} , ξ_{kN} — константы.

Интегрируя уравнения (5), получим характеристики полной повреждаемости:

$$\begin{aligned} \{V_{kf}\} &= \int_0^{\Psi_{kv}} \frac{\partial \Psi_k}{\xi_{kv} \Theta_{ok}(\Psi_k)}; & \{W_{kf}\} &= \int_0^{\Psi_{kw}} \frac{\partial \Psi_k}{\xi_{kw} \Theta_{ok}(\Psi_k)}; \\ \{N_{kf}\} &= \int_0^{\Psi_{kN}} \frac{\partial \Psi_k}{\xi_{kN} \Theta_{ok}(\Psi_k)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из уравнения (2') имеем:

$$\int_0^{\Psi_f} \delta \Psi_k = \int_0^{V_k} \Psi_k \delta V_{kf} + \int_0^{W_k} \Psi_k \delta W_{kf} + \int_0^{N_k} \Psi_k \delta N_{kf} \quad (7)$$

После подстановки (4)–(6) в (7) получим:

$$1 = \frac{V_{kf}}{\{V_{kf}\}} + \frac{W_{kf}}{\{W_{kf}\}} + \frac{N_{kf}}{\{N_{kf}\}} \quad (8)$$

Уравнение (8) устанавливает связь между параметрами повреждаемости. При расчете сооружений и конструкции на динамические воздействия допускаются частичные повреждения, несвязанные с обрушением несущих каркасов. В допускаемых пределах повреждаемости следует установить зависимости между жесткостями и кинематическими параметрами движения. Зависимость V_k , (ΔB_k) была получена из уравнения энергохарактеристики системы, которое в процессе разрушения имеет вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \{0,5 \Phi_{ik}^2 M_i V_{kf}^2 + \Phi_{ik}^2 M_i (V_{kf} Q_k + V_{kf} \dot{Q}_k) + \Phi_{ik} M_i V_{kf}^2 + \\ & + \Phi_{ik} M_i (V_{kf} Q_k + V_k Q_0)\} + 0,5 \Delta B_k Q_k^2 = \\ & = \sum_{p=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\Phi_{ik}^2 M_i Q_k \frac{\partial}{\partial \xi_p} Q_k(\xi_p) + \Phi_{ik}^2 M_i Q_k(\xi_p) \frac{\partial}{\partial \xi_p} Q_k(\xi_p) + \right. \right. \\ & + \Phi_{ik}^2 M_i Q_0(\xi_p) \frac{\partial}{\partial \xi_p} Q_k(\xi_p) + \Phi_{ik} M_i Q_k(\xi_p) \frac{\partial}{\partial \xi_p} Q_k(\xi_p) + \\ & \left. \left. + \Phi_{ik} M_i \dot{Q}_0(\xi_p) \frac{\partial}{\partial \xi_p} Q_k(\xi_p) + \Phi_{ik} M_i Q_0(\xi_p) \frac{\partial}{\partial \xi_p} Q_0(\xi_p) \right] \dot{\xi}_p \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

где M_i — сосредоточенная масса в точке; ξ_p , $\dot{\xi}_p$ — время разрушения; Φ_{ik} — собственные функции; ΔB_k — изменение жесткости; $Q_k(\xi_p)$ — координата Лагранжа II рода; $Q_0(\xi_p)$ — характеристика внешнего воздействия.

В предельном состоянии, когда время разрушения $P(\xi_p - \xi) \rightarrow 0$, после некоторых преобразований из (9) получим:

$$V_{kf} = Q_k \left\{ \left[1 + \Delta B_k Q_k^2 \left[\left(\sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^2 M_i \right) V_k^2 \right]^{-1} \right]^{-1/2} - 1 \right\} \quad (10)$$

При учете упруго-пластического движения скачок ускорения определяется:

$$\dot{V}_{kf} = \Delta B_k Q_{kp} \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{ik}^2 M_i \right)^{-1/2} \quad (11)$$

а при чисто пластическом течении $\dot{V}_{pl}$ определяется по следующей формуле:

$$\dot{V}_{pl} = R_{pl} \left(\sum_{i=1}^n \Phi_{pi}^1 M_i \right)^{-1}, \quad (12)$$

где R_{pl} — предельное усилие.

С учетом формулы (11) и (12) величина пластической деформации определяется решением дифференциальных уравнений движения. Определение зависимости $N_{pl}(B_p)$ теоретическим путем затруднено и она может быть достаточно точно выведена экспериментально [3—6].

При частном случае $N_{pl} = 0$ были исследованы изменения усилий, действующих на сооружение с учетом повреждаемости, обусловленной пластическим течением и хрупким разрушением [7].

На рис. 1 представлена зависимость $\psi_{l,pl} = l_{pl} (l_{pl} = V_{pl}; W_{pl}; N_{pl})$. Изменения усилия S_{pl}/S_{yk} (где S_{pl} , S_{yk} — соответственно, усилия в стадии повреждения и упругой стадии) в зависимости от $\Delta B_p/B_p$ и $\Delta W_p/W_p$ приведены на рис. 2.

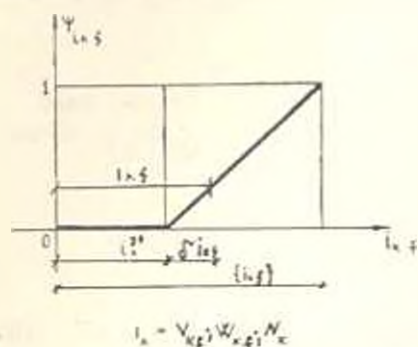


Рис. 1.

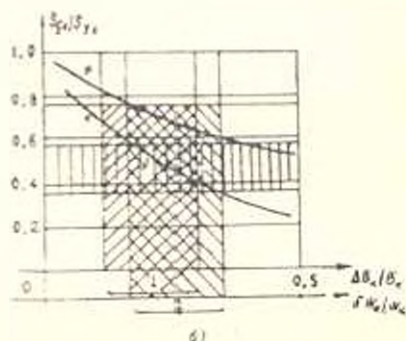


Рис. 2.

Как видно из графиков, наиболее рациональной областью использования несущей способности системы является область P^* , в пределах которой имеется комбинационное повреждение. Практически достигнуть комбинационных разрушений можно путем применения комплекса элементов, часть из которых способна пластически деформироваться, а другая — квазихрупко повреждаться. Например, при наличии хрупких панельных конструкций можно применять такие узловые металлические элементы, которые наиболее склонны к пластическому повреждению, а также сочетания железобетонных каркасов с металлическими

ԳԻՆԱՄԻՆԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿՐՈՂՈՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՌԱՑԻՈՆԱԼ
ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ԶՈՒԳԱՅՎԱԾ ՎՆԱՍՎԱՄՔԻ ԳԵՊԲՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո մ

Հողվածում ուսումնասիրվում են զուգակցված վնասվող գինումիկ համակարգեր, Պլաստիկ, փխրուն և ցիկլային վնասվող համակարգերը բնութագրվում է զուգակցված վնասվող ֆունկցիայի միջոցով, որը ներկայացված է (1) տեսքով: Վնասվածքի ֆունկցիայի համար առկա են մասնակի ղեպեր: Համապատասխան փխրուն և պլաստիկ վնասվածքները բնութագրող պարամետրերը ստացվել են էներգորեսուանի և էպրանտի 2-րդ սերի համասարմաներից: Մասնակի ղեպի համար, երբ ցիկլային վնասվածքը բացակայում է, բերված է գինամիկական համակարգում ուժերի փոփոխման գրաֆիկը:

Ախտառների վերջում ներկայացվում է մեխոդիկա զուգակցված վնասվող գինամիկական համակարգերի կրողունակության առցիտնալ օգտագործման համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. H. Liebowitz (Ed.) Fracture, vol. 1-7, New-York, Academic Press, 1968-1972, -470 c.
2. Алексеев Я. М. и др. Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений.— М.: Наука, 1978.— 246 с.
3. Гоцфельд Д. А., Чернявский О. Ф. Несущая способность конструкций при ползучих нагрузениях.— М.: Машиностроение, 1979.— 340 с.
4. Киралико А. П. Выносливость гидротехнического железобетона.— М.: Энергия, 1978.— 272 с.
5. Серенсен С. В. и др. К основам расчета на прочность при малоцикловом нагружении.— Машиноведение, 1972, № 5, с. 22-38.
6. Koffin K. F. Cyclic strain and Fatigue Behaviour of Metals in Creep Range. — Proc. of the Int. Conf. on Fracture, 1966, v. 3, 271-312.
7. Кириллов А. П., Дорбинин С. С., Минасян А. В. Сейсмостойкость упруго-пластических систем с разрывными характеристиками.— ДАН АрмССР, 1982, № 2, с. 85-90.

ЭНЕРГЕТИКА

Ш. А. ЭЛМАЯН

РЕШЕНИЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ С ЗАПАЗДЫВАЮЩИМ УПРАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

В проблеме оптимизации совместной работы электростанций в сложной энергосистеме важное место занимают системы с каскадно-расположенными ГЭС. Как правило, в процессе оптимизации режимов таких систем пренебрегается запаздыванием в управлении, связанным с учетом времени добегания волны с верхних ступеней каскада на нижние. В настоящей работе рассматривается задача оптимизации режима работы сложной энергосистемы с каскадно-расположенными ГЭС, когда учитывается время добегания волны. Задача решается методом динамического программирования. Численный пример реализован на ЭВМ для системы с реальными характеристиками.

1. Пусть рассматриваемая управляемая система имеет ТЭС и n каскадно-расположенных ГЭС. Состояние рассматриваемой энергосистемы в каждый момент времени t характеризуется действительными параметрами фазового пространства V ($V^0, V^1, \dots, V^{n-1}$) с граничными условиями:

$$V^i(t_0) = V_{\text{нач}}^i; \quad V^i(t_1) = V_{\text{кон}}^i, \quad (1.1)$$

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

В качестве управляющих переменных приняты мощности тепло-станции и гидростанций с областями управления:

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max}; \quad N_{\min}^i \leq N^i \leq N_{\max}^i \quad (1.2)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, n-1),$$

где $P_{\min}, P_{\max}, N_{\min}^i, N_{\max}^i$ — соответственно, минимальная и максимальная мощности ТЭС и ГЭС.

Работа водохранилищ описывается системой дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{cases} \frac{dV^0}{dt} = -Q^0(t) + q^0(t) - \Pi^0(t); \\ \frac{dV^i}{dt} = -Q^i(t) + q^i(t) - \Pi^i(t) + Q^{i-1}(t - \tau^i), \\ i = 1, 2, \dots, n-1, \end{cases} \quad (1.3)$$

где $Q^i(t)$ — расход воды на i -ой ГЭС; $q^i(t)$ — приток воды в водохранилище i -ой ГЭС; $11^i(t)$ — потери воды из водохранилища i -ой ГЭС; τ^i — время добегания волны с $(i-1)$ -ой ступени на i -ую ступень каскада.

Определение времени добегания волны в зависимости от расхода воды, геометрических и физических характеристик потоков не является целью настоящей работы. В рассматриваемой задаче время добегания волны для каждой ступени каскада принимается постоянным. Критерием оптимальности принят минимум расходов условного топлива по системе в течение цикла регулирования:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} B(P(t)) dt = \min, \quad (1.4)$$

где B — расход условного топлива в ТЭС.

При этом в каждый момент времени должен соблюдаться баланс мощностей:

$$P(t) + \sum_{i=1}^{n-1} N^i(t) = N_c(t) + L(t), \quad (1.5)$$

где $N_c(t)$ — нагрузка системы; $L(t)$ — потери в линиях электропередачи.

Поставленную задачу в терминах теории оптимального управления можно сформулировать следующим образом: среди всех допустимых управлений (1.2) системы, переводящих фазовую точку из положения $V_{\text{нач}}(V^0(t_0), \dots, V^{n-1}(t_0))$ в положение $V_{\text{кон}}(V^0(t_1), V^1(t_1), \dots, V^{n-1}(t_1))$, найти такое, для которого функционал (1.4) принимает наименьшее возможное значение. Отметим, что в силу уравнения баланса (1.5), используя функциональную зависимость $N^i(t) = N^i(Q^i(t))$, условие (1.4) можно представить в виде:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} B(N^0(t), \dots, N^{n-1}(t)) dt = \int_{t_0}^{t_1} B(Q^0(t), \dots, Q^{n-1}(t)) dt. \quad (1.6)$$

Аналогичная задача рассмотрена в [1], где использован принцип максимума Л. С. Понтрягина [2]. В настоящей статье алгоритм построения оптимального решения основывается на методе динамического программирования [3], обобщенного для случая запаздывания в управлении.

2. Для решения задачи проведем в $(n+1)$ -мерном пространстве (V, t) гиперплоскости $\sigma_k: t = k\Delta t, k = 0, 1, \dots, s$, где $\Delta t = (t_1 - t_0)/s$ — шаг численного интегрирования; s — число интервалов времени, которое может быть выбрано достаточно большим для достижения требуемой точности решения (рис. 1).

Исходную задачу можно сформулировать следующим образом: среди всех ломаных, соединяющих фиксированные точки плоскостей σ_0 и σ_1 и лежащих в допустимой области D , определяемой неравенствами (1.2), найти ту, которая доставляет минимум функционалу (2.3). Если интерпретировать значения функционала $f_k(V_k, V_{k+1}, \bar{V}_k, \bar{V}_{k+1})$ как длину отрезка, соединяющего точки V_k, V_{k+1} , то можно сказать, что задача сводится к отысканию ломаной с наименьшей длиной. Таким образом, будем иметь некоторое множество вариантов E , имеющее мощность континуума, представляющих множество всех ломаных, соединяющих фиксированные точки на плоскостях σ_0 и σ_1 и лежащих в допустимой области. Для решения аналогичных задач, но без учета фактора запаздывания, предложен алгоритм [4], основное содержание которого состоит в формулировке правил последовательного сужения множества E конкурентоспособных вариантов. В настоящей работе, используя известный алгоритм [4], строится многошаговый процесс, в котором наряду с «отметанием» некоторого множества вариантов, не содержащих оптимального решения, учитывается запаздывание в управлении, приводящее также к некоторому изменению, по сравнению с обычной, структуры функционала (2.3). Процедура поиска оптимального варианта среди всех конкурентоспособных ломаных основывается на следующем. Пусть каждая точка $V_k \in \sigma_k$ соединена с точкой V_{k+1} гиперплоскости σ_{k+1} ломаной наименьшей длины, которую обозначим через $T(V_k, V_{k+1})$. Тогда длина наиболее короткой ломаной, соединяющей точки V_{k+1} и V_0 , определяется при помощи соотношения:

$$T(V_{k+1}, \bar{V}_{k+1}) = \min_{V_k \in D} (T(V_k, \bar{V}_k) + f_k(V_k, V_{k+1}, \bar{V}_k, \bar{V}_{k+1})),$$

причем все варианты из E , не содержащие ломаной длины $T(V_{k+1}, \bar{V}_{k+1})$, отбрасываются. На последнем шаге каждой точке $V_k \in \sigma_k$ ставится в соответствие число $T(V_k, \bar{V}_k)$ — длина короткой ломаной, соединяющей точку V_k с V_0 , после чего минимизируется

$$T = \min_{V_0 \in D} (T(V_0, \bar{V}_0))$$

и на этом завершается процедура поиска оптимального решения.

