

Журнал издается с 5.01.1943 г.

Выходит 6 раз в год

Կ Մ Ր Ա Դ Ր Ա Կ Ա Ն Կ Ո Ւ Ե Գ Ի Ա

Ռ. Մ. Մաքսիմովան (պատասխանատու խմբագիր), Վ. Վ. Ալեքսեևսկի,
Ի. Վ. Արսյան, Ռ. Ա. Ղուզարյան, Ս. Մ. Ղազարյան, Մ. Վ. Կառյան,
Ա. Հ. Սահակյան, Յու. Լ. Սարգսյան, Մ. Գ. Ստեփանյան (պատ. խմբ. տեղ.),
Ջ. Կ. Ստեփանյան (պատասխանատու փոխխմբագիր), Վ. Ս. Խաչատրյան:

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Բ. Մ. Մարտիրոսյան (ответственный редактор), Դ. В. Алексеевский,
Ի. В. Атоян, Р. А. Казарян, С. М. Казарян, А. В. Касьян,
А. О. Саскян, Ю. Л. Саргсян, М. Г. Степанян (зам. ответ редактора),
Ջ. Կ. Տեփանյան (ответственный секретарь), Բ. Ս. Խաչատրյան

УДК 621.313.333.3.018

Г. Л. АРТЕМЯН

ВИБРОНАДЕЖНОСТЬ ЩИТОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Для определения напряженно-деформированного состояния щитов решена задача поперечных колебаний кольцевых пластинок с тремя симметрично расположенными радиальными стрингерами. Решение уравнений колебаний построено методом последовательного разделения переменных с применением рядов по функциям Бесселя. Получены формулы расчета виброндежности щитов, приведены сравнительные результаты расчетов и экспериментальных исследований.

Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

Վահանիկների լարվածության-դեֆորմացիոն վիճակի որոշման համար լուծված է երեք համաչափ շառավղային ամրակցումներ ունեցող օղակաձև թիթեղի լայնական տատանման խնդիրը: Տատանման հավասարումների լուծումը կառուցված է փոփոխականների հաջորդական անջատման «եղանակով» կիրառելով բաց Բեսելի ֆունկցիաների շարքերի վերածման մեթոդը: Ստացված են վահանիկների թրթռահոսալիություն հաշվարկի բանաձևերը, բերված են հաշվարկային և փորձնական ուսումնասիրությունների համեմատման արդյունքները:

Вибрационная надежность—это свойство конструкции выполнять свое функциональное значение с сохранением выходных параметров в пределах установленных норм при их длительной эксплуатации в условиях вибрационных нагрузок. Щиты асинхронных двигателей малой мощности (АДММ) относятся к тем элементам, которые непосредственно воспринимают вибронгрузки эксплуатационной среды, в том числе сочленяемых с двигателями механизмов и агрегатов, в связи с чем виброндежность АДММ во многом обусловлена виброндежностью щитов. В работах [1—3] были рассмотрены задачи виброндежности роторов и контактных соединений АДММ. Базируясь на общей концепции решения задач виброндежности [4], ниже приводятся основные результаты исследований по расчетно-экспериментальной оценке виброндежности щитов АДММ. Задача сводится прежде всего к выбору наиболее приемлемой теоретической модели расчета напряженно-деформированного состояния щитов, с учетом, что с точки зрения их прочности и жесткости поперечные колебания являются более неблагоприятными, чем радиальные колебания. Исходя из особенностей конструктивного исполнения АДММ, в качестве адекватной динамической системы, имитирующей условия нагружения щитов, можно принять модель колебания кольцевой пластинки, усиленной тремя радиальными стрингерами, с заземленным наружным и нагруженным внутренним контурами (рис. 1). Дифференциальное уравнение колебания пластинки будет

$$\Delta^2 w + \frac{q}{D} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D h_0} \left[EI \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right] \Big|_{r=r_i} \cdot f(\theta) = 0, \quad (1)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$ — оператор Лапласа в полярных координатах, q — масса единицы объема пластинки, D — цилиндрическая жесткость пластинки, h_0 — ширина ребра, I — момент инерции сечения ребра, ρ — плотность материала ребра (для АДММ пластинки и ребра отливаются из одного и того же алюминиевого сплава), F — площадь поперечного сечения ребра, а последние слагаемые в левой части уравнения — соответственно упруго-восстанавливающая сила и сила инерции ребер; $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \frac{2}{3} \pi$, $\theta_3 = \frac{4}{3} \pi$.

$$f(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{при } \theta \in \left[\frac{2}{3} \pi i - \varphi, \frac{2}{3} \pi i + \varphi \right], \quad i = 0, 1, 2, \\ 2 & \text{при } \theta \in \left[\frac{2}{3} \pi i - \varphi, \frac{2}{3} \pi i + \varphi \right], \quad i = 0, 1, 2. \end{cases}$$

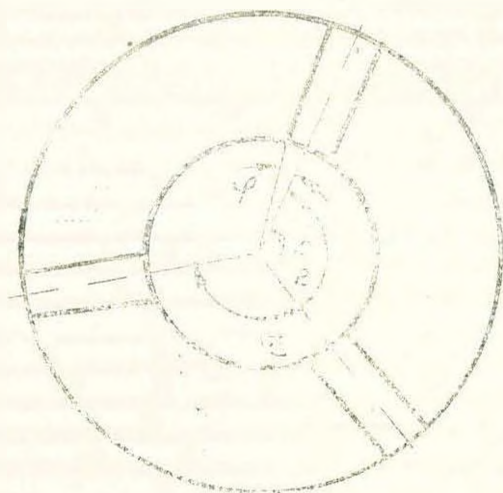


Рис. 1. Динамическая модель щитов АДММ.