3. Численная реализация предложенного алгоритма осуществляется для двух ГЭС каскада и ТЭС, имеющие реальные характеристики. На ЭВМ ЕС-1022 определен режим работы подохранилища верхней ГЭС для случаев: мгновенного управления, т. е. без учета запаздывания $\tau = 0$ (рис. 2 — линия a), с учетом запаздывания ($\tau = 1$ ч и $\tau = 2$ ч,

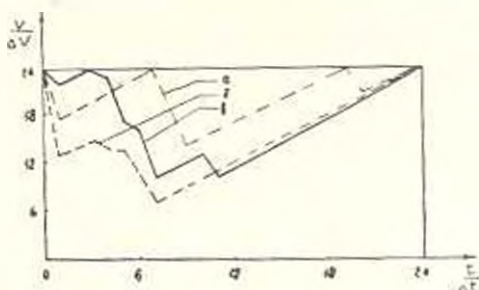


Рис. 2.

рис. 2 — линии б и в) при размере сетки по аргументу времени $\Delta t = 1$ ч, по аргументу объема воды $\Delta V = 12600 \text{ м}^3$, $V_0 = V_{24} = 302600 \text{ м}^3$. Расходы топлива для рассмотренных случаев соответственно равны: 4453,1 т. у. т.; 4463,211 т. у. т.; 4461,938 т. у. т.

ЕрПИИ им. К. Маркса

5.1.1983

Շ. Հ. ԱՐԱՅԱՆ

ՈՒՇԱՅՈՂ ՂԵԿԱՎԱՐՈՒՄԸ ԹՊՏԻՄԻԶԱՑԻԱՆ ՈՐ ԱՂԳՐԻ ԼՈՒՄՈՒՄԸ ԳԻՆԱՄՈՎ
ՄԲԱԳՐԱՎՈՐՈՒՄԸ ՈՒՅԹՈՎՈՎ

Ա. Վ Փ Ո Վ Ո Ւ Մ

Գիտարկված է կասկածանալ տեղադրված հիդրոէլեկտրակայաններով բարդ էներգահամակարգի աշխատանքի սեփական օպտիմիզացիան խնդիրը, երբ հաշվի է առնվում կասկածի վերին աստիճաններից ստորիններին ալիքի հասանելու ժամանակը: Խնդիրը լուծված է գինումիկ ժրագրավորման մեթոդով: Թվային օրինակը իրականացված է էլեկտրոնային հաշվի մեքենայի վրա՝ իրական բնութագրեր ունեցող համակարգի համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Замкин Ш. А. Об одной задаче оптимизации системы с учетом запыызвания по управлению — В кн.: Межвуз. сб. науч. тр. по экономике, Ереван, 1982, вып. 1, стр. 61—65.
2. Понтрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1976. — 384 с.
3. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования. — М.: Наука, 1965. — 458 с.
4. Михалевич В. С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение. — Кибернетика, 1965, № 1, с. 45—56.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. К. БРУТЯН

О СИНТЕЗЕ МАРКОВСКИХ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
СО СЛУЧАЙНО ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Введение. На основании теории условных марковских процессов и сочетания с принципом максимума обобщается задача линейного синтеза марковских управляемых систем (МУС) при стохастической неполной обратной связи. В ней предполагается, что матрицы коэффициентов состояния и вектор коэффициентов управления являются пуассоновскими процессами с конечными состояниями, а динамические характеристики МУС зависят от условных оценок состояний. Анализ и метод решения поставленной задачи позволяют осуществить синтез закона управления в условиях весьма малой априорной информации относительно состояния МУС и ее характеристик. Для выбора закона управления выводится система обыкновенных дифференциальных уравнений. Показывается, что закон управления является функцией текущих наблюдений и основывается на информации о мгновенных условных оценках состояния МУС и характеристиках случайных коэффициентов.

Постановка задачи. Пусть МУС описывается векторно-матричным стохастическим дифференциальным уравнением [1—5]:

$$dx(t) = A(t)x(t)dt + D(t)u(t)dt + G(t)d\xi(t), \quad (1)$$

$$x(t_0) = x_0, \quad t \in I, \quad I = [t_0, T],$$

а процесс наблюдения — соотношением

$$dy(t) = H(t)x(t)dt + d\eta(t). \quad (2)$$

Здесь x — n -мерный вектор состояния МУС; y — m -мерный вектор наблюдения ($m \leq n$); u — r -мерный вектор управления, принадлежащий к классу $\bar{U}$ кусочно-непрерывных функций с конечным числом точек разрыва первого рода на любом конечном интервале I ; $\xi(t)$ и $\eta(t)$ — независимые винеровские процессы с характеристиками

$$M\{\xi(t)\} = M\{\eta(t)\} = 0; \quad M[d\xi(t)d\xi'(t)] = S(t)dt;$$

$$M[d\eta(t)d\eta'(t)] = S_{\eta\eta}(t)dt; \quad S_{\xi\xi}(t) = S_{\eta\eta}(t) > 0; \quad S_{\xi\eta}(t) = S_{\eta\xi}(t) > 0;$$

$M\{\cdot\}$ — математическое ожидание $\{\cdot\}$, а индекс $(\cdot)$ обозначает транспонирование. Матрицы $G(t)$ и $H(t)$ — $n \times n$ и $n \times m$ -мерные ограниченные и непрерывные для всех $t \in I$, регулярные матрицы. На практике при функционировании МЭС некоторые ее подсистемы могут выходить из строя. В связи с этим пусть каждый элемент $n \times n$ -мерной матрицы $A(t)$ и компонент r -мерного вектора $D(t)$ представляют собой пуассоновский процесс с конечным числом состояний [6, 7]. Начальное состояние МЭС принимается гауссовым с математическим ожиданием $M\{x_0\} = \bar{x}_0$ и корреляционной функцией $M\{(x_0 - \bar{x}_0) \times (x_0 - \bar{x}_0)'\} = R_0$, $R_0 = R_0' \geq 0$. Процессы $\varepsilon(t)$, $\tau(t)$ и x_0 принимаются независимыми.

Вся имеющаяся апостериорная информация относительно $A(t)$ и $D(t)$ содержится в текущих наблюдениях и в компактном виде ее можно представить случайным вектором $p(t)$. Пусть событие $C(t)$ заключается в совместном наступлении обоих событий $[A(t) D(t)]$ и каждый элемент матрицы $C(t)$ размера $n \times n + 1$ может принимать лишь некоторое конечное число дискретных значений и пусть существует l конечное число таких матриц, т. е. случайный вектор $p(t)$ имеет размерность l . Иными словами, текущие наблюдения образуют вектор $r(t)$, компоненты $p_i(t)$ которого в момент времени $t \in I$, представляющей собой апостериорную вероятность того, что происходит событие $C_i(t)$.

Закон управления U является функцией текущих наблюдений и опирается на мгновенных числовых характеристиках оценки вектора состояния МЭС и мгновенных значениях случайной матрицы $C(t)$. Таким образом, закон управления U опирается на текущий вектор обратной связи $q(t) = [x(t), R(t), p(t), t]'$, где x и R — числовые характеристики вектора состояния при неполных и неточных наблюдениях.

Из сказанного следует, что управление $u(t)$ выбирается на основе проводимого наблюдения $q(t)$, т. е. $u(t) = U[q(t)]$. В отличие от $p(t)$ и $n(t)$, которые являются случайными марковскими процессами, закон управления U представляет собой регулярную функцию.

Требуется выбрать закон управления U так, чтобы минимизировался функционал качества

$$J = \frac{1}{2} M_e \left\{ x_T' \Gamma x_T + \int_{t_0}^T [x'(\tau) B(\tau) x(\tau) + u'(\tau) E(\tau) u(\tau)] d\tau \right\},$$

где B — $n \times n$ -мерная полуопределенная симметрическая матрица, $E \geq 0$; M_e — математическое ожидание при наличии результатов наблюдений вплоть до момента t . Предполагается, что оптимальное управление $u^*(t)$ существует и принадлежит к классу функций U .

Обсуждение поставленной задачи. При сделанных предположениях, т. к. описываемая уравнениями (1), (2) МЭС является линейной, для оценки текущих значений вектора состояния можно применить известные уравнения динамики непрерывного фильтра Калмана [1—5]:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + D(t)u(t) + k(t)z(t); \quad z(t) \stackrel{\Delta}{=} y(t) - H(t)x(t); \quad (3)$$

$$R = AR + RA' + G'S, \quad G = k'S, \quad k; \quad k(t) = R(t)H'(t)S^{-1},$$

в которых $A(t)$ и $D(t)$ по предположению изменяются случайным образом.

Далее пусть марковский процесс $p(t)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению $\dot{p}(t) = f[x(t), R(t), p(t), t]$, $p(t_0) = p_0$ и U^* — оптимальный закон управления. Тогда соответствующее этому уравнению оценки вектора состояния (3) запишется в виде

$$\dot{\bar{x}}(t) = A(t)\bar{x}^*(t) + D(t)U^*[q^*(t)], \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0, \quad (4)$$

где вектор обратной связи имеет вид $q^*(t) = [x^*(t), R^*(t), p(t), t]$.

Вспомогательный процесс отличается от уравнения вектора оценки состояния МУС наличием добавочных членов, обусловленных характером апостериорной информации и удовлетворяет следующему уравнению [1—3]:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}(t) = & - \{ -A'(t) - [D(t) \operatorname{grad} U^*] \}' \psi(t) + B(t)x^*(t) + \\ & + E(t)u^*(t) [\operatorname{grad} U^*]'; \quad \psi(T) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

при этом гамильтониан $\tilde{H} = \tilde{H}(x, \psi, U, q, t)$ запишется в виде:

$$\tilde{H} = \psi'(t) [A(t)x(t) + D(t)u(t)] + \frac{1}{2} [x'(t)B(t)x(t) + u'(t)E(t)u(t)]. \quad (6)$$

Если U^* является оптимальным законом управления, то для всех $t \in I$, справедливо неравенство

$$M_t \{ \tilde{H}(x, \psi, U^*, q^*, t), q^*(t) \} \geq M_t \{ \tilde{H}(x, \psi, U, q, t), q(t) \}. \quad (7)$$

Учитывая условие (7), закон управления можно из выражения (6) представить в виде:

$$U^*[q^*(t)] = -E^{-1}(t)M_t \{ \psi'(t)D(t)/q^*(t) \}. \quad (8)$$

Ниже устанавливается специфическое обстоятельство, обусловленное стохастическим характером $A(t)$ и $D(t)$. Для того, чтобы найти закон управления U^* предварительно целесообразно исследовать вопрос вычисления вспомогательного процесса $\psi(t)$. Его удобнее представить в виде

$$\psi(t) = \Gamma(t)x^*(t), \quad (9)$$

где $\Gamma(t) = m \times m$ -мерная матрица, подлежащая определению.

При этом выражение (8) принимает вид:

$$U^* [q^*(t)] = -E^{-1}(t) \langle D'(t) \Gamma(t) \rangle \hat{x}^*(t), \quad (10)$$

где переменные, находящиеся в $\langle \rangle$, определяются условно через реализации случайного вектора обратной связи

$$\langle D'(t) \Gamma(t) \rangle \stackrel{\Delta}{=} M \{D'(t) \Gamma(t) | q^*(t)\}.$$

Из уравнений (3), (5) можно найти дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять матрица $\Gamma \stackrel{\Delta}{=} \Gamma(t)$. Подставляя в эти уравнения выражения (9), (10), получаем:

$$\dot{\psi} = \{[-A' + \langle \Gamma' D \rangle E^{-1} D'] \Gamma - B - \langle \Gamma' D \rangle E^{-1} \langle D \Gamma \rangle\} \hat{x}^*.$$

Это уравнение должно выполняться при любом значении $\hat{x}^*(t)$, т. е. Γ должна удовлетворять дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} = & -A' \Gamma - \Gamma A - B + \Gamma D E^{-1} \langle D' \Gamma \rangle + \\ & + \langle \Gamma' D \rangle E^{-1} D \Gamma - \langle \Gamma' D \rangle E^{-1} \langle D' \Gamma \rangle, \quad \Gamma(T) = \Gamma_T. \end{aligned} \quad (11)$$

Нетрудно установить, что $\Gamma(t)$ симметрическая. Транспонируя матрицы в левой и правой части уравнения (11) и учитывая, что B и E — симметрические матрицы, получаем:

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma}' = & -A' \Gamma' - \Gamma' A + \Gamma' D E^{-1} \langle D' \Gamma' \rangle + \\ & + \langle \Gamma D \rangle E^{-1} D \Gamma' - \langle \Gamma D \rangle E^{-1} \langle D' \Gamma' \rangle, \quad \Gamma(T) = \Gamma_T. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что $\Gamma = \Gamma'$ и уравнение (11) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} = & -A' \Gamma - \Gamma A - B + 2\Gamma D E^{-1} \langle D' \Gamma \rangle - \langle \Gamma D \rangle E^{-1} \langle D \Gamma' \rangle, \\ \Gamma(T) = & \Gamma_T. \end{aligned} \quad (12)$$

При синтезе МУС с регулярными коэффициентами это уравнение представляет собой основное уравнение вычисления, т. к. непосредственно возможно проинтегрировать систему обыкновенных дифференциальных уравнений и определить $\Gamma(t)$. В рассматриваемой задаче уравнение (12) нельзя интегрировать непосредственно, т. к. переменные, находящиеся в $\langle \rangle$, определяются также через реализации случайного вектора обратной связи. Иными словами, условное математическое ожидание зависит от текущей реализации $q^*(t)$.

Решение задачи. Для того, чтобы получить закон управления U^* , необходимо в явном виде вычислить матрицу $\Gamma(t)$. Для простоты обозначений ниже событие $\{C_k(t)\}$ записывается в виде $k(t) \stackrel{\Delta}{=} \{C_k(t)\}$, где $k = 1, \dots, l$, а для условных математических ожиданий вводятся обозначения:

$$M \{A'(t) \Gamma(t) | q^*(t), k(t)\} \stackrel{\Delta}{=} A_k' \Gamma_k(p(t), t);$$

$$M \{\Gamma(t) | q^*(t), k(t)\} \stackrel{\Delta}{=} \Gamma_k(p(t), t).$$

Далее, т. к.

$$M \{ \Gamma(t)/p(t), k(t) \} = M \left\{ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Gamma(t + \Delta t) - \Gamma(t)}{\Delta t} / p(t), k(t) \right\},$$

$$E^{-1} \langle D'(t) \Gamma(t) \rangle = - \sum_{j=1}^l E_j^{-1}(t) D_j \bar{\Gamma}_j(p(t), t) p_j(t).$$

получим:

$$M \{ \Gamma(t)/p(t), k(t) \} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} [M \{ \Gamma(t + \Delta t)/p(t), k(t) \} - M \{ \Gamma(t)/p(t), k(t) \}].$$

Поскольку процесс $\{p(t), k(t)\}$ является марковским, то имеет место соотношение

$$M \{ \Gamma(t + \Delta t)/p(t), k(t) \} = M \{ \Gamma_j(p(t + \Delta t), t + \Delta t)/p(t), k(t) \}.$$

Отсюда с учетом уравнения (12) вытекает

$$M \{ \Gamma(t)/p(t), k(t) \} = \frac{\partial \bar{\Gamma}_k(p(t), t)}{\partial t} + \\ + \frac{\partial \bar{\Gamma}_k(p(t), t)}{\partial p(t)} M \{ p(t)/p(t), k(t) \} + \sum_{j=1}^l \bar{\Gamma}_j(p(t), t) p_{kj}(t),$$

где $p_{kj}(t)$ — априорная переходная вероятность. Объединяя предыдущие уравнения, найдем, что $\bar{\Gamma}_k \stackrel{\Delta}{=} \bar{\Gamma}(p(t), t)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial \bar{\Gamma}_k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\Gamma}_k}{\partial p(t)} M \{ p(t)/p(t), k(t) \} + \sum_{j=1}^l \bar{\Gamma}_j p_{kj}(t) = -A_k \bar{\Gamma}_k - \bar{\Gamma}_k A_k - B_k + \\ + 2\bar{\Gamma}_k D_k \sum_{j=1}^l E_j^{-1} D_j \bar{\Gamma}_j p_j(t) - \left(\sum_{j=1}^l \bar{\Gamma}_j D_j(t) p_j(t) \right) \left(\sum_{j=1}^l E_j^{-1} D_j \bar{\Gamma}_j p_j(t) \right). \quad (13)$$

$$\bar{\Gamma}_k(p(T), T) = \bar{\Gamma}_T.$$

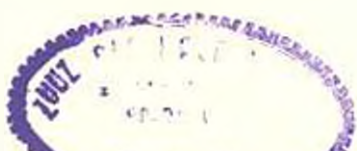
Решение уравнения (13) связано с определенными трудностями, однако с помощью метода характеристик можно свести к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Ниже вводится обозначение

$$f(p(t), t, k) \stackrel{\Delta}{=} M \{ f(p(t), x(t), R(t), t)/p(t), k(t) \}, \quad k = 1, \dots, l$$

и если

$$p(\sigma, k) = f(p(\sigma), \sigma, k), \quad p(t, k) = p(t), \quad (14)$$

$$p(T, k) = p(T), \quad \sigma \in [t, T].$$



то уравнение (13) примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma}_s(z) = & -A_s \bar{\Gamma}_s(z) - \bar{\Gamma}_s(z) A_s - B_s + 2\bar{\Gamma}_s(z) D_s \sum_{j=1}^n E_j^{-1} D_j^T \bar{\Gamma}_s(z) \bar{p}_j(z, k) - \\ & - \left(\sum_{j=1}^n \bar{\Gamma}_s(z) D_j p_j(z, k) \right) \left(\sum_{j=1}^n E_j^{-1} D_j^T \bar{\Gamma}_s(z) p_j(z, k) \right) - \sum_{j=1}^n \bar{\Gamma}_s(z) p_{s,j}(z); \\ \bar{\Gamma}_s(T) = & \bar{\Gamma}_{s,T}. \end{aligned} \quad (15)$$

Отсюда следует $\Gamma_s(q(t), t) = \bar{\Gamma}_s(t)$, а оптимальный закон управления принимает вид:

$$U^*(p^*(t)) = - \sum_{j=1}^n E_j^{-1} D_j^T \bar{\Gamma}_s(t) p_j(t) x^*(t). \quad (16)$$

Таким образом, уравнения (14) — (16) решают поставленную задачу синтеза. Решения этих уравнений дают неслучайные функции и несут всю необходимую информацию для осуществления управления. Преимущество предлагаемого метода синтеза является то, что уравнения (14), (15) друг с другом не связаны и поэтому могут быть вычислены раздельно, а результаты использованы для реализации закона управления. Хотя граничные условия заданы в точках t и T , трудности, которые возникают при решении граничных задач, в рассматриваемом случае будут отсутствовать, т. к. только в формуле (16) используется текущая информация обратной связи, и тем самым реализация закона управления существенно упрощается. Следует также отметить, что уравнения (14), (15) обладают характерными качественными свойствами, по которым можно судить о динамике процесса управления. По уравнению (14) можно выяснить, как закон управления адаптируется к вариациям процесса управления. Если решение уравнения (14) быстро достигает единичной ступенчатой функции, то решение (15) быстро стремится к уравнению, которое получается в случае неслучайных коэффициентов. Помимо этого, если переходные вероятности $p_{s,j}(z)$ малы, то уравнение (15) быстро сходится к уравнению Риккати, которое получается при исследовании МУС с регулярными коэффициентами.

Пример. Рассматривается случай, при котором возможно аналитическое решение рассмотренной задачи. Пусть некоторые подсистемы МУС могут выходить из строя, однако уловить момент их отказа не представляется возможным. Задача заключается в том, чтобы вычислить закон управления U , который, наблюдая поведение МУС и имея в качестве исходной информации априорную вероятность отказов подсистем, минимизировал требуемый функционал качества. Пусть МУС нельзя функционировать, когда $k = 1$, т. е. $C(t) = C_1(t)$. Это означает, что вначале все подсистемы работают нормально. Если вероятность отказов не зависит от времени, то $p_{s,j}(t) = [\exp(at)]_{j,j}$, $k, j \in [1, l]$.

В этом случае информации о прошлом поведении системы закон управления U не имеет [6, 7] и $p_j(z, k) = [\exp(az)]_{1j}$, $j \in \{1, l\}$. Поэтому необходимо решить только одну систему уравнений

$$\begin{aligned} \Gamma_k(z) = & -A_k^* \bar{\Gamma}_k(z) - \bar{\Gamma}_k(z) A_k - B_k^* + \\ & + 2\bar{\Gamma}_k(z) D_k \sum_{j=1}^l E_j^{-1} D_j^* \bar{\Gamma}_j(z) [\exp(az)]_{1j} + \\ & + \left(\sum_{j=1}^l \bar{\Gamma}_j D_j [\exp(az)]_{1j} \right) \left(\sum_{j=1}^l E_j^{-1} D_j^* \bar{\Gamma}_j(z) [\exp(az)]_{1j} \right) + \\ & + \sum_{j=1}^l \bar{\Gamma}_j(z) p_{jk}(z), \quad \bar{\Gamma}_j(T) = \bar{\Gamma}_{jT}, \quad k \in \{1, l\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Закон управления представляется формулой

$$U^*(q^*(t)) = - \sum_{j=1}^l E_j^{-1} D_j^* \bar{\Gamma}_j(t) [\exp(at)]_{1j} x^*(t). \quad (18)$$

Несмотря на то, что уравнения (17) удобны для численного интегрирования, для ясности ниже рассматривается скалярный случай. Пусть $A = -1$, $G = 1$, $x(0) = 0$, $T = \infty$, $B = E = H = 1$, коэффициент $D(t)$ принимает два дискретных значения 1 и -10 и все функции для поведения $D(t)$ являются постоянными, т. е. $a = 0$. Априорные распределения вероятностей принимают вид $p(D = 1) = p > 0$, $p(D = -10) = 1 - p > 0$. Для решения этой частной задачи стационарные решения уравнения (17) имеют вид:

$$[p(\Gamma_1 + 10\Gamma_2) - 10\Gamma_2]^2 - 2\Gamma_1[10\Gamma_2 + p(\Gamma_1 + 10\Gamma_2) - 1] - 1 = 0;$$

$$[p(\Gamma_1 + 10\Gamma_2) - 10\Gamma_2]^2 - 2\Gamma_2[100\Gamma_2 - 10p(\Gamma_1 + 10\Gamma_2) - 1] + 1 = 0,$$

Вводя новую переменную $\omega = p(\Gamma_1 + 10\Gamma_2) - 10\Gamma_2$, можно получить алгебраическое уравнение $10\omega^2 - (11p + 8)\omega^2 - 12\omega - 11p + 10 = 0$, которому удовлетворяет коэффициент усиления закона управления. Единственное решение этого уравнения имеет вид $\omega = -1,4p + 1,3$, а закон управления —

$$U^*(x^*(t)) = -(1,4p - 1,3)x^*(t).$$

Заключение. Разработанный метод синтеза применим к многочисленным техническим задачам теорий массового обслуживания и надежности, и, в частности, для решения задачи синтеза сложных многомерных МУС в условиях весьма малой априорной информации относительно состояния и динамических характеристик. В этой задаче экспериментальный синтез законов управления МУС на опытных или промыш-

ленных образцах оказывается дорогостоящим и длительным. Поэтому неопределенной является возможность синтеза таких систем до ее создания, и процессе проектирования и условиях малой априорной информации об объекте. Предлагаемый метод синтеза позволяет на начальной стадии проектирования обосновать структуру управляемых систем, состав применяемой аппаратуры и выбор значений параметров, что существенно сокращает сроки проектирования и повышает его качество.

ЕРННХ

9. VIII. 1982

Վ. Կ. ՔՐՈՒՏՅԱՆ

ՖԻՆԱՆՍԱԿԱՆ ՓՈՓՈԽՈՂՈՎ ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐՈՎ ԱՊՐԻՈՐՎՅԱՆ ՂԵԿԱՎԱՐՆԵՐ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՈՒՆԻԿՑԻՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ո. Վ Փ Ն Փ Ո Ւ Մ

Դիտարկվում է դժային մարկովյան ղեկավարելի համակարգի սինթեզման խնդիրը, որտեղ ենթադրվում է, որ դրուժյան մատրիցայի և ղեկավարման վեկտորի գործակիցները պատահական ֆունկցիաներ են, իսկ համակարգի դինամիկ բնութագրերը կախված են դրուժյան պայմանական փնհատականներից և պատահական գործակիցների իրականացումից: Լուծման մշակված մեթոդը թույլ է տալիս իրականացնել սինթեզը համակարգի դրուժյան ու բնութագրերի մասին շատ քիչ ենթադրական ինֆորմացիայի պայմաններում և թմովում է ինքնականոնավորման քնդունակությամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Фельдман Л., Ринск Р. Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами. — М.: Мир, 1978. — 316 с.
2. Ройтенберг Я. П. Автоматическое управление. — М.: Наука, 1978. — 552 с.
3. Черношелоко Ф. Д., Колмановский В. Б. Оптимальное управление при случайных возмущениях. — М.: Наука, 1978. — 312 с.
4. Колман В. Об общей теории систем управления. — Тр. 1 Конгресса ИФАК, М., Изд. АН СССР, 1961, т. 2, с. 521—547.
5. Брутян В. К. Оптимальный синтез линейных марковских управляемых систем при непрерывных и дискретных неполных наблюдениях. — Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, 1980, № 6, с. 27—36.
6. Линник А. Я. Работы математической теории массового обслуживания. — М.: Физматгиз, 1963. — 236 с.
7. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. — М.: Наука, 1966. — 132 с.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А. М. МИРЗОЯН, Г. Л. КАНТАРДЖЯН

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ИНЕРЦИОННЫМИ ОБЪЕКТАМИ ПРИ НАЛИЧИИ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕЙФА НЕЛИНЕЙНОЙ
СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Применение алгоритмов экстремального управления при оптимизации реальных объектов химической промышленности часто бывает затруднено из-за наличия дрейфа (смещение во времени) нелинейной статической характеристики, вызываемого низкочастотными контролируемыми и неконтролируемыми возмущениями, накладываемыми на объект. Известно, что учет дрейфа нелинейной статической характеристики может привести к выходу системы из состояния устойчивости и, следовательно, к нарушению нормального хода оптимизации.

Выведем алгоритм экстремального управления, обеспечивающий устойчивый поиск оптимума при наличии горизонтального дрейфа статической характеристики.

В [1] разработан быстродействующий, сходящийся алгоритм экстремального управления инерционными объектами второго порядка. Введя в рассмотрение индекс « m », обозначающий порядковый номер пробного смещения, запишем алгоритм управления в виде:

$$x_k = \bar{x}_{k-1} + \delta x_k = x_{k-1} + z_k a_c \quad (1)$$

где

$$z_k = \frac{f(x_{k,m-1}) - f(x_{k,m})}{2\epsilon};$$

$$\begin{aligned} f(x_{k,m-1}) = & \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[\sum_{j=0}^{N-1} (1-A_j)^2 \sum_{i=0}^{N-1} B_i^2 - \left[\sum_{j=0}^{N-1} B_j (1-A_j) \right]^2 \right] \sum_{i=0}^{N-1} A_i y_{k,m-1,i} + \right. \\ & + \left[\sum_{j=0}^{N-1} B_j (1-A_j) \sum_{i=0}^{N-1} A_i B_i - \sum_{j=0}^{N-1} A_j (1-A_j) \sum_{i=0}^{N-1} B_i^2 \right] \sum_{i=0}^{N-1} (1-A_i) y_{k,m-1,i} + \\ & + \left. \left[\sum_{j=0}^{N-1} A_j (1-A_j) \sum_{i=0}^{N-1} B_i (1-A_i) - \sum_{j=0}^{N-1} (1-A_j)^2 \sum_{i=0}^{N-1} A_i B_i \right] \sum_{i=0}^{N-1} B_i y_{k,m-1,i} \right\}; \\ f(x_{k,m}) = & \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[\sum_{j=0}^{N-1} (1-A_j)^2 \sum_{i=0}^{N-1} B_i^2 - \left[\sum_{j=0}^{N-1} B_j (1-A_j) \right]^2 \right] \sum_{i=0}^{N-1} A_i y_{k,m,i} + \right. \end{aligned}$$

$$+ \left[\sum_{j=0}^{N-1} B_j (1-A_j) \sum_{j=0}^{N-1} A_j B_j - \sum_{j=0}^{N-1} A_j (1-A_j) \sum_{j=0}^{N-1} B_j \right] \sum_{j=0}^{N-1} (1-A_j) y_{k, m, j} + \\ + \left[\sum_{j=0}^{N-1} A_j (1-A_j) \sum_{j=0}^{N-1} B_j (1-A_j) - \sum_{j=0}^{N-1} (1-A_j)^2 \sum_{j=0}^{N-1} A_j B_j \right] \sum_{j=0}^{N-1} B_j y_{k, m, j};$$

$$a_l = \frac{1}{T}, \quad l = 1, 2, 3, \dots, z = \text{const};$$

$$l = \begin{cases} l, & \text{если } \text{sign } z_k = \text{sign } z_{k-1}, \\ l+1, & \text{если } \text{sign } z_k = -\text{sign } z_{k-1}. \end{cases}$$

Пусть на объект управления помимо высокочастотных аддитивных помех $\xi(t)$, действуют также возмущения $q(t)$, приводящие к горизонтальному дрейфу статической характеристики.