Граничные условия задачи определяются из реальных условий закрепления щитов в двигателе

$$w|_{r=a} = 0, \quad w|_{r=b} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=a} = \alpha \cos \theta \cdot \sin \omega t, \quad (2)$$

где $2a$ и $2b$ — внутренний и наружный диаметры пластинки, α — угол в соответствии с рис. 2. Разлагая $f(\theta)$ в ряд Фурье

$$f(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^3 A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta, \quad (3)$$

решение уравнения (1) представится в виде

$$w(r, \theta, t) = W(r, \theta) \sin \omega t. \quad (4)$$

Подставив (4) в (1), получим

$$\Delta^2 W - \frac{q\omega^2}{D} W = - \sum_{i=1}^3 \frac{1}{Dh_0} \left[EI \frac{\partial^4 W}{\partial r^4} - qF\omega^2 W \right] \bigg|_{\theta=\theta_i} \cdot f(\theta). \quad (5)$$



Рис. 2. К выбору граничных условий задачи колебания шфта: 1 — шфт до изгиба, 2 — шфт после изгиба, 3 — ротор до изгиба, 4 — ротор после изгиба.

Решение уравнения (5) ищем методом последовательных приближений.

Нулевое приближение —

$$D \Delta^2 W_0 - q\omega^2 W_0 = 0. \quad (6)$$

Граничные условия (2) позволяют представить решение уравнения (6) в виде

$$W_0(r, \theta) = U_0(r) \cos \theta, \quad (7)$$

где

$$U_0(r) = A_0' J_1(kr) + B_0' N_1(kr) + C_0' I_1(kr) + D_0' K_1(kr), \quad (8)$$

$K^1 = \frac{q\omega^2}{D}$, а J_1 , N_1 и I_1 , K_1 соответственно функции Бесселя действительного и мнимого аргументов. Граничные условия (2) дают систему алгебраических уравнений для определения коэффициентов A_0' , B_0' , C_0' и D_0' .

Первое приближение — подставим в (7) в правую часть уравнения (5) и получим

$$\Delta^2 W_1 - k^4 W_1 = - \sum_{i=1}^3 \frac{1}{Dh_0} \left[EI \frac{\partial^4 U_0}{\partial r^4} - qF\omega^2 U_0 \right] \cos \theta_i \cdot f(\theta), \quad (9)$$

решение которого можно представить через функции Бесселя

$$W_1(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} R_{1n}(r) \cos n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} R_{2n}(r) \sin n\theta + V(r, \theta), \quad (10)$$

где

$$R_{jn} = A_{jn} J_n(kr) + B_{jn} N_n(kr) + C_{jn} I_n(kr) + D_{jn} K_n(kr), \quad (11)$$

при $j = 1$ и 2 , $n = 0, 1, 2 \dots$.

Частное решение $V(r, \theta)$ с учетом (3) представляется в виде

$$V(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} X_n(r) \cos n\theta + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(r) \sin n\theta, \quad (12)$$

где $X_n(r)$ и $Y_n(r)$ — соответственно частные решения уравнений

$$\begin{aligned} \Delta_n^2 R_{1n} - k^4 R_{1n} &= T_n(r), \quad n = 0, 1, 2 \dots, \\ \Delta_n^2 R_{2n} - k^4 R_{2n} &= Z_n(r), \quad n = 1, 2, 3 \dots, \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\Delta_n = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2}, \quad Z_n(r) = B_n \varphi(r), \quad (14)$$

$$T_n(r) = A_n \varphi(r) = A_n \sum_{i=1}^3 \frac{EI}{Dh_0} \left[\frac{\partial^4 U_0}{\partial r^4} - \chi^5 U_0 \right] \cos \theta_i.$$

Определение частного решения $Z_n(r)$ уравнения (13) осуществляется методом вариации постоянных с использованием функции Грина

$$X_n(r) = \int_a^b G_n(r, \xi) T_n(\xi) d\xi, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} G_n(r, \xi) = & \left[\frac{\Delta_{1n}(\xi)}{\Delta_n(\xi)} J_n(k\xi) + \frac{\Delta_{2n}(\xi)}{\Delta_n(\xi)} N_n(k\xi) + \right. \\ & \left. + \frac{\Delta_{3n}(\xi)}{\Delta(\xi)} I_n(kr) + \frac{\Delta_{4n}(\xi)}{\Delta(\xi)} K_n(kr) \right] U(r - \xi). \end{aligned}$$

Здесь $U(r - \xi)$ — единичная функция

$$U(r - \xi) = \begin{cases} 0, & r < \xi, \\ 1, & r > \xi, \end{cases}$$

$\Delta_n(\xi)$ — вронскиан от функций Бесселя n -го порядка J_n , N_n , I_n и K_n , а Δ_{1n} , Δ_{2n} , Δ_{3n} и Δ_{4n} — соответствующие миноры. Аналогичным образом определяются $Y_n(r)$.

Удовлетворение общего решения (10) граничным условиям (2) сводится к их удовлетворению для выражения $R_{1n}(r) + X_n(r)$, которые приведут к системе алгебраических уравнений для определения коэффициентов A_{1n} , B_{1n} , C_{1n} и D_{1n} . Аналогичным образом определяются A_{2n} , B_{2n} , C_{2n} и D_{2n} .