Осуществим кусочно-линейную аппроксимацию дрейфа, т. е. прием скорость дрейфа в интервалах между двумя последовательными управляющими воздействиями постоянной, равной некоторому среднему значению $1/T$. Указываемая аппроксимация обусловлена тем, что из-за наличия на выходе статической характеристики линейного звена с большой инерционностью высокочастотные компоненты $q(t)$ подавляются и на измеряемый выход не проходят, низкочастотные же компоненты имеют монотонный характер.

Нелинейную статическую характеристику $y = f(x)$ аппроксимируем квадратичной моделью $y = ax^2$, достаточно хорошо отражающей особенности экстремальных характеристик, а именно: существенная крутизна характеристики вдали от экстремума и довольно пологая область в районе экстремума.

При реализации выводимой ниже модификации может появиться необходимость в смещении характеристики по оси X , или по оси Y , для чего введем в рассмотрение параметры P и Q , характеризующие величину смещения по оси X или Y , иначе, будем рассматривать квадратичную модель $y = d(x^2 + Px + Q)$.

При вышеприведенных предположениях относительно моделей статической характеристики и дрейфа для оценки $\hat{f}(x_{k, m-1})$ прогнозируемого значения, получаемого при фиксированном входном параметре $x_{k, m-1} = x_k + c$, можно написать уравнение

$$\hat{f}(x_{k, m-1}) = d_k [|x_{k, m-1} + V_k(N_{m-1} - 1)c|^2 + \\ + P|x_{k, m-1} + V_k(N_{m-1} - 1)c| + Q], \quad (2)$$

где N_{m-1} — количество измерений динамического выхода при положительном пробном смещении; d_k — коэффициент крутизны статической характеристики.

Для определения неизвестных V_k^* и d_k уравнения (2) составим второе уравнение относительно $f(x_{k,m})$, получаемого по совершению отрицательного пробного смещения при фиксированном входном параметре $x_{k,m} = (x_k - \epsilon)$:

$$\begin{aligned} \tilde{f}(x_{k,m}) = & d_k [x_{k,m} + V_k^* (N_{m-1} + N_m - 2)]^2 + \\ & + P[x_{k,m} + V_k^* (N_{m-1} + N_m - 2)] + Q, \end{aligned} \quad (3)$$

где N_m — количество измерений динамического выхода при отрицательном пробном смещении.

Решение (2) и (3) представляется в виде:

$$\begin{aligned} (V_k^*)_{1,2} = & \left\{ [(N_{m-1} - 1) \mp x_{k,m-1} \tilde{f}(x_{k,m}) - (N_{m-1} + N_m - 2) \mp x_{k,m} \tilde{f}(x_{k,m-1}) + \right. \\ & \left. + \frac{P}{2} (N_{m-1} - 1) \mp \tilde{f}(x_{k,m}) - \frac{P}{2} (N_{m-1} + N_m - 2) \mp \tilde{f}(x_{k,m-1})] \pm \right. \\ & \pm \sqrt{[(N_{m-1} + N_m - 2) \mp x_{k,m} \tilde{f}(x_{k,m-1}) - (N_{m-1} - 1) \mp x_{k,m-1} \tilde{f}(x_{k,m}) + \\ & + \frac{P}{2} (N_{m-1} + N_m - 2) \mp \tilde{f}(x_{k,m-1}) - \frac{P}{2} (N_{m-1} - 1) \mp \tilde{f}(x_{k,m})]^2 - \\ & - [x_{k,m}^2 \tilde{f}(x_{k,m-1}) - x_{k,m-1}^2 \tilde{f}(x_{k,m}) + P x_{k,m} \tilde{f}(x_{k,m-1}) - \\ & - P x_{k,m-1} \tilde{f}(x_{k,m}) + Q \tilde{f}(x_{k,m-1}) - Q \tilde{f}(x_{k,m})] \times \\ & \times \{ [(N_{m-1} + N_m - 2)]^2 \tilde{f}(x_{k,m-1}) - [(N_{m-1} - 1)]^2 \tilde{f}(x_{k,m}) \}} \Big\} / \\ & \{ [(N_{m-1} + N_m - 2) \mp \tilde{f}(x_{k,m-1})] - [(N_{m-1} - 1) \mp \tilde{f}(x_{k,m})] \}; \quad (4) \\ d_k = & \frac{\tilde{f}(x_{k,m-1})}{[x_{k,m-1} + V_k^* (N_{m-1} - 1)]^2 + P[x_{k,m-1} + V_k^* (N_{m-1} - 1)] + Q} \end{aligned} \quad (5)$$

Причем в качестве оценки скорости дрейфа необходимо использовать меньшее по абсолютной величине из решений (4), т. к. большее по абсолютной величине решение переводит рабочую точку на дальнюю ветвь статической характеристики.

Для учета дрейфа статической характеристики вычислим ее значения, соответствующие отсутствию дрейфа. Восстановленные значения статической характеристики при фиксированных $x_{k,m-1}$ и $x_{k,m}$ определяются выражениями:

$$\hat{f}_{\text{восст}}(x_{k, m-1}) = \hat{a}_2 [x_{k, m-1}^2 + Px_{k, m-1} + Q]; \quad (6)$$

$$\hat{f}_{\text{восст}}(x_{k, m}) = \hat{a}_2 [x_{k, m}^2 + Px_{k, m} + Q]. \quad (7)$$

Основную компоненту управляющего воздействия формулируем по восстановленным значениям (6) и (7):

$$\frac{a_2 [\hat{f}_{\text{восст}}(x_{k, m-1}) - \hat{f}_{\text{восст}}(x_{k, m})]}{2c} = z_k a_2.$$

Вводя дополнительно корректировку по скорости горизонтального дрейфа статической характеристики $\text{sign } z_k (V_k^i)_{\min} (N_{m-1} + N_m - 2) \tau$, получим модифицированный алгоритм управления:

$$\delta x_k = \frac{a_2 [\hat{f}_{\text{восст}}(x_{k, m-1}) - \hat{f}_{\text{восст}}(x_{k, m})]}{2c} - \text{sign } z_k (V_k^i)_{\min} (N_{m-1} + N_m - 2) \tau; \quad (8)$$

$$x_k = x_{k-1} + \delta x_k. \quad (9)$$

Алгоритм управления (8), (9) определяет приспособляющуюся к горизонтальному дрейфу стратегию быстрого поиска оптимума в шаговых системах экстремального управления (ШСЭУ) инерционными объектами.

На ЭВМ проведено цифровое моделирование разработанного алгоритма в замкнутом контуре оптимизации при различных начальных условиях и интенсивности дрейфа статической характеристики. Результаты моделирования показали работоспособность модифицированного алгоритма и выявили в зависимости от направления дрейфа, определяемого знаком $(V_k^i)_{\min}$ и местонахождения рабочей точки на статической характеристике, следующие качественно разные режимы функционирования алгоритма

1. $(V_k^i)_{\min} < 0$ и x_k находится на правой ветви — поиск реализуется на правой ветви, дрейфующей вправо статической характеристики.

2. $(V_k^i)_{\min} > 0$ и x_k находится на левой ветви — поиск реализуется на левой ветви, дрейфующей влево статической характеристики.

В обоих случаях характер смещения статической характеристики и направление основной компоненты управляющего воздействия способствуют ускорению нахождения оптимума, если при этом происходит ложное смещение входного параметра, то система согласно рекоменда-

ниями алгоритма (8), (9) следующим шагом исправляет направление поиска на правильное.

3. $(V_k^r)_{\min} > 0$ и x_k находится на правой ветви — поиск реализуется на правой ветви, дрейфующей влево статической характеристики.

4. $(V_k^r)_{\min} < 0$ и x_k находится на левой ветви — поиск реализуется на левой ветви, дрейфующей вправо статической характеристики.

В этих случаях дрейф статической характеристики и основная компонента управляющего воздействия одинаково направлены, что несколько замедляет поиск и нахождение оптимума. Однако устойчивости поиска сохраняется благодаря корректировке управляющих воздействий. Возможное ложное смещение не оказывает существенного влияния на характер поиска, поскольку следующим шагом алгоритм реверсирует поиск в правильном направлении.

Реализация модифицированного алгоритма в ШСЭУ обеспечивает помимо быстроедействия, связанного с прогнозированием значений статической характеристики и корректировки управляющего воздействия по скорости дрейфа, также устойчивость системы в процессе ее функционирования.

АФ ИРЕА

3 II 1982

Ա. Մ. ՄԻՐՅԱՆ, Գ. Լ. ՂԱՏԱՐՅԱՆ

ԻՆԵՐՑԻՈՆ ՕՐԵՆԿՏՆԵՐԻ ԵԱՅՐԱՀԵՂ ՂԵԿԱՎԱՐՄԱՆ ՉԵՎԱՓՈՆԿԱԾ ԱՂԳՈՐԻԹՄ ՈԶ-ԳԵԱՅԻՆ ՍՏԱՏԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԿՐԻ ՀՈՐԻՋՈՆԱԿԱՆ ՏԵՂԱՇԱՐԺԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Զնակվող ցածր հաճախականության գրգռումների առկայությունը ինքնադիտն օրյեկանների էլրում բերում է ոչ-դժային ստատիկական բնութագրի տեղաշարժման: Ուսումնասիրված էն ծայրահեղ համակարգեր, որոնց համար առավել վտանգավոր են հորիզոնական ուղղությամբ, ցածր հաճախության գրգռումները և որոնք բերում են ծայրահեղ արժեքի փնտրման կայունության կորուստի:

Արտածված է ալգորիթմ, որը ապահովում է ծայրահեղ արժեքի փնտրման կայունությունը շնորհիվ ղեկավարող ազդեցությունների ճշտման բառ ոչ-գծային ստատիկական բնութագրի տեղաշարժման արողություն զնահատականի:

Քվային մոդելացման մեթոդներով ստուգված է ալգորիթմի աշխատունակությունը և բացահայտված են նրա գործելու որակապես սարքերի սեծիմները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Рафислян Р. С., Мирзоян А. М. Самоадастравиошяся стохастическая процедура экстремального управления анерационными объектами второго порядка. Приборостроение, 1976, т. XIX, № 11, с. 48—53.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Г. Л. АРЕШЯН, О. В. ЛЕОНОВ, А. С. ШАХКАМЯН

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ
 ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОМЕТРОВ СГК И СВК С АКТИВНЫМ
 ФИЛЬТРОМ

В настоящее время на сейсмических стационарных станциях СССР, в основном, применяются маятниковые электромеханические сейсмометры системы Кириоса с гальванометрической регистрацией сейсмического сигнала [1], основным преимуществом которых является сравнительно малая динамическая погрешность в сейсмическом диапазоне частот. При этом обработка сейсмограмм осуществляется вручную. Для автоматизации процесса обработки сейсмических сигналов необходимо сопрягать сейсмометры с ЭВМ. С этой целью необходимо осуществить операционное преобразование выходного сигнала измерительной обмотки сейсмометрического преобразователя (СП) в цифровой код. Для оптимального выбора параметров операционного преобразователя и анализа динамических характеристик рассмотрим передаточные функции этих сейсмометров. Дифференциальное уравнение движения маятниковой системы (МС) СП имеет следующий вид [1]:

$$J\ddot{\theta} + P_y \dot{\theta} + w\theta = -R_0 m \dot{X}, \quad (1)$$

где J , P_y , θ , m , w — соответственно, момент инерции, коэффициент успокоения, угол поворота, масса и жесткость МС; R_0 — расстояние от оси вращения до центра тяжести; X — смещение почвы.

Если в качестве входной величины МС принять механический момент $M_{\text{вх}} = -R_0 m \dot{X}$, а в качестве выходной величины — угол поворота θ МС, то передаточную функцию МС можно представить в виде:

$$W_{\theta}(p) = \frac{\theta(p)}{M_{\text{вх}}(p)} = \frac{1}{Jp^2 + P_y p + w}. \quad (2)$$

Скорость перемещения МС преобразуется в э. д. с. с помощью магнито-электрического индукционного преобразователя, состоящего из двух обмоток, причем первая из них является измерительной, а вторая служит для подрегулировки коэффициента успокоения МС. Выходные э. д. с. этих обмоток определяются выражениями:

$$e_{\text{из}} = -K_{\text{из}} \dot{\theta}; \quad e_{\text{р}} = -K_{\text{р}} \dot{\theta}, \quad (3)$$

где $K_n = Bl_n R_0$; $K_y = Bl_y R_0$ — электромагнитные постоянные СП; B — индукция постоянного магнитного поля в рабочем зазоре магнитной системы СП; l_n , l_y — соответственно, рабочая длина измерительной обмотки и обмотки успокоения.

Следовательно, для передаточной функции измерительной обмотки получим:

$$W_n(p) = \frac{E_n(p)}{\Theta(p)} = -pK_n. \quad (4)$$

Если через вторую обмотку протекает ток i , то возникает обратное действующий на МС момент успокоения, определяемый выражением:

$$M_y = Bl_y R_0 i = K_y i. \quad (5)$$

При этом ток i создается подключением к второй обмотке соответствующего сопротивления Z_2 . Тогда для передаточной функции цепи успокоения получим:

$$W_{\alpha}(p) = -\frac{M_y(p)}{\Theta(p)} = \frac{K_y^2 p}{Z_2(p)}, \quad (6)$$

где $Z_2(p)$ — оператор общего сопротивления цепи второй обмотки.

На основании этого структурную схему СП можно представить в виде рис. 1, а его эквивалентная передаточная функция будет:

$$W_{\text{сп}}(p) = \frac{E_n(p)}{X(p)} = \frac{p^2 K_n / l_0}{p^2 + p \nu + \omega_0^2 + \frac{K_y^2}{J Z_2(p)} p}, \quad (7)$$

где $\omega_0 = \sqrt{g/l}$ — частота собственных колебаний МС; $l_0 = J/mR_0$ — приведенная длина маятника.

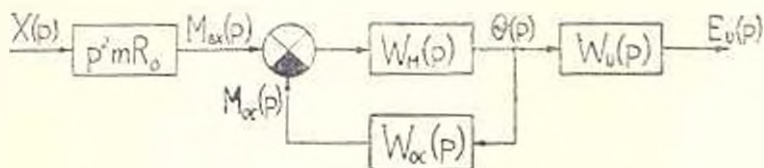


Рис. 1.

Если вторая обмотка нагружается активным сопротивлением, то

$$Z_2(p) = R_2 (1 + pT_2), \quad (8)$$

где R_2 — суммарное активное сопротивление цепи нагрузки, включающее сопротивление обмотки успокоения; $T_2 = l_2/R_2$ — постоянная времени цепи нагрузки; l_2 — индуктивность второй обмотки.

Для сейсмометров СГК и СВК $L_2 < 0.1$ Гн, $R_2 > 25$ Ом, поэтому учитывая, что частота сейсмических колебаний не превышает 20 Гц,

можно пренебречь значением pT_0 по сравнению с единицей в выражении (8). Тогда для передаточной функции $W_{\text{вы1}}(p)$ получим:

$$W_{\text{вы1}}(p) = - \frac{p^2 K_n / I_0}{p^2 + (P_y + K_y^2 / R_2) p + \omega_0^2} \quad (9)$$

Следовательно, подключение ко второй обмотке активного сопротивления увеличивает коэффициент успокоения МС. Если ко второй обмотке подключается последовательно резистор и конденсатор с емкостью C , то

$$Z_2(p) = \frac{1}{p} L_2 \left(p^2 + \frac{1}{T_2} p + \omega_2^2 \right), \quad (10)$$

где $\omega_2^2 = 1/L_2 C$.

Тогда для передаточной функции получим:

$$W_{\text{вы2}}(p) = - \frac{p^2 K_n / I_0}{p^2 + P_y p + \omega_0^2} \cdot \frac{K_y^2}{p^2 + p/T_2 + \omega_2^2} \quad (11)$$

Анализ полученного выражения показывает, что подключение к обмотке успокоения резистора и конденсатора приводит к изменению эквивалентной частоты собственных колебаний и коэффициента успокоения МС. Тогда для сейсмического диапазона частот при $T_0 = 0,004$ с, $C > 100$ мкф ($\omega_2^2 \geq 10^5$ с $^{-2}$) эквивалентную передаточную функцию сейсмометра можно записать в виде:

$$W_{\text{вы}}(p) = \frac{E_2(p)}{X(p)} = \frac{p^2 K_n / I_0}{p^2 + 2D_{01} \omega_{01} p + \omega_{01}^2}, \quad (12)$$

где D_{01} , ω_{01} , K_n — соответственно, приведенные степень успокоения и частота собственных колебаний МС, а также коэффициент успокоения.

Тогда для амплитудно-частотной характеристики получим:

$$W_{\text{вы}}(\omega) = - \frac{\omega K_n / I_0}{V(\mu^2 - 1)^2 + 4D_{01}^2 \mu^2} \quad (13)$$

где $\mu = \omega_{01} / \omega = T_0 / T$, $T_0 = 2\pi / \omega_{01}$; T — период сейсмических колебаний.

В стационарных сейсмометрах типа СГК и СВК $D_{01} \geq 0,45$, $\omega_{01} \geq 0,5$ с $^{-1}$. Из выражения (13) следует, что выходная э. д. с. измерительной обмотки пропорциональна скорости перемещения почвы в сейсмическом диапазоне частот. Для получения сигнала, пропорционального перемещению почвы, выходную э. д. с. e_n необходимо интегрировать. Наиболее целесообразно применение электронного интегратора на базе операционного усилителя (ОУ). Учитывая, что длительность непрерывной работы сейсмометров очень большая, при наличии

в ОУ напряжения смещения нуля и ее дрейфа получится нежелательное накопление погрешности на выходе интегратора. Для уменьшения этой погрешности необходимо производить периодическую установку нуля ОУ и применять активный полосовой низкочастотный фильтр по схеме Рауха. Передаточная функция такого фильтра (рис. 2) определяется выражением [2]:

$$W_{\Phi}(p) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2 p^2 + [R_2 + R_3(i + R_2/R_1)] C_2 p + 1}. \quad (14)$$

При $R_1 = R_2 < 0,001 R_3$ получим:

$$W_{\Phi}(p) = -\frac{R_2}{R_3} \cdot \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \cdot \frac{1}{p^2 + 2D_{\Phi} \omega_{\Phi} p + \omega_{\Phi}^2}, \quad (15)$$

где

$$\omega_{\Phi} = 1/\sqrt{\tau_1 \tau_2}; \quad \tau_1 = R_2 C_1; \quad \tau_2 = R_3 C_2; \quad T_{\Phi} = 2\pi \sqrt{\tau_1 \tau_2}; \quad D_{\Phi} = \sqrt{\tau_2/\tau_1}.$$

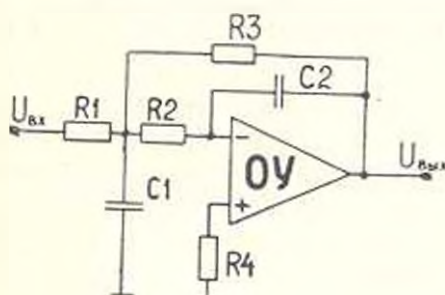


Рис. 2.

Амплитудно-частотную характеристику этого фильтра можно представить в виде:

$$W'_{\Phi}(\omega) = \frac{K_{\Phi}}{\sqrt{1 + (u_{\Phi} - 1/u_{\Phi})^2 + 4D_{\Phi}^2}}, \quad (16)$$

где

$$K_{\Phi} = -\frac{1}{2\omega R_1 C_2}; \quad u_{\Phi} = \omega_{\Phi}/\omega = T_{\Phi}/T_{\Phi}.$$

При подключении этого фильтра к измерительной обмотке СИ для передаточной функции и амплитудно-частотной характеристики сейсмометра с фильтром получим:

$$W_c(p) = -\frac{p^2 \left(\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\tau_1 \tau_2} \right) \cdot K_u/I_0}{(p^2 - 2D_{ст} \omega_{ст} p + \omega_{ст}^2) (p^2 + 2D_{\Phi} \omega_{\Phi} p + \omega_{\Phi}^2)}, \quad (17)$$

$$W_c(\omega) = \frac{K_u/I_0 \cdot 1/2R_1 C_2}{\sqrt{(u^2 - 1)^2 + 4D_{ст}^2} \cdot \sqrt{1 + (u_{\Phi} - 1/u_{\Phi})^2 + 4D_{\Phi}^2}}, \quad (18)$$

Из этого выражения следует, что коэффициент передачи (увеличение) сейсмомера с активным фильтром будет:

$$K_0 = K_n / I_0 R_1 C_2 \quad (19)$$

При гальванометрической регистрации частотная характеристика сейсмографа определяется выражением [1]:

$$U(\omega) = \frac{V_0}{\sqrt{(1 - u^2)^2 + 4D_0^2 u^2} \sqrt{1 + \xi}} \quad (20)$$

где $\xi = (1/u_1 - u_2)^2 / 4D_1^2$; $u_1 = T_\infty / T_1$; D_1 ; T_1 — соответственно, коэффициент успокоения и период собственных колебаний гальванометра; V_0 — увеличение сейсмографа.

Выражение (20) отличается от (18) вторым членом знаменателя. Для сейсмометров СГК и СВК $T_0 = 12,5$ с, $T_1 = 1,2$ с, $D_0 = 5$, следовательно, при $0,2 \text{ с} < T_\infty < 10$ с получим $0,016 < u < 0,8$, $0,16 < u_1 < 8,3$ и $0,36 < \xi < 0,65$. Принимая для фильтра $D_\phi = 10$, $T_\phi = 2$ с ($\tau_1 = 56$ мс, $\tau_2 = 5,6$ с), получим $0,092 < (u_\phi - 1/u_\phi)^2 / 4D_\phi^2 < 0,245$.

Сравнивая выражения частотных характеристик сейсмометров с активным фильтром (18) и гальванометрической регистрацией (20), приходим к выводу, что сейсмометр с активным фильтром имеет сравнительно лучшую частотную характеристику и широкие возможности по регулировке параметров сейсмометрического канала.

При синусоидальном колебании почвы $x = x_m \sin \omega t$, амплитуда выходной э. д. с. e_m будет:

$$e_m = \frac{K_n \omega X_m}{I_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - u^2)^2 + 4D_0^2 u^2}}, \quad (21)$$

где $\omega = 2\pi / T_\infty$.

На основании этого выражения для СГК-3 при $K_n \approx 1,75$ В·с/рад, $I_0 = 27$ см, $T_\infty = 10$ с, $X_m = 10^{-3}$ мм, получим $e_m = 5$ мкВ. Это значение является минимальным, которое необходимо регистрировать. Следовательно, максимально допустимое значение суммарного сигнала помехи на входе фильтра должно быть не более 1,5 мкВ. Наибольшее значение выходного напряжения СГК-3 (при $T_\infty = 0,1$ с, $X_m = 5$ мм) будет около 2 В.

Для коэффициента передачи сейсмометра СГК-3 с фильтром получим:

$$K_0 = 6,48 / 2R_1 C_2, \text{ мВ/мм.}$$

Для повышения точности преобразования весь диапазон измерений целесообразно разбить на два поддиапазона — от 0,001 до 0,070 мм и от 0,070 до 5 мм. Тогда для этих поддиапазонов получим, соответственно, $K_{01} = 140$ В/мм и $K_{02} = 2,0$ В/мм ($R_1 C_1 = 23$ мкс и $R_1 C_2 = 1,62$ мс соответственно). Для построения фильтра при входных сигналах не менее 3 мкВ наиболее целесообразно применять ОУ типа МЛ14806.

Применение фильтра дает возможность непосредственного преобразования значения смещения почвы в цифровой код с помощью аналого-цифрового преобразователя среднего быстродействия и ввода кодированного результата в ЭВМ с целью хранения сейсмограмм в цифровом запоминающем устройстве. При этом возможна параллельная обработка сейсмической информации для определения координат эпицентра и силы землетрясения. Имеется также возможность непосредственного наблюдения сейсмического сигнала на экране электронного осциллографа в процессе землетрясения.

ЕрПН им. К. Маркса

10. IX 1982

Գ. Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ, Օ. Վ. ԼԵՈՆԻՎ, Ա. Ս. ՇԱՀՎԱԾՅԱՆ

ԱՆՏԻՎ ՀԻՄՏՐՈՎ ՀԻ Կ ԵՎ ՀԵԿ ՏՐՈՒ ՍԵՅՍՄՈՄԵՏՐԵՐԻ ՓՈԽԱՆՑՄԱՆ ՀՈՒՆԱՑԻԱՆԵՐԸ ԵՎ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

Ա. Վ. Գ. Լ. Ս. Վ.

Դիտարկվում են սեյսմոմետրի փոխանցման ֆունկցիաները: Որոշվել է ելքային լարման և հանդստացման փափույթի շղթայի դիմադրության ազդեցությունը սեյսմոմետրի դինամիկական պարամետրերի վրա: Դիտարկվել է չափման կանաչում ակտիվ ֆիլտր մտցնելու հարցը: Որոշվել է կանաչի փոխանցման ֆունկցիան ակտիվ ֆիլտրի առկայության դեպքում, ստացվել են բանաձևեր կանաչը ամպլիտուդա-հաճախականային բնութագրի և ուժեղացման հաշվարկի համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР, южн. ред. Арани-вич З. Н. /— М.: Наука, 1974.— 213 с.
2. Марше Ж. Операционные усилители и их применение.— М.: Энергия, 1974.— 216 с.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. И. КУЛЕШОВ, Р. Г. АКОПЯН

ОБ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ РАССТОЯНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФАР В ЗОНЕ РАСКРЫВА

В связи с широким применением крупноапертурных антенных решеток, граница дальней зоны которых находится на весьма большом расстоянии от антенны, повысился интерес к методам определения характеристик антенн по результатам измерений в ближней зоне. Одним из перспективных направлений являются методы измерения характеристик антенн с качанием луча в динамическом режиме [1—4].

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с ограничением минимально допустимых расстояний при измерениях динамических характеристик антенн с качанием луча в зоне раскрыва.

При измерениях, проводимых в зоне раскрыва ФАР, возникают ошибки, которые увеличиваются при уменьшении расстояния от антенны до измерительного зонда. Рассматриваемые в работе ограничения относятся к методам измерения динамической диаграммы направленности с помощью неподвижного зонда, т. е. измерению в фиксированном направлении зависимости поля от времени в режиме электрического сканирования антенны. Эти ошибки обусловлены отличием полей, излучаемых в различных направлениях, определяемым направленными свойствами излучателей ФАР и самого измерительного зонда.

Рассмотрим линейную эквидистантную антенную решетку. Предположим, что A_{i0} , φ_{i0} — соответственно, амплитуда и фаза i -го излучателя при условии полной симметричности поля излучения каждого излучателя, т. е. полагаем, что решетка состоит из идеально направленных, невзаимодействующих излучателей.

При измерении динамической ДН в дальней зоне амплитудно-фазовое распределение реальной антенны можно отождествить с идеальным случаем, а в зоне раскрыва ФАР поля излучения отдельных излучателей уже не являются идеальными сферами. Отметим, что отличие величины поля излучения в данном направлении от этой же величины в идеальном случае связано с изменением амплитудно-фазового распределения.

Запишем амплитуду и фазу реального излучателя в виде $A_i = A_{i0} + \delta A_i$ и $\varphi_i = \varphi_{i0} + \delta \varphi_i$. Тогда сигнал на выходе зонда, непод-

вяжно установленного в зоне раскрыва ФАР, можно записать в виде [5]:

$$f_p(t) = \sum_{i=1}^{N^2} (A_{i0} + \delta A_i) \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \cdot e^{j(\omega_0 - \omega)t} \cdot e^{j\varphi_i} \quad (1)$$

где p — поле излучения в зоне раскрыва; N , i — количество и номер излучателя; r_i — расстояние от i -го излучателя до зонда; A_i — комплексная амплитуда поля i -го излучателя; k — волновое число; v , ω_0 — обобщенная угловая скорость сканирования и частота излучения.

Из выражения (1) следует, что сигнал на выходе зонда имеет дискретный спектр:

$$F_p(\omega) = (A_{i0} + \delta A_i) e^{j\varphi_i} \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \quad (2)$$

Для восстановления ДП в дальней зоне на выходе измерительного зонда подключается фильтр с коэффициентом передачи

$$k_p(\omega) = \frac{r_i e^{\frac{\omega_i - \omega_0}{v}} \sin \Theta_0}{e^{-jkr_i}} = \frac{r_i e^{j\varphi_{i0}}}{e^{-jkr_i}} \quad (3)$$

Тогда спектр сигнала после фильтрации имеет вид:

$$F(\omega_i) = F_p(\omega_i) k_p(\omega_i) = (A_{i0} + \delta A_i) e^{j(\varphi_{i0} + \varphi_i)} \quad (4)$$

Для того, чтобы получить поле излучения антенны в дальней зоне, необходимо совершить преобразование Фурье над спектром сигнала антенны:

$$f_0 = F\{A_{i0} e^{j\varphi_{i0}}\} = \quad (5a)$$

для идеального случая;

$$\begin{aligned} f &= F\{(A_{i0} + \delta A_i) e^{j(\varphi_{i0} + \varphi_i)}\} = F\{A_{i0} e^{j(\varphi_{i0} + \varphi_i)}\} + F\{\delta A_i e^{j(\varphi_{i0} + \varphi_i)}\} = \\ &= f_0 \otimes F\{e^{j\varphi_i}\} + F\{\delta A_i e^{j\varphi_i}\} \otimes F\{e^{j\varphi_{i0}}\} = \end{aligned} \quad (5)$$

для реального случая.