Отметим, что точное решение задачи сводится к линейным интегральным уравнениям, при этом ядром уравнений служит функция

Грина (15). Так как она ограничена ($\Delta_n > 0$), то применяемый метод последовательных приближений справедлив [5].

Напряжения σ_r и σ_0 при известном выражении прогиба можно определить по классическим соотношениям теории поперечного изгиба пластинок.

Вибронадежность щитов определяется как безотказность с точки зрения сохранения прочности за период наработки t с учетом, что предел выносливости материала щитов σ_{-1} снижается в процессе наработки [4]:

$$P(t) = \left\{ \sigma \leq \frac{\sigma_{-1}}{n_0} \exp(-2,5 \cdot 10^{-5} A t) \right\}, \quad (16)$$

где A — амплитуда ускорения вибрационной нагрузки в единицах g , $\sigma = \max(\sigma_r, \sigma_0)$. В частности, если в произвольный момент времени t величин σ и σ_{-1} имеют нормальные распределения, то для вероятности безотказной работы щитов $P(t)$ будем иметь

$$P(t) = 1 - \Phi \left[- \frac{\mu_{\sigma_{-1}} - \mu_{\sigma}}{\sqrt{\delta_{\sigma_{-1}}^2 + \delta_{\sigma}^2}} \right], \quad (17)$$

где Φ — функция нормального распределения Лапласа, а $\mu_{\sigma_{-1}}$, μ_{σ} и $\delta_{\sigma_{-1}}$, δ_{σ} — соответственно математические ожидания и средние квадратические отклонения величин σ_{-1} и σ .

Также получены формулы при произвольных сочетаниях плотностей распределений случайных величин σ_{-1} и σ — Вейбулла, логарифмически-нормальные, экспоненциальные, Рэлея и др.

Таблица

Тип двигателя	Вибронагрузка		$P(t=10000 \text{ ч})$	
	амплитуда ускорения A, g	частота $f, \text{Гц}$	расчетное	экспериментальное
4ААМ56	15	30	0,992	0,991
АИ63	15	30	0,999	0,997
АА50А16Н	40	100	0,998	0,998

Сравнение результатов расчетов и лабораторных испытаний (таблица) показали их высокую практическую сходимость. Изложенный метод запрограммирован на ЭВМ ЕС 1032, внедрен в НИИЭлектромаше и включен в общий алгоритм расчета надежности АДММ на стадии их проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемян Г. Л. К вопросу вибронадежности роторов асинхронных двигателей малой мощности // Изв. вузов. Электромеханика. — № 9. — 1989. — С. 43—49.
2. Артемян Г. Л. Вибронадежность роторов асинхронных двигателей малой мощности // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. — 1989. — Т. XLII, № 5. — С. 209—213.

3. Артемян Г. Л. Вибронадёжность контактных соединений асинхронных двигателей малой мощности//Изв. вузов. Электромеханика.—1990.—№ 3.—С. 34—39.
4. Артемян Г. Л. Вибрационная надёжность асинхронных двигателей малой мощности//Электротехника.—1990.—№ 8.—С. 19—23.
5. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа.—М.: Наука, 1921.—544 с.

НИИЭлектромаш

29. I. 1991

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLVI, № 1, 1993, с. 8—12.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791.052

Г. М. САРКИСЯН

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ БАЛКИ—ПРОТОТИПА СТЕБЛЕЙ РАСТЕНИЙ С ПЕРЕМЕННЫМ МОДУЛЕМ УПРУГОСТИ ПО ДЛИНЕ

Разработана методика расчета напряжений и деформаций при изгибных колебаниях консольной балки с переменным модулем упругости. Результаты исследования могут быть использованы для конструкций, имеющих балки и стержни с переменным модулем упругости при динамическом воздействии (мобильные машины, ядро жесткости высотных сооружений и др.).

Ил. 1. Библиогр.: 6 назв.

Մշակված է լայնական տատանումների դեպքում փոփոխական առաձգականության մոդուլ ունեցող կոնսոլային հեծանի լարումների և դեֆորմացիաների հաշվարկի մեթոդիկա: Հետադրական արդյունքները կարող են օգտագործվել փոփոխական մոդուլ ունեցող կոնսոլավորներում, որոնք ենթարկվում են դինամիկ ուժերի ազդեցությանը (շարժունակ մեքենաներ, բարձրահարկ շենքերի կոշտության միջուկներ և այլն):

Идея исследования консольной балки с переменным модулем упругости возникла в процессе бионического изучения стеблей растений, жесткость которых меняется от комля к вершине по определенным канонам [1—3]. Использование принципов строения стеблей растений, наиболее успешно сопротивляющихся механическим воздействиям внешней среды—ветру, атмосферным осадкам и др., приобретенных в течение длительной эволюции, представляет интерес и является перспективным.

Теоретические и экспериментальные исследования консольных балок с переменным модулем упругости по длине выявили их высокие динамические качества по сравнению с балками постоянного модуля упругости [4]. При этом переменная жесткость балок достигается не за счет изменения поперечного сечения, а изменением модуля упругости, причем, по закону, характерному для стеблей. Отметить, что сохранение поперечного сечения постоянным при переменной жесткости балки является целесообразным с конструктивной точки зрения.

Целью работы является разработка метода расчета напряжений и деформаций балок постоянного сечения с заданным переменным модулем упругости при вынужденных колебаниях.