В общем случае δA_i и $\delta \varphi_i$ являются функциями амплитуды и угла, характеризующего направление на измерительный зонд, а также фазы и угла:

$$\delta A_i = A_{i0} \Psi(\alpha_i); \quad \delta \varphi_i = \varphi_{i0} \xi(\alpha_i) \quad (6)$$

Рассмотрим вид функций $\Psi(\alpha_i)$ и $\xi(\alpha_i)$. Предположим, что элементарными излучателями в решетке являются либо рупоры, либо от-

крытые концы волноводов, либо вибраторы и т. п. Для таких элементов характерным угловым размером, приближенно совпадающим с шириной ДН по уровню половинной мощности, является $\Theta_i = \lambda/D_1 \cos \alpha_i$, где D_1 — поперечный размер излучателя; α_i — направление.

Диаграмму излучателя в окрестности максимума, обычно соответствующего направлению $\alpha_i = \pi/2$, можно описать квадратичной зависимостью [6]:

$$F(\alpha_i) \approx 1 - 0,3 \left[\frac{2(\alpha_i - \pi/2)}{\Theta_i} \right]^2. \quad (7)$$

Отклонение от максимума на угол $\alpha_i - \pi/2 = \Theta_i/4$ приводит к уменьшению уровня излучаемого поля на 7,5%.

С другой стороны, угловая зависимость идеального излучателя есть $F_n(\alpha_i) = 1$. Тогда естественно предположить, что

$$\Psi(\alpha_i) = \frac{F_n(\alpha_i) - F(\alpha_i)}{F_n(\alpha_i)} = 0,3 \left[\frac{2(\alpha_i - \pi/2) D_1 \cos \alpha_i}{\lambda} \right]^2. \quad (8)$$

Если $D_1 = n\lambda$, где $n = 1, 2, \dots$, то получим:

$$\Psi(\alpha_i) = 1,2n^2(\alpha_i - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_i. \quad (9)$$

Функцию $\Psi(\alpha_i)$ можно либо положить равной с функцией $\Psi(\alpha_i)$ (фазовая и амплитудная диаграммы элементарного излучателя идентичны), либо положить $\Psi(\alpha_i) = 0$, т. е. считать, что фазовые диаграммы реального и идеального излучателей совпадают. Для элементарных излучателей с практически пренебрежимо малой погрешностью принято считать фазовую диаграмму излучателя идеальной. В связи с этим рассмотрим второй случай и поле излучения антенны запишем в виде:

$$f = f_0 + f_0 \otimes F |\Psi(\alpha_i)| = f_0 + f_0 \otimes F |1,2(\alpha_i - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_i| \quad (10)$$

или

$$f = f_0 + \delta f.$$

где $\delta f = f_0 \otimes F |1,2(\alpha_i - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_i|$.

Если задана точность измерения ДН ϵ , то очевидно:

$$\left| \frac{f - f_0}{f_0} \right| \leq \epsilon \quad \text{или} \quad \left| \frac{\delta f}{f_0} \right| = \left| \frac{f_0 \otimes F |\Psi(\alpha_i)|}{f_0} \right| \leq \epsilon. \quad (11)$$

Для заданной величины ϵ из (11), определяем значение $\alpha_{\max}$.

Тогда минимально допустимое расстояние до ФАР определится как

$$R_{\min} \geq \frac{D}{2tg \alpha_{\max}}, \quad (12)$$

где D — длина антенной решетки.

Рассмотрим ограничения на R с учетом направленных свойств не только излучателей ФАР, но и самого измерительного зонда. Очевидно, что возникнут амплитудные и фазовые ошибки измеряемой величины поля, связанные с неидеальностью (несферичностью) ДН измерительного зонда. Пусть в качестве зонда используются элементы поперечного типа. Тогда ДН зонда в окрестности максимума с пренебрежимой погрешностью можно описать квадратичной зависимостью типа (7). (ДН идеального зонда есть $F_n(\alpha_i) = 1$). С учетом неидеальности измерительного зонда измеряемая нами ДН может быть представлена в виде:

$$f' = f + f \otimes F\{\Psi(\alpha_i)\},$$

где $f = f_0 + \delta f$ — поле излучения антенны с учетом неидеальности излучателей.

С другой стороны:

$$\Psi(\alpha_i) = \frac{F_n(\alpha_i) - F(\alpha_i)}{F_n(\alpha_i)}. \quad (13)$$

Если в качестве измерительного зонда использовать элемент с $D_1 \approx \lambda$, где D_1 — поперечный размер зонда, выражение (13) переписывается в виде:

$$\Psi(\alpha_i) = 1,2(\alpha_i - \pi/2)^2 \cos^2 \alpha_i. \quad (14)$$

С учетом поправок на неидеальность излучателей антенной решетки и измерительного зонда, для заданной точности измерения ДН ϵ можем записать следующее:

$$\left| \frac{f' - f_0}{f_0} \right| \leq \epsilon \quad (15)$$

или

$$\begin{aligned} & \left| \frac{f + f \otimes F\{\Psi(\alpha_i)\} - f_0}{f_0} \right| = \\ & = \left| \frac{f_0 + f_0 \otimes F\{\Psi(\alpha_i)\} + (f_0 + f_0 \otimes F\{\Psi(\alpha_i)\}) \otimes F\{\Psi(\alpha_i)\} - f_0}{f_0} \right| \leq \epsilon. \end{aligned} \quad (16)$$

После несложных преобразований выражение (16) можно привести к виду:

$$\left| \frac{f_0 \otimes F\{2\Psi(\alpha_i) + \Psi^2(\alpha_i)\}}{f_0} \right| \leq \epsilon. \quad (17)$$

Аналогично (11) для заданного ϵ из выражения (17) вычисляем $\alpha_{\max}$ и согласно (12) определяем $R_{\min}$.

Расчет величины погрешности измерения динамической ДН в зависимости от расстояния между зондом и испытуемой антенной получен путем моделирования задачи на ЭВМ. Задавалось минимально допу-

стимое значение величины R и по формуле (12) определялось значение a_{max} , а затем по (14) — функция $\Psi(\alpha_i)$. После этого с помощью алгоритма БПФ вычислялись значения функции $F[2\Psi(\alpha_i) + \Psi^2(\alpha_i)]$. Поле излучения антенны $f_0 = F[\varphi(\alpha_i)]$, где $\varphi(\alpha_i) = \text{const}$, вычислялось аналогично. Далее, по формуле (17) определялись значения погрешностей ϵ_i для каждого направления α_i , где $-N/2 \leq i \leq N/2$, и полученные результаты сравнивались с заданной предельной величиной ϵ . Если выяснялось, что в результате анализа сопротивления погрешностей не достигалась заданная точность измерения динамической ДН, то с определенным шагом (10) увеличивалось исходное значение величины R . Описанным способом на ЭВМ определялись погрешности ϵ для различных значений величины раскрытия антенны D , в частности, от $D = 100^\circ$ до $D = 250^\circ$. Нижнее предельное значение R принималось равным D .

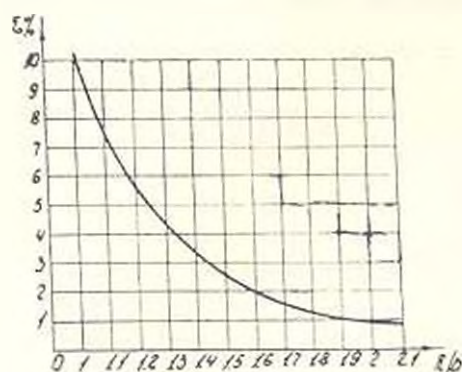


Рис. Зависимость погрешности восстановления динамической ДН от величины отношения расстояния между ФАР и измерительным зондом к размеру раскрытия ФАР.

Полученные результаты обобщены и представлены на рисунке. Как видно из графика, с учетом погрешностей дискретизации погрешность восстановления динамической ДН, возникающая из-за

неидеальности элементарных излучателей антенной решетки и измерительного зонда, не зависит от длины волны λ излучаемого поля, а определяется величиной отношения R/D . Кроме того погрешность практически не зависит от величины динамического диапазона измеряемого поля излучения и, соответственно, динамического диапазона восстановления ДН. Исследования проводились до уровней от -20 дБ до -60 дБ через -10 дБ.

ВНИИРИ

15.VI 1982

Վ. Բ. ԿՈՒՆԵՇՈՎ, Խ. Դ. ՇԱԿՈՐՅԱՆ

ԲԱՅՎԱՆՔԻ ԿՈՏՈՒՄ ՅԱԶԱՎՈՐՈՒՄ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ԲԼՈԹԱԿՐԵՐԻ ԶԱՓՄԱՆ ԵՎԱԶԱԿՈՒՅՆ ՀԵՌԱՎՈՐՈՒԹՅԱՆ ՈՍՇԼԱՆԱՓԱԿՄԱՆ ԽԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Դիտարկված են անտեննային ցանցի բաղադրի զուտում չափված վերականգնված ուղղորդված դինամիկական դիսպրսիոն սխալները, որոնք պայմանավորված են ցանցի ճառագայթիչների և չափող զոնդի ուղղիչ հատկություն-

ներով: Ստացված է չափող դինամիկական դիագնոստի սխալի կախվածությունը անտենային ցանցի և չափող զոնդի հեռավորությունից: Թվային արդյունքները ստացված են հաշվիչ մեքենայի վրա խնդրի մոդելավորման եղանակով:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Помомирѣв Н. Г. Диаграммы направленности антенн с качающейся дугой.— Радиотехника и электроника, 1962, 7, с. 949—955.
2. Арори Р. К., Агариал В. Г. Переходные процессы при радиосвязи с фазированными антенными решетками.— ТИИЭР, 1974, 62, № 7, с. 192—193.
3. Мартиросян С. М., Кулишев В. И. Дальномерная антенна с качающейся дугой.— Изв. АН АрмССР, Физика, 1978, 13, с. 211—216.
4. Мартиросян С. М., Кулишев В. И. Промежуточные итоги работы с качающейся дугой.— Изв. АН АрмССР, Физика, 1980, 15, с. 168—173.
5. Мирков Г. Т., Сизонова Л. М. Антенны.— М.: Энергия, 1973.— 528 с.
6. Айзенберг А. Г. Измерение в зоне Френеля диаграммы направленности антенных решеток методом фокусирования.— Радиотехника, 1976, т. 31, № 10, с. 35—40.

ГИДРАВЛИКА

Օ. Վ. ТОҚМАДЖАН

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ БОКОВОГО ВОДОСЛИВА
В НЕПРИЗМАТИЧЕСКОМ РУСЛЕ

Гидравлический расчет канала с боковым водосливом согласно [1] приводится к решению системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dh}{dl} &= \frac{i_0 - \frac{Q^2}{C^2 \omega^2 R} - \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} \frac{d\omega}{dl} - \frac{(2-\alpha) \alpha Q}{g \omega^3} \frac{dQ}{dl}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3}}; \\ \frac{dQ}{dl} &= -m \sqrt{2g} (h-P)^{3/2}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где P — высота порога водослива; Q — переменный расход в канале; m — коэффициент бокового водослива; α — коэффициент изменяющихся масс, остальные обозначения общепринятые.

В [2] дается аналитическое решение задачи при прямоугольной форме призматического канала с допущением $i_0 = i_{гп} = \frac{Q^2}{K^2}$. Для общих случаев расчета (непризматический канал с произвольной формой поперечного сечения и гребня водослива, без допущения $i_0 = i_{гп}$) решение задачи можно получить путем численного интегрирования на ЭВМ.

Преобразуем систему дифференциальных уравнений (1) для линейно суживающегося канала прямоугольной формы. Геометрические и гидравлические параметры будут:

$$\begin{aligned} b &= b_1 - \gamma l; & \gamma &= \frac{b_1 - b_2}{l_n}; & \omega &= h(b_1 - \gamma l); & \alpha &= b_1 - \gamma l - 2(h - P); \\ R &= \frac{(b_1 - \gamma l)h}{\gamma_1 - \gamma l + 2(h - P)}; & C &= \frac{1}{n} R^{2/3}; & y &= 1.3 \sqrt{n}; \\ \frac{d\omega}{dh} &= B = b_1 - \gamma l; & \frac{d\alpha}{dl} &= -\gamma. \end{aligned} \quad (2)$$

Учитывая эти преобразования, получим:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{t_0 - \frac{Q^2 n^2}{(b_1 - \eta l)^2 h^2} \left| \frac{h_1 - \tau l + 2(h - P)}{(b_1 - \eta l) h} \right|^{1+\alpha} - \frac{a Q^2 \eta}{g (b_1 - \eta l)^3 h^2}}{1 - \frac{a Q^2}{g} \frac{1}{(b_1 - \eta l)^2 h^3}} + \frac{(2 - a) a Q m \sqrt{2g} (h - P)^m}{g (b_1 - \eta l)^2 h^2} + \frac{1}{1 - \frac{a Q^2}{g} \frac{1}{(b_1 - \eta l)^2 h^3}};$$

$$\frac{dQ}{dl} = -m \sqrt{2g} (h - P)^{m-1}. \quad (3)$$

При расчете бокового водослива обычно решается обратная задача: при известных гидравлических параметрах канала, заданного в конце водосливного участка расхода Q_1 , сбросного расхода Q_2 , определяется длина фронта водослива и, в зависимости от режима движения, глубина в начале или в конце водослива. Ниже рассматривается решение прямой задачи, т. е. при известных гидравлических характеристиках и длины водосливного фронта, а также расхода Q_1 , определяется сбросной расход Q_2 и строится кривая свободной поверхности в водосливной зоне.

При бурном режиме движения потока граничными условиями будут начальный расход Q_1 и глубина в начальном сечении h_1 , которая диктуется гидравлическими условиями канала до водослива.

Интегрируя систему (1), можно найти кривую свободной поверхности, расход жидкости в конце водосливного участка Q_2 и расход, сбрасываемый через водослив, равный $Q_s = Q_1 = Q_2$. Исследования [2-4]

показывают, что при бурном режиме движения кривая продольного профиля свободной поверхности потока — вогнутая кривая спада.

На рис. 1 и в табл. 1 представлены координаты свободной поверхности линейно суживающегося в плане бокового водослива с прямоугольным поперечным сечением при бурном режиме движения потока при следующих данных: $Q_1 = 24,61 \text{ м}^3/\text{с}$; $h_1 = 1,8 \text{ м}$; $b_1 = 2,9 \text{ м}$; $b_2 = 2,1 \text{ м}$; $P = \text{const} = 0,9 \text{ м}$; $n = 0,02$; $t_0 = 0,012$; $t_n = 6,7 \text{ м}$; $m_n = 0,42$.