Рассмотрим случай, когда свободный конец консольной балки совершает заданное горизонтальное движение $f(t)$ (рис.)

$$(y)|_{x=0} = f(t). \quad (1)$$

Изменение величины модуля упругости по длине балки описывается нижеследующей функцией:

$$E(\xi) = E_0 \left(a\xi + b + \frac{c}{\xi} \right), \quad (2)$$

где $\xi = \frac{x}{l}$ — безразмерная величина (отсчет от защемления), $a = 0,92$, $b = 0,0754$, $c = 0,0046$.

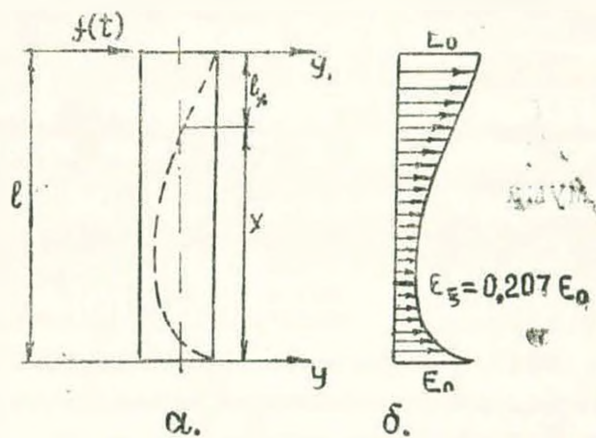


Рис. а) Схема нагружения балки. б) эпюра изменения модуля упругости по длине балки.

Дифференциальное уравнение поперечных колебаний такой балки представляется в виде [5]

$$\frac{\partial}{\partial \xi^2} \left[E(\xi) I \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] + \frac{A\gamma}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

где $E(\xi)I$ — изгибная жесткость в произвольном сечении, A — площадь поперечного сечения балки, γ — удельный вес, g — ускорение силы тяжести, а $\frac{A\gamma}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$ характеризует изменение интенсивности сил инерции вдоль балки.

Для решения поставленной цели воспользуемся методом Рэлея-Ритца [6]. Прогибы балки при колебании представим в виде

$$y(\xi, t) = \sum x_i(\xi) \cos pt, \quad (4)$$

где $x_i(\xi)$ определяет форму колебаний, а p — угловая частота.

Выражения наибольшей потенциальной и кинетической энергий имеют вид

$$V = \frac{1}{2} \int_0^1 E(\xi) [x_i'(\xi)]^2 d\xi, \quad T = \frac{p^2}{2g} A\gamma \int_0^1 [x_i(\xi)]^2 d\xi. \quad (5)$$

Приравняв эти энергии, находим

$$p^2 = \frac{Ig}{\gamma A} \frac{\int_0^1 E(\xi) [x_i'(\xi)]^2 d\xi}{\int_0^1 [x_i(\xi)]^2 d\xi}. \quad (6)$$

Наименьшее выражение (6) соответствует точному решению при определении частоты основной формы колебаний. Для приближенного решения форму кривой изгиба балки примем в виде ряда

$$x_i(\xi) = \sum a_i \varphi_i(\xi). \quad (7)$$

где каждая из функций $\varphi(\xi)$ удовлетворяет условиям на концах стержня. Совместно решая (6) и (7), после преобразований получаем условие минимума

$$\frac{\partial}{\partial a_i} \int_0^1 E(\xi) (x_i')^2 d\xi - \frac{\gamma A}{g} \frac{p^2}{I} \int_0^1 x_i^2 d\xi = 0. \quad (8)$$

Таким образом, задача сводится к определению таких значений постоянных a_i в выражении (7), которые обращают в минимум интеграл (8). Для нашего случая выражение прогибов должно удовлетворять следующим условиям на концах балки:

$$\left| E(\xi) I \frac{d^2 x_i(\xi)}{d\xi^2} \right| = 0, \quad \frac{d}{d\xi} \left| E(\xi) I \frac{d^2 x_i(\xi)}{d\xi^2} \right| = 0,$$

$$x_i(\xi)_{\xi=0} = 0, \quad \left| \frac{dx_i(\xi)}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 0.$$

Для этого разложим выражение кривой изгиба (7) в виде ряда

$$\xi_i(\xi) = \sum a_i \varphi_i(\xi) = a_1(\xi)^2 + a_2(\xi)^3 + \dots + a_n(\xi)^n. \quad (9)$$

Каждый член этого ряда и его производная по ξ обращаются в нуль при $\xi=0$, поэтому приведенные выше условия на концах балки можно считать удовлетворительными. В качестве первого приближения возьмем два члена ряда (9)

$$x_i(\xi) = a_1(\xi)^2 + a_2(\xi)^3$$

и подставляя в (8), получаем

$$\frac{\partial}{\partial a_n} \int_0^1 \{E(\xi) [a_1(\xi)^2 + a_2(\xi)^3]''\} a\xi = 0. \quad (10)$$

Выражение под интегралом обозначим через $\Phi(\xi)$

$$\Phi(\xi) = E_0 \int_0^1 \left\{ \left(a\xi + b + \frac{c}{\xi} \right) [a_2(\xi) + a_2(\xi)^3]'' \right\}^2 d\xi.$$

Пользуясь условиями $\frac{\partial \Phi(\xi)}{\partial a_1} = 0$ и $\frac{\partial \Phi(\xi)}{\partial a_2} = 0$, получим два линейных уравнения. Приравняв нулю определитель этих уравнений, находим величину p^2 . Меньшая из двух корней будет величиной угловой частоты. Для рассматриваемого случая после преобразований эта величина составляет

$$p = \sqrt{\frac{D}{A_1 l^3 (0,5a_1^2 + 0,33a_1a_2 + 0,14a_2^2)}}, \quad (11)$$

где

$$D = 4lgE_0 [a(0,5a_1^2 + 2,4a_1a_2 + 2,25a_2^2 + b(a_1^2 + 3,4a_1a_2 + 3a_2^2) + c(4,6a_2^2 + 6a_1a_2 + 4,5a_2^2)).$$

Для определения формулы прогибов используем метод Лагранжа-Ритца. При этом задача решается во втором приближении, т. е.

$$\begin{cases} a_1\delta_{11} + a_2\delta_{12} = \Delta_{1p}, \\ a_2\delta_{21} + a_2\delta_{22} = \Delta_{2p}. \end{cases} \quad (12)$$

В случае балки, заделанной одним концом и под действием сосредоточенной силы на другом, имеем следующие выражения коэффициентов:

$$\delta_{11} = \frac{4E_0l}{l^2} \left(\frac{al^2}{2} + bl + 4,6c \right), \quad \delta_{22} = \frac{18E_0l}{l^3} (0,5al^2 + 0,66bl + c), \quad (13)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{12E_0l}{l^3} (0,33al^2 + 0,5Bl + c), \quad \Delta_{1p} = \Delta_{2p} = p.$$

Совместно решая (12) и (13), после преобразований получаем

$$a_1 = \frac{pl^3}{8EI} k_1, \quad a_2 = -\frac{pl^3}{8EI} K_2,$$

где

$$k_1 = \frac{2,45 + 3b + 3c}{0,12a^2 + 0,75b^2 + 11,72c^2 + 0,75ab + 6,61ac + 9,31bc},$$

$$k_2 = \frac{a + b - 1,6c}{0,12a^2 + 0,75b^2 + 11,72c^2 + 0,75ab + 6,61ac + 9,31bc}.$$

Коэффициенты k_1, k_2 при выбранном характере изменения модуля упругости по длине балки согласно формуле (2) и при $a=0,92$, $b=0,0754$, $c=0,0046$ равны: $k_1=14,12$ и $k_2=4,71$.

Тогда упругая линия изгиба балки выразится уравнением

$$y = -\frac{Pl^2}{8EI} (14,12\bar{x}^2 + 4,72\bar{x}^3) \cos pt. \quad (14)$$

Выражения изгибающих моментов и поперечных сил по длине балки при поперечном колебании, полученные из уравнения изогнутой оси балки, имеют вид

$$M_{(x,y)} = 0,25Pl (k_1 - 3k_2\bar{x}) \cos pt, \quad Q_{(x,y)} = -0,75Pa_2 \cos pt. \quad (15)$$

Предлагаемая методика расчета может быть использована для конструкций, имеющих балки или стержни с переменным модулем упругости, работающих при динамическом воздействии (мобильные машины, ядро жесткости высотных сооружений и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисян Г. М., Хуришудян Н. П. Архитектоника камыша озерного // Биол. журн. Армении.—1988.—№ 2 (41).—С. 137—142.
2. Саркисян Г. М., Хуришудян Н. П. Архитектоника стебля подсолнечника // Биол. журн. Армении.—1989.—№ 7 (42).—С. 659—662.
3. Саркисян Г. М., Хуришудян Н. П. Архитектоника стеблей кукурузы и сорго // Биол. журн. Армении.—1990.—№ 7 (43).—С. 578—582.
4. Саркисян Г. М. Применение консольных стоек с переменным модулем упругости // Тракторы и сельхозмашины.—1992.—№ 5.—С. 29—33.
5. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле.—М.: Наука, 1967.—386 с.
6. Протусевич И. Я. Вариационные методы в строительной механике.—М.: ОГИЗ 1948.—412 с.

АрмСХИ

10. VI. 1991

УДК 631.2:459.2

Р. С. МИНАСЯН, С. Г. ЧУНГУРЯН

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ РАБОЧИХ ОРГАНОВ РЫХЛИТЕЛЕЙ ПРИ ИЗГИБЕ В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ К НАПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЯ

Разработан метод динамического расчета рабочего органа почвообрабатывающей машины с учетом свойств обрабатываемой среды. Решение сведено к интегрированию дифференциального уравнения колебания с переменными коэффициентами и осуществлено вариационным методом Бубнова-Галеркина.

Библиогр.: 1 назв.

Մշակված է հողափրկելիս աշխատող բանվորական մասի դինամիկական հաշվարկի մեթոդ, հաշվի առնելով մշակվող միջավայրի հատկությունները: Լուծումը բերվում է տասանման փոփոխական զործակիցներով դիֆերենցիալ հավասարման վերաբերման և այն իրականացվում է Բուբնով-Գալյորկինի փոփոխականի մեթոդով:

Увеличение рабочих скоростей почвообрабатывающих машин приводит к возникновению ускорений движущихся масс, претерпевающих резкие изменения во времени, в особенности при работе на тяжелых почвах, богатых каменными включениями. В этих условиях отдельные детали, узлы и рабочие органы машины находятся под воздействием значительных динамических нагрузок, что требует специального подхода при их конструировании и расчетах на прочность и жесткость.

В настоящей работе сделана попытка приближенного динамического расчета рабочих органов почвообрабатывающих машин (котовых плугов, рыхлителей и др.) с учетом свойств обрабатываемой среды. При этом, поскольку наибольшую опасность для прочности рабочего органа представляет изгиб в плоскости наименьшей жесткости, рассматривается случай его внезапной встречи с препятствием в плоскости, перпендикулярной к направлению движения.