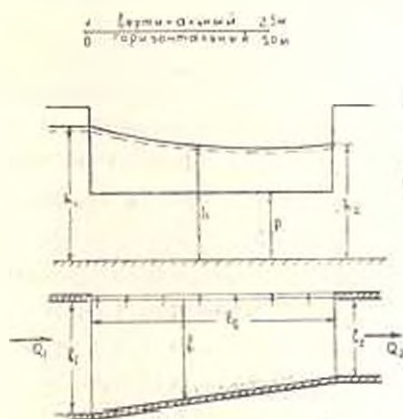


Рис. 1.

При спокойном режиме движения потока граничными условиями будут конечный расход Q_2 и глубина в конечном сечении водосливного участка h_2 , которая диктуется гидравлическими условиями канала после водослива.

Выше по течению глубина потока уменьшается до h_1 . Она всегда меньше величины нормальной глубины h_{01} , соответствующей расходу Q_1 и больше критической глубины в этом сечении. Это объясняется тем, что начало водосливного участка является частичным провалом для подходного участка канала. При полном провале $h_1 = h_{кр}$. Имея h_1 , строится кривая свободной поверхности типа «в» в подходной зоне канала.

Таблица 1

$l, м$	0	1	2	3	4	5	6	6,7
$h, м$	1,8	1,702	1,652	1,621	1,601	1,587	1,577	1,57
$Q, м^3/с$	21,61	23,16	21,89	20,72	19,61	18,53	17,48	16,7

Прямую задачу в этом случае предлагаем решить методом подбора. Задаваясь произвольным значением Q_2 , решением системы (1), определяется Q_1 . Строится кривая

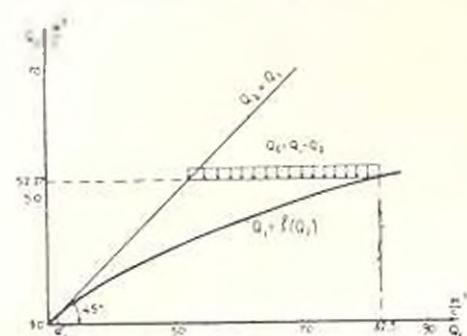


Рис. 2.

$Q_1 = f(Q_2)$ и по ней определяется Q_2 , соответствующий данному начальному расходу Q_1 , и сбросный расход $Q_2 = Q_1 - Q_0$. Кривая свободной поверхности, соответствующая определенному расходу Q_2 , будет расчетным.

Кривая $Q_1 = f(Q_2)$ имеет следующую структуру (рис. 2). При возрастании Q_2 от нуля до некоторого Q_2' она сливается с линией,

проведенной под углом 45° , которую назовем линией постоянного расхода. В этом интервале движение жидкости в канале происходит ниже гребня водослива. В дальнейшем, она нагибается в сторону оси Q_1 . Определенному расходу $Q_1 > Q_1'$ соответствует расход $Q_2 < Q_2'$. Промежуток от точки кривой, соответствующей Q_1' , до линии постоянного расхода будет сбросной расход через водослив.

Нами произведено численное решение на ЭВМ системы дифференциальных уравнений (3). В табл. 2 приведены результаты вычислений при значениях $a = 1$ и $a = 0$. Анализируя полученные результаты, приходим к выводу, что практическое совпадение расчетных опытных данных происходит при $a = 1$.

Пример. Определить сбросный расход бокового водослива при спокойном режиме движения, линейно суживающегося в плане канала прямоугольного поперечного сечения, допуская, что в конечном сечении водосливного участка определяется нормальная глубина, для следующих начальных условий: $Q_2 = 82,5 м^3/с$; $b_1 = 11 м$; $b_2 = 7 м$; $P = const = 2,8 м$; $i_0 = 0,00068$; $n = 0,02$; $l_0 = 16,3 м$.

Таблица 2

$l_0 = 0,00033, \quad b_1 = 0,604 \text{ м}, \quad P = 0,254 \text{ м}, \quad m_n = 0,42, \quad n = 0,02$			
$b_2 = 0,2013 \text{ м}, \quad h_2 = 0,377 \text{ м},$ $l_0 = 1 \text{ м}, \quad Q_1 = 0,0254 \text{ м}^3/\text{с}$		$b_2 = 0,4027 \text{ м}, \quad h_2 = 0,311 \text{ м},$ $l_0 = 2 \text{ м}, \quad Q_2 = 0,0552 \text{ м}^3/\text{с}$	
$a = 0$	$h_1 = 0,3513 \text{ м}, \quad Q_1 = 0,09056 \text{ м}^3/\text{с}$	$h_1 = 0,2945 \text{ м}, \quad Q_1 = 0,0933 \text{ м}^3/\text{с}$	
$a = 1$	$h_1 = 0,371 \text{ м}, \quad Q_1 = 0,1026 \text{ м}^3/\text{с}$	$h_1 = 0,3071 \text{ м}, \quad Q_1 = 0,1026 \text{ м}^3/\text{с}$	
по опытам [3]	$h_1 = 0,371 \text{ м}, \quad Q_1 = 0,1022 \text{ м}^3/\text{с}$	$h_1 = 0,3 \text{ м}, \quad Q_2 = 0,1022 \text{ м}^3/\text{с}$	

Решая систему дифференциальных уравнений (3), методом подбора строим кривую $Q_1 = f(Q_2)$, (рис. 2, табл. 3) и по ней определяем $Q_2 = 52,27 \text{ м}^3/\text{с}$, соответствующий расходу $Q_1 = 82,5 \text{ м}^3/\text{с}$, и сбросный расход $Q_s = 30,23 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 3

$Q_2, \text{ м}^3/\text{с}$	38	45,06	48,64	55,95
$Q_1, \text{ м}^3/\text{с}$	42,026	60,416	71,076	94,602

Интегрируя систему (3) при граничных условиях $h_2 = h_{02} = 3,8 \text{ м}$, которая соответствует расходу $Q_2 = 52,27 \text{ м}^3/\text{с}$, можно найти кривую свободной поверхности в водосливном участке.

ЕрIII им. К. Маркса

18. IV 1982

Հ. Վ. ԹՈՐՈՍՅԱՆ

ԿՈՂԱՅԻՆ ԶՐԱԹԱՓԻ ՀԻՄՆԱՎԻԿԱՆԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՈՉ ՊԻՋՄԱՏԻՎ ՀՈՒՆԵՐՈՒՄ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. ի. մ.

Գծաչին նեղացող և կողաչին ջրախոփ ունեցող ջրանցքի հաշվարկի համար ստացված է դիֆերենցիալ հավասարում: Հանդարտ շարժման դեպքում կողաչին ջրաթափի հիդրավիկական հաշվարկը առաջարկվում է կատարել $Q_1 = f(Q_2)$ կորի կառուցման օգնությամբ: ԷՀՄ-ի միջոցով դիֆերենցիալ հավասարման ինտեգրման թվային լուծումները համեմատված են փորձերի արդյունքների հետ: Շեղումները զորոնականում աննշան են, երբ $a = 1$:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Справочник по гидравлическим расчетам/Под ред. П. Г. Киселева. — М.: Энергия, 1972. — 312 с.
2. Наноян Х. А. Примеры гидравлических расчетов водопропускных сооружений — Киев: Будівельник, 1975. — 148 с.
3. Руднен С. С. Боковые водосбросы. — М.—Л.: Энергиздат, 1941. — 120 с.
4. De Marchi C. Saggio di teoria del funzionamento degli stramazza laterali (o sfioratori longitudinali). — L'Energia Elettrica, 1931, № XI.
5. Engles H. Mitteilungen aus dem Dresdener Flussbau-laboratorium, Forschungsarbeiten aus dem Gebiete des Ingenieurwesens. Berlin — Verlag VDI. — 1917.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

В. В. МЕНЬШИКОВ, Б. С. ЭЛЬКИН

МЕТОД РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
 В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ АППАРАТАХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ
 КОНВЕКЦИЕЙ

В исследовании температурных режимов радиоэлектронных аппаратов (РЭА) кассетной конструкции на интегральных схемах (ИС) с герметичным кожухом [1] предполагалось, что источники тепла (ИТ) распределены по всем платам равномерно, зазоры между платами и скорости воздуха во всех каналах одинаковы. При определении скорости воздуха взаимное влияние каналов не учитывалось, а также предполагалось, что зазор между нагретой зоной и корпусом РЭА достаточно велик. В данной работе предполагается, что расходы и температурные

поля воздуха в каналах различны, а расположение ИТ является произвольным.

Нагрев ИС вызывает движение воздуха (рис.). Предположим, что переток тепла по плате и корпусу отсутствует. Пусть число плат равно $N+2$, из них первая и последняя не имеют источников тепла и служат для эффективной организации движения воздуха. Соответственно, число вертикальных каналов равно $N+3$, а верхних горизонтальных каналов равно нижним: $N+2$. Предполагаем течение воздуха в каждом из каналов ламинарным и установившимся,

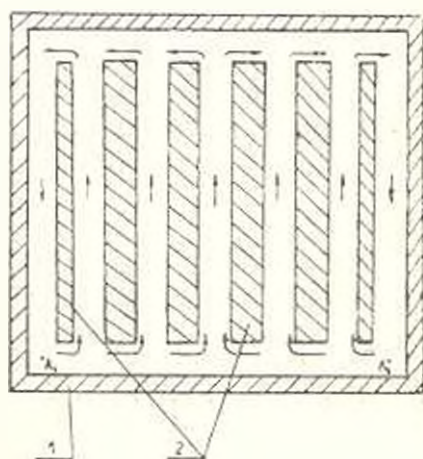


Рис. 1 — корпус РЭА, 2 — плата.

направление вектора скорости параллельным оси канала, давление в любой точке заданного поперечного сечения канала одним и тем же, а местные сопротивления пропорциональными скорости течения.

Решение краевой задачи $v'' = -1$, $v(0) = v(\delta) = 0$ пропорционально полю скоростей в канале толщиной δ , т. е. поле скоростей определяется по формуле $V_i = K_i v_i$ ($i = 1, \dots, 3N+7$), где K_i — не-

известные коэффициенты. Положительным для скорости в вертикальных каналах примем направление вверх, а в горизонтальных — слева направо. Уравнения неразрывности при введенных выше допущениях сводятся к системе из $2N + 5$ линейных алгебраических уравнений для K_i . С учетом сделанных предположений уравнения Навье-Стокса в каждом из каналов заменяются одним уравнением [2]:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu(T(z)) \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + K_z, \quad (1)$$

где x, z — соответственно, координата, перпендикулярная оси канала и совпадающая с положительным направлением вектора скорости; μ — коэффициент динамической вязкости; K_z — проекция массовой силы на ось z ; V — скорость воздуха. В горизонтальных каналах $K_z = 0$, а в вертикальных — $K_z = \pm \rho(T(z))g$. Здесь T — температура воздуха, g — ускорение силы тяжести.

Предположим, что нам известны температурные поля воздуха в каналах. Интегрируя (1) по $N + 2$ замкнутым контурам, получим еще $N + 2$ линейных алгебраических уравнений для K_i . Преобразуя полученные уравнения и исключая ряд неизвестных, приходим к системе:

$$\begin{cases} K_1 = \chi_1 K_2 + v_1; \\ K_{N+2} = \chi_2 K_{N+1} + v_2; \\ A_i K_{i-1} - C_i K_i + B_i K_{i+1} = -F_i \quad (i = 2, \dots, N+1), \end{cases} \quad (2)$$

причем

$$0 < \chi_1 < 1, \quad 0 < \chi_2 < 1, \quad A_i > 0, \quad B_i > 0, \quad C_i > A_i + B_i. \quad (3)$$

Получена система $N + 2$ линейных алгебраических уравнений с $N + 2$ неизвестными. Элементы матрицы системы (2) удовлетворяют условиям (3), поэтому для ее решения можно использовать метод прогонки, являющийся прямым и наиболее эффективным способом для решения систем подобного вида.

Предположим, что задано поле скоростей в каналах, т. е. известны коэффициенты K_i ($i = 1, \dots, 3N + 7$) и по ним определяются расходы воздуха в каналах b_i . Если коэффициент $K > 0$, то направление движения воздуха в соответствующем канале совпадает с принятым выше положительным направлением, в случае $K < 0$ движение осуществляется в противоположном направлении. Температурное поле в каналах описывается решением задачи (4), (5) в каналах, граничащих с корпусом:

$$a_i T_i'(z) + \phi_{cp}^i T_i(z) = a_{cp}^i u_{cp} + Q_i(z); \quad T_i(0) = T_i^0, \quad (4)$$

и во внутренних вертикальных каналах:

$$a_i T_i(z) = Q_i(z); \quad T_i(0) = T_i^0. \quad (5)$$

Здесь $a_i = b_i c_i$; c_i — удельная теплоемкость воздуха при средней температуре воздуха в канале; T^0 — температура воздуха на входе в канал; z — координата, совпадающая с направлением движения воздуха; α'_p — приведенный коэффициент теплоотдачи от воздуха в канале к окружающей среде, учитывающий теплоотдачу от воздуха к корпусу, от корпуса к окружающей среде и тепловое сопротивление корпуса; $Q_i(z)$ — тепловой поток к воздуху в канале от соседней платы; t_{cp} — температура окружающей среды.

В рассматриваемых задачах неизвестны температуры T^0 , поэтому задачи (4), (5) не могут быть решены без состыковки температур на входах и выходах из каналов. Предположим, что направления воздушных потоков совпадают с направлениями, изображенными на рис. В этом случае смена направлений движения воздуха в вертикальных каналах происходит два раза. Под системой опорных точек будем понимать точки, обладающие следующим свойством: задавшись произвольными значениями температур в этих точках и решая задачи (4), (5), можно однозначно определить температурные поля в каналах. Число опорных точек равно числу смен направлений движения воздуха в вертикальных каналах. В рассматриваемом варианте в качестве опорных точек можно использовать, например, пару A_1, A_2 . Температура воздуха в местах слияния потоков из двух каналов определяется как среднееарифметическая

Зададимся температурами $T_{A_1} = T_{A_2}$. Решая задачи (4), (5), последовательно найдем температурные поля во всех каналах — $\bar{T}$. Зададимся температурами $\bar{T}_{A_1} = 1$, $\bar{T}_{A_2} = 0$ и $\bar{T}_{A_1} = 0$, $\bar{T}_{A_2} = 1$. Решая однородные уравнения (4), (5), последовательно найдем температурные поля во всех каналах — $\bar{T}_1$ и $\bar{T}_2$. В силу линейности искомого температурного поля в каналах можно представить в виде

$$\bar{T} = T + r_1 \bar{T}_1 + r_2 \bar{T}_2, \quad (6)$$

где r_1 и r_2 определяются из условия непрерывности поля в точках A_1 и A_2 .