Примем, что рабочий орган представляет собой жестко защемленную с недеформируемой рамой машины консольную балку переменного сечения. Отнеся начало координат к центру тяжести свободного конца консоли, законы изменения геометрической жесткости погонной массы по длине рабочего органа запишем в виде

$$J(x) = J \left(\frac{x}{l} \right)^4; \quad m(x) = m \left(\frac{x}{l} \right)^3,$$

где m — масса рабочего органа, J — момент инерции сечения в защемлении.

Свойства обрабатываемой среды (почвы) будем характеризовать коэффициентом постели, принимая аналогично грунтам линейное из-

менение его в зависимости от глубины обрабатываемой толщи $k(x) = -k\left(1 - \frac{x}{l}\right)$. Решение задачи сведем к интегрированию дифференциального уравнения свободных колебаний рабачего органа

$$[EJ(x) \omega''']'' + k(x) \omega - m(x) \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где ω — уравнение упругой линии.

Принимая гармонический закон колебаний $\omega = \omega(x) \cos \theta t$, уравнение (1) перепишем в виде

$$[EJ(x) \omega''(x)]'' + k(x) \omega(x) - m(x) \omega(x) \theta^2 = 0, \quad (2)$$

где θ — частота свободных колебаний.

Выбрав функцию прогибов в виде

$$\omega(x) = \left(a_1 + a_2 \frac{x}{l} + a_3 \frac{x^2}{l^2} + \dots\right) \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 = \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(x), \quad (3)$$

поставим условие, чтобы она удовлетворяла всем граничным условиям задачи:

$$\omega(l) = \omega'(l) = 0, \quad [EJ(0) \omega(0)]'' = [EJ(0) \omega(0)]''' = 0,$$

тогда для решения обыкновенного дифференциального уравнения (2) с переменным коэффициентом можно применить метод Бубнова-Галеркина. Уравнение частот найдем, раскрыв определитель (4) относительно θ_n^2

$$\begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} & \dots & \delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \delta_{n3} & \dots & \delta_{nn} \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

Единичные коэффициенты δ_{in} , входящие в (4), определяются с помощью выражений вида

$$\delta_{in} = \int_0^l [EJ(x) \varphi_i''']'' \varphi_n + k(x) \varphi_i \varphi_n - m(x) \varphi_i \varphi_n \theta_n^2] dx - \bar{m} \theta_n^2 \varphi_{i0} \varphi_{n0}. \quad (5)$$

Подставив в (5) значения $J(x)$, $k(x)$ и $m(x)$, получим

$$\begin{aligned} \delta_{in} = \int_0^l \left\{ \left[EJ \left(\frac{x}{l} \right)^4 \varphi_i'' \right]'' \varphi_n + k \left(1 - \frac{x}{l} \right) \varphi_i \varphi_n - \right. \\ \left. - m \left(\frac{x}{l} \right)^2 \varphi_i \varphi_n \theta_n^2 \right\} dx - \bar{m} \theta_n^2 \varphi_{i0} \varphi_{n0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Совместно решив (3) и (6), запишем

$$\delta_{11} = \frac{EJ}{l^3} \left(\frac{4}{5} + \frac{\lambda}{6} \right) - \epsilon^2 \left(\frac{ml}{105} + \bar{m} \right), \quad \delta_{12} = \frac{EJ}{l^3} \left(\frac{2}{5} + \frac{\lambda}{70} \right) - m \frac{6^2 l}{280},$$

$$\delta_{22} = \frac{EJ}{l^3} \left(\frac{12}{35} + \frac{1,67}{280} \lambda \right) - m \frac{6^2 l}{630}, \dots,$$
(7)

где $\lambda = kl^4/EJ$, $\bar{m}$ — масса рабочего органа, приведенная к его свободному концу.

Подставив найденные значения единичных коэффициентов по (7) в частотное уравнение (4) для первого приближения ($\delta_m = 0$), получим

$$\epsilon_1^2 = \frac{EJ}{l^3} \cdot \frac{\alpha}{\beta}. \quad (8)$$

Для второго приближения ($\delta_{11} \cdot \delta_{22} - \delta_{12}^2 = 0$) получим

$$\epsilon_2^2 - \frac{B}{A} \epsilon_1^2 + \frac{C}{A} = 0, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{ml}{630} \beta - \left(\frac{ml}{280} \right)^2, \quad B = \frac{EJ}{l^3} \left(\alpha \frac{ml}{630} + \beta \epsilon - \gamma \frac{ml}{140} \right),$$

$$C = \left(\frac{EJ}{l^3} \right)^2 (\alpha \epsilon - \gamma^2), \quad \alpha = \frac{4}{5} + \frac{\lambda}{6}, \quad \beta = \frac{ml}{105} + \bar{m},$$

$$\gamma = \frac{2}{5} + \frac{\lambda}{70}, \quad \epsilon = \frac{12}{35} + \frac{1,67}{280} \lambda.$$

Для определения наибольшей амплитуды колебания примем, что на рабочий орган действует сила $P = P_0 \sin \psi t$, тогда дифференциальное уравнение упругой линии запишется в виде

$$[EJ(x) \omega(x)']' - m(x) \omega(x) \psi^2 - \sum \bar{m} \psi^2 \omega(0) + k(x) \omega(x) = -q(x). \quad (10)$$

Совместное решение (3), (10) и интегрирование по длине рабочего органа дает

$$\int_0^l \{ [EJ(x) \sum a_i \varphi_i']' \varphi_n + \sum k(x) a_i \varphi_i \varphi_n - \sum m(x) \psi^2 a_i \varphi_i \varphi_n \} dx -$$

$$- \sum \bar{m} \varphi_{i0} \varphi_{n0} \psi^2 = - \int_0^l q(x) \varphi_n(x) dx = \sum p_i \varphi_n(x). \quad (11)$$

Для определения неизвестных коэффициентов a_i решим канонические уравнения

(12)

$$\delta_{in} = \int_0^l \left\{ \left[EJ \left(\frac{x}{l} \right)^4 \varphi_i'' I'' \right] \varphi_n + k \left(1 - \frac{x}{l} \right) \varphi_i \varphi_n - m \left(\frac{x}{l} \right) \varphi_i \varphi_n \dot{\psi}^2 \right\} dx - \bar{m} \dot{\psi}^2 \varphi_{i0} \varphi_{n0},$$

$$\Delta_{ap} = P_0 \varphi_{a0}.$$
$$a_1 = P_0 l^3 / (EJ_2 - \bar{m} \omega^2 l^3),$$
$$\begin{aligned} a_1 \delta_{11} + a_2 \theta_{12} &= \Delta_{1p} \\ a_1 \delta_{21} + a_2 \delta_{22} &= \Delta_{2p} \end{aligned}$$
$$a_1 = P_0 l^3 \varepsilon / [(aEJ - m\psi^2 l^3) \varepsilon - EJ\gamma^2], \quad a_2 = P_0 l^2 \gamma / [(aEJ - m\psi^2 l^3) \varepsilon - \gamma^2 EJ].$$
$$\omega(x) = P_0 l^3 \left(1 - \gamma \frac{x}{l} \right) \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 / [(x EJ - \bar{m} \dot{\psi}^2 l^3)], \quad (13)$$

При внезапной встрече с препятствием воздействие на рабочий орган носит ударный характер. Определение силы удара требует нахождения величины импульса, периода действия силы и закона изменения его во времени в зависимости от упругих свойств самой конструкции и места удара. Эту зависимость можно получить экспериментально (с помощью осциллографирования, скоростной киносъемки и др.), однако в практических расчетах его можно заменить равновеликим прямоугольником, исходя, например, из равенства наибольших ординат, т. е. считать, что сила P_0 прикладывается внезапно и остается постоянной в течение периода [1]. Тогда очевидно, что наиболее опасным будет мгновенный импульс, при котором $P_s = \pm \theta S = \pm Q_0 T^0 = m \theta v$, где P_s — статическая сила, эквивалентная данному импульсу по своему динамическому воздействию.

$$\mu = P_3/Q = \bar{m}Qv/Q,$$

где v —скорость движения почвообрабатывающей машины, Q —вес препятствия и рабочего органа, приведенные к точке удара.

Имея значение μ , легко определить величину силы удара и динамического прогиба рабочего органа $P_d = \mu P_0$, $\omega_d = \mu \omega(x)$.

Подставив значение $\omega(x)$ из (13) при $x = 0$, получим

$$\max \omega_d = \mu \omega_{\max} = \frac{6 \bar{m} \omega}{Q} \cdot \frac{P_0 l^3}{EJ} \left[\frac{\varepsilon}{\gamma^2 - (\alpha - \bar{m} \psi^2 l^3 / EJ)} \right].$$

Зная величины P_d и $\max \omega_d$, можно произвести расчет на прочность и жесткость рабочих органов почвообрабатывающих машин на изгиб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минасян Р. С., Чунгурян С. Г. Сопротивление почвы при резании.—Ереван: Луйс, 1992.—91 с.

АрмСХИ

15. XI. 1992

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLVI, № 1, 1993, с. 17—20

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.5.01.013

В. Н. НЕРСЕСЯН, К. Б. БЕРБЕРЯН

СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ЗАДАНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА

По заданным значениям показателей качества (σ — перерегулирование, t_m — время достижения первого максимума, t_v — время управления) переходного процесса предлагается машинный метод расчета параметров корректирующих устройств астатических линейных САУ и контроля правильности полученных результатов.

Библиогр.: 3 назв.

Հստ անցողիկ գործընթացի որակի տրված ցուցանիշների արժեքների (σ — վերակարգափորում, t_m — առաջին առավելագույնին հասնելու ժամանակ, t_v — կառավարման ժամանակ), առաջարկվում է ապաստարիկ գծային ԱԿՀ-ների ճշտող սարքերի պարամետրերի հաշվարկի և ստացված արդյունքների ճշտության ստուգման մեթոդական եղանակ:

Рассматривается синтез астатических линейных систем автоматического управления (САУ), имеющий целью выбор корректирующего устройства (КУ), обеспечивающего требуемые показатели качества САУ. Будем искать такое КУ, чтобы соответствующая ему передаточная функция разомкнутой САУ приобрела вид

$$W(s) = \frac{k(T_2 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)}, \quad (1)$$



а передаточная функция и характеристическое уравнение замкнутой САУ были соответственно

$$\Phi(s) = \frac{k(T_2 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)(T_4 s + 1) + k(T_2 s + 1)}, \quad (2)$$

$$F(s) = s^4 + \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4}\right)s^3 + \left(\frac{1}{T_3 T_1} + \frac{1}{T_1 T_4} + \frac{1}{T_3 T_4}\right)s^2 + \frac{1 + kT_2}{T_1 T_3 T_4}s + \frac{k}{T_1 T_3 T_4} = 0, \quad (3)$$

где k — заданный коэффициент усиления, а T_1 , T_2 , T_3 и T_4 — неизвестные постоянные времени.