Построим алгоритм задачи. Зададимся начальными значениями $K_i^{(0)}$ ($i = 1, \dots, 3N + 7$) и средними температурами воздуха в каналах для нахождения c_i . Выбрав систему опорных точек, найдем температурные поля во всех каналах. Затем находим коэффициенты $K^{(1)}$ во всех каналах. Положим в качестве первого приближения к искомым коэффициентам K в каналах

$$K^{(1)} = (1 - t) \bar{K}^{(1)} + t K^{(0)} \quad (0 \leq t < 1), \quad (7)$$

где параметр t служит для стабилизации итерационного процесса. Далее вычислительный процесс проводится рекуррентно и продолжается

до достижения необходимой точности. Сходимость предложенного итерационного процесса аналитически доказана на простых контурах для движущегося воздуха. В случае системы каналов, изображенной на рис. , сходимость процесса проверена путем численного эксперимента на ЭВМ. Из структуры алгоритма очевидно, что сходящийся итерационный процесс может приводить лишь к решению исходной задачи.

В случае нестационарного температурного поля на платах и корпусе рассматривается нестационарное уравнение теплопроводности. Выбираются узлы сетки по времени. Переход от n -го к $(n + 1)$ -му узлу по времени осуществляется следующим образом. Вначале определяется температурное поле плат и корпуса, используя температурное поле воздуха в n -й момент времени. По вышеописанному итерационному процессу определяется температурное поле воздуха, используя температурное поле плат и корпуса в $(n + 1)$ -й момент времени.

По предложенному методу были проведены расчеты. Для РЭА из 8 тепловыделяющих плат, на каждой из которых выделялась одинаковая суммарная мощность, неравномерно распределенная по плате, при обычных теплофизических характеристиках были получены различные расходы воздуха в вертикальных каналах. Отношение наибольшего расхода к наименьшему равно 1,169.

ХГУ им. А. М. Горького

18 IV 1982

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры.— М.: Энергия, 1971.— 248 с.
2. Горбунцов Д. А., Меньшиков В. В., Элькин Б. С. Об одном методе решения систем алгебраических уравнений специального вида с большим числом неизвестных — Библиографический указатель ВИНТИ «Депонированные рукописи», № 7, 6/а 120, 1979, 21 с.

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

С. Г. КАРАМЯН, Б. М. ТАРЕЕВ, Б. Я. БРАНЗБУРГ

ЭКРАНИРОВАНИЕ КАБЕЛЕЙ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ ПЛЕНКОЙ

Процесс наложения медной оплетки в экранированных кабелях и проводах является одним из малопроизводительных технологических процессов в кабельной промышленности, а сама медная оплетка — одним из материалоемких элементов конструкции. Резкое повышение производительности изготовления экранов и большая экономия меди определяют работы по замене экранов из медной оплетки металлизированными пленками как весьма актуальные. К недостаткам медной оплетки следует отнести также отсутствие четкой теории расчета затухания экранирования в стадии разработки кабелей: неодинаковый контакт между отдельными проволоками, различная величина и ориентация просветов в оплетке приводят к сложной и непостоянной зависимости затухания экранирования A_e от частоты.

Чтобы выбрать конструкцию металлизированной пленки, необходимо рассчитать толщину металлического слоя и полимерной пленки и выбрать материалы, удовлетворяющие параметрам экранирования и гибкости кабеля.

Выбор толщины алюминиевой фольги, эквивалентной по эффективности экранирования медной оплетке, можно осуществить, известным методом расчета затухания экранирования для сплошных цилиндрических экранов [1]:

$$A_e = 20 \lg |ch \Gamma| / K I \delta B,$$

где l — толщина внешнего проводника; K — коэффициент вихревых токов.

Расчеты показали, что для частот 50 МГц и выше достаточно иметь алюминиевую фольгу толщиной 0,06 мм. При такой толщине алюминиевая фольга не обладает достаточной механической прочностью, поэтому необходимо усилить ее эластичными полимерными пленками.

Разработанная металлизированная пленка представляет собой полиэтилентерефталатную пленку толщиной 0,02 мм, склеенную с двух сторон алюминиевой фольгой марки А5-М толщиной 0,03 мм. Толщина клеевого слоя марки ТФ-82 составляет 0,006 ... 0,01 мм на каждую из сторон.

Двусторонняя металлизированная пленка имеет ряд преимуществ перед односторонней. Она более эластичная, что позволяет накладывать ее продольно по длине кабеля, надежнее при изготовлении и эксплуатации кабеля ввиду малой вероятности повреждения фольги с двух сторон в одном и том же месте пленки, создает электрический контакт между разносторонними слоями алюминиевой фольги в месте перекрытия, что важно для получения электрически более герметичного экрана. Продольное наложение металлизированной пленки позволяет резко повысить производительность изготовления экранов до 100 м/мин и выше, совместить технологические процессы наложения экрана и оболочки, повысить эффективность экранирования по сравнению со спиральным способом наложения [2].

Из двусторонней металлизированной пленки была изготовлена опытная партия радиочастотных кабелей марки РК 75-4-11.

Опытные образцы металлизированных пленок испытывались на длительное воздействие температур с целью определения их стойкости к различным температурным режимам, а также выяснения возможности разработки методики ускоренной оценки нагревостойкости. Длительность каждого цикла испытаний составляла 1000, 440 и 141 ч.

Предел прочности на растяжение σ_p убывает при длительном воздействии различных температурных режимов почти с одинаковой скоростью, от 115 до 95 МПа (рис. 1). Характер изменения относительного удлинения $\varepsilon_{отн}$ соответствует вышеуказанному при воздействии $+120^\circ\text{C}$ в течение до 400 ч, после чего начинается резкое снижение. В остальных температурных режимах (85 и 100°C) наблюдаются идентичность изменения контролируемых параметров и постоянство скорости старения металлизированных пленок.

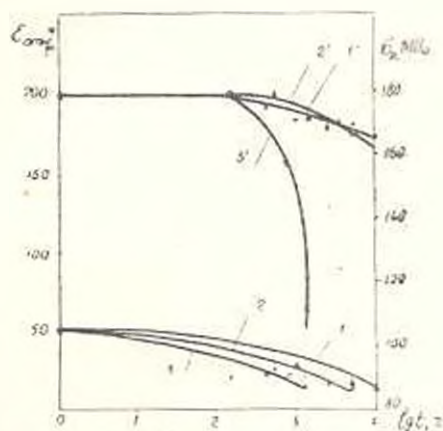


Рис. 1. Зависимость σ_p и $\varepsilon_{отн}$ от длительности воздействия температур $\lg t$: 1, 1' — $+85^\circ\text{C}$; 2, 2' — $+100^\circ\text{C}$; 3, 3' — $+120^\circ\text{C}$.

Испытания опытных образцов кабелей РК 75-4-11 с экраном из продольноналоженной двусторонней металлизированной пленки показали, что они по эффективности экранирования превосходят базисные изделия (табл.).

Результаты испытаний показали (рис. 2), что волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$, коэффициент затухания α , сопротивление связи $Z_{\text{св}}$ или затухание экранирования Λ , опытных образцов изменяются незначительно при длительном воздействии температуры $+85^\circ\text{C}$ в течение 10000 ч (минимальная наработка указанных кабелей по ГОСТ 11326.8-79). Значения коэффициента затухания приведены для 200 МГц.

Контролируемые параметры	РК 75-4-11	
	с экраном в виде медной оплетки	с экраном из металли- зированной пленки
Коэффициент затухания на частоте 200 МГц, дБ/м	0,11	0,09
Затухание экранирования, дБ	38	58

В указанном стандарте не предусмотрено требование стойкости радиочастотных кабелей к многократным перегибам. В связи с тем, что предполагалось ухудшение гибкости кабеля, а также с целью установления минимальных величин перегибов для различных видов экранов, проводились испытания кабелей на стойкость к многократным перегибам.

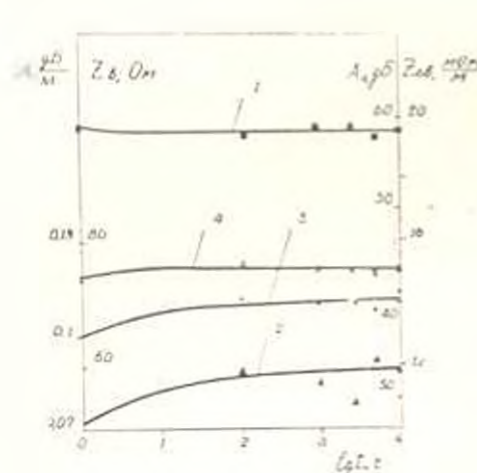


Рис. 2. Зависимость A_z (1), Z_a (2) и A_a (3) и Z_a (4) от длительности воздействия температуры $\lg t \rightarrow 55^\circ\text{C}$.

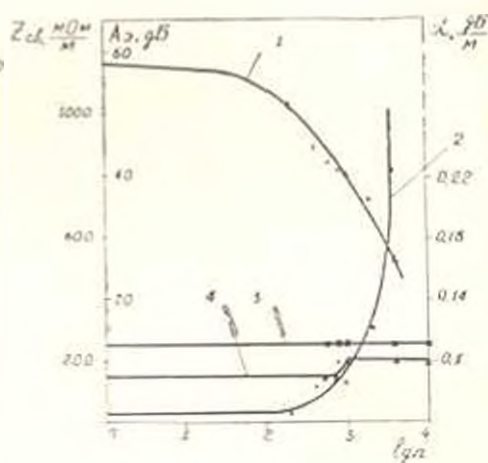


Рис. 3. Зависимость A_z (1), Z_a (2) и A_a (3) кабеля РК 75-4-11 с экраном из двусторонней металлизированной пленки и Z_a (4) базисного кабеля РК 75-4-11 от количества перегибов $\lg n$.

Коэффициент затухания у кабеля с экраном из медной оплетки после 6000 перегибов не изменился (рис. 3). У опытного образца после 200 перегибов наблюдается скачок коэффициента затухания от 0,09 до 0,1 дБ/м, после чего оставался стабильным в течение 6000 перегибов.

Это объясняется тем, что после 200 перегибов на поверхности алюминиевой фольги образуются трещины и ток в этих местах протекает только по луженому проводнику. При дальнейших перегибах кабеля размеры трещин увеличиваются без образования новых, поэтому коэффициент затухания в дальнейшем стабилизируется, а сопротивление связи продолжает увеличиваться и после 1000 перегибов превышает требуемую норму (200 мОм/м). Следовательно, целесообразно металли-

зирования пленки применять в конструкциях кабелей, которые при эксплуатации подвергаются не более, чем 500—600 перегибам.

Проведенные работы показали, что металлизированная пленка имеет ряд преимуществ по сравнению с медной оплеткой и может быть применена в качестве экрана кабелей и проводов, подвергающихся ограниченному количеству перегибов, например, таких, как кабели для коллективных телевизионных антенн типа РК с индексом АК, КППА, кабели управления марок КУПР, КУПВ с экранированными жилами и другие.

Ереванск. отд. ВНИИКИ

10 V 1982

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Белоруссон Н. И., Гроднев Н. И.* Радиочастотные кабели — М. Энергия, 1973.— 63 с.
2. *Гроднев Н. И., Серейчук К. Я.* Экранирование аппаратуры и кабелей связи — М. Связьиздат, 1960.— 198 с.

Բ Ո Վ Ա Ն Դ Ա Կ Ո Ւ Թ Յ ՈՒ Ն

էջ

ՇՐՈՒՐԱՐԱՐԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱ

- Ա. Պ. Կիրիլով, Ա. Վ. Սիմոսյան: Գինամիկական հոմոկուրգերի կրողանակության նպատակահարմար սպտոգրաֆումբը դուգակցված վնասվածքի դեպքում 3

Է Ն Ե Ր Կ Ե Տ Ի Կ Ա

- Ե. Հ. Էլմայան: Անշարժ զեկավորմամբ օպտիմիզացման մի խնդրի լուծումը դինամիկ ծրուդրամվուման մեթոդով 8

ԶԱՆՎԱԴԱԿԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ

- Վ. Կ. Բուսուլյան: Պատահական փոփոխվող զործակիցներով Մարկովյան զեկավարելի համակարգի սինթեզման մասին 13
- Ս. Պ. Սիբուլյան, Գ. Լ. Լանկուստյան: Ինչքիոն օրոնկոնների ծայրահեղ ղեկավարման ճնափոխված ավտոբիբմ ոչ զծային ստատիկական բնութագրի հորիզոնական տեղաշարժի առկայության դեպքում 21

ԶԱՓՈՂԱԿԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱ

- Գ. Լ. Արեշյան, Ս. Վ. Առնով, Ա. Ս. Շաղումյան: Անկտիվ ֆիլտրով ՀԿԴ և ՀԵԿ տիպի առյուսմետրի փոխոնցման ֆունկցիաները և դինամիկական բնութագրերը 26
- Վ. Լ. Կուլիշով, Ս. Վ. Հովսեփյան: Ուղղվածքի զոտում ֆազավորված ունտեննային ցանցի դինամիկական բնութագրերի լափման նվազագույն հեռավորության սահմանափակման մասին 32

Հ Ի Դ Բ Ա Վ Լ Ի Կ Ա

- Վ. Թովմասյան: Կողալին չբութարի փորմայինկական հաշվարկը ոչ պրիզմատիկ հուններում 33

ԳԻՏԱԿԱՆ ԵՈՒԹՐ

- Վ. Վ. Մեդվեդով, Ռ. Ս. Էլիլի: Ինական ղերմատոնղափոխումով ուղիունկետրոնային սարքերի կայունացված ղերմատոնային դաշտերի հաշվարկման մեթոդ 42
- Ս. Հ. Քառամյան, Ք. Մ. Տուրեև, Ռ. Յա. Ռաւեզրուրգ: Կարելների էկրանավորումը մետաղադատված թողունթներով 46

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

- А. П. Кириллов, А. В. Минасян* Рациональное использование несущей способности динамических систем при комбинационном повреждении 3

ЭНЕРГЕТИКА

- Ш. А. Элямян* Решение одной задачи оптимизации с запаздывающим управлением методом динамического программирования 9

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- В. К. Брутян* О синтезе марковских управляющих систем со случайно изменяющимися коэффициентами 13
- А. М. Мирзоян, Г. Л. Кантарджян* Модифицированный алгоритм экстремального управления инерционными объектами при наличии горизонтального дрейфа нелинейной статической характеристики 21

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Г. Л. Аресян, О. В. Леонов, А. С. Шахкелян* Передаточные функции и анализ динамических характеристик сейсмометров СГК и СВК с активным фильтром 26
- В. И. Кулешов, Р. Г. Аюлян* Об ограничениях на минимально допустимые расстояния при измерениях динамических параметров ФАР в зоне раскрытия 32

ГИДРАВЛИКА

- О. В. Токмаджян* Гидравлический расчет бокового подослива в непризматическом русле 38

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

- В. В. Меньшиков, Б. С. Элькин* Метод расчета стационарных температурных полей в радиоэлектронных аппаратах с естественной конвекцией 42
- С. Г. Карамян, Б. М. Таргев, Б. Я. Бранзбург* Экранирование кабелей металлизированной пленкой 46