Воспользуемся методом производной аргумента (МПА) [1]. Подставим в (3) $s = j\omega$, выделим вещественную и мнимую части и найдем их производные по ω . Тогда можно записать

$$R(\omega) = \frac{d}{d\omega} [\arg F^*(j\omega)] = \frac{UV' - U'V}{U^2 + V^2} = \sum_{m=1}^4 \frac{-\delta_m}{\delta_m^2 + (\omega - \omega_m)^2}, \quad (4)$$

где $s_m = -\delta_m \pm j\omega_m$ — корни многочлена $F(s)$, а

$$U = \operatorname{Re} F(j\omega), \quad V = \operatorname{Im} F(j\omega),$$

$$U' = dU/d\omega, \quad V' = dV/d\omega.$$

Траектории движения корней s_m характеристического уравнения (3) при изменении коэффициента усиления k легко проследить, используя правила метода корневого годографа (МКГ) [2]. Согласно МКГ корень $s_1 = -\delta_1$ при увеличении k стремится по вещественной оси комплексной плоскости к введенному нулю $N = -1/T_2$ и компенсируется им. Другой корень, находящийся на вещественной оси $s_4 = -\delta_4$, при возрастании k стремится к $-\infty$. Пара же комплексных корней $s_{2,3} = -\delta_2 \pm j\omega_2$ при возрастании k приближается к мнимой оси и оказывает преобладающее влияние на качество переходного процесса в САУ. При этом перерегулирование, время первого максимума и продолжительность процесса управления можно оценить формулами [3]

$$\sigma \approx e^{-\delta_2 t_{\max}}, \quad t_{\max} \approx \pi/\omega_2, \quad t_y \approx 3/\delta_2. \quad (5)$$

Если заданы значения σ , $t_{\max}$ и t_y , из выражений (5) можно определить значения корней $s_{2,3} = -\delta_2 \pm j\omega_2$. Корни s_1 и s_4 можно расположить достаточно далеко от $s_{2,3}$ так, чтобы их влияние было минимальным, например, $\delta_1 = 10\delta_2$ и $\delta_4 = 100\delta_2$. Выбрав значения s_1 , $s_{2,3}$, s_4 , можно определить значение постоянной времени T_2 при заданном коэффициенте усиления k . Из (4) при $\omega = 0$ находим

$$R(0) = -\frac{V'}{U} = \frac{1}{\delta_1} + \frac{2\delta_2}{\delta_1^2 + \omega_2^2} + \frac{1}{\delta_4} = T_2 + \frac{1}{k}.$$

Введение нуля $N = -1/T_2$ означает излом и прохождение логарифмической амплитудной характеристики (ЛАХ) вблизи частоты среза с наклоном 20 дБ/дек , что вытекает из требования приемлемости качества переходного процесса. Частота среза при этом равна

$$L_{\text{ср}} = \frac{\hbar T_2}{T_1} \quad (6)$$

и может быть определена аналитически при расчете модуля передаточной функции разомкнутой САУ, которую можно представить через уже известные значения корней s_1, s_2, s_3, s_4 и T_2

$$\Phi(s) = \frac{k(T_2 s + 1)}{(s - s_1)(s - s_2)(s - s_3)(s - s_4) - k(T_2 s + 1)},$$

где $k = \delta_1 \delta_3 (\delta_2^2 + \omega_2^2)$.

Частота среза $L_{\text{ср}} = \omega_{\text{ср}}$ — это частота, при которой выполняется равенство

$$\text{mod } \Phi(j\omega_{\text{ср}}) = 1.$$

Затем из (6) определяется постоянная времени T_1 . Оставшиеся неизвестные T_3 и T_4 определяются из системы уравнений (на основе формул Виста)

$$\begin{cases} \delta_1 \delta_3 (\delta_2^2 + \omega_2^2) = \frac{k}{T_1 T_3 T_4}, \\ \delta_1 + \delta_3 + 2\delta_2 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4}. \end{cases}$$

Зная T_1, T_2, T_3 и T_4 , а также передаточную функцию (1), легко можно определить требуемое КУ, передаточная функция которого определяется сравнением желаемой (1) и реальной передаточных функций разомкнутой астатической линейной САУ.

Достоверность полученных значений постоянных T_i легко проверить при одновременном вычислении функций производной аргумента (4), выраженных как через корни s_m , так и через полученные коэффициенты характеристического уравнения (3)

$$R_1(\omega) = \frac{UV' - U'V}{U^2 + V^2}, \quad (7)$$

$$R_2(\omega) = \frac{\delta_1}{\omega_1^2 + \omega^2} + \frac{2\delta_2}{\delta_2^2 + (\omega - \omega_2)^2} + \frac{\delta_4}{\delta_4^2 + \omega^2}. \quad (8)$$

Значения выражений (7) и (8) для различных ω при правильном выборе постоянных T_i совпадают. Для окончательной проверки полученных результатов на основе известных корней s_m можно строить переходной процесс [3].

Расчеты, проведенные на основе разработанного метода синтеза астатических линейных САУ, показали высокую эффективность метода, которая обусловлена также легкостью реализации метода на ЭВМ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мелкумян Д. О. Анализ систем методом логарифмической производной—М.: Энергоиздат, 1981.—112 с.
2. Удерман Э. Г. Метод корневого годографа в теории автоматических систем—М.: Наука, 1972.—448 с.
3. Расчет автоматических систем/Под. ред. Фатеева А. В.—М.: Высш. школа, 1973.—336 с.

ВНИИРИ

10. X. 1991

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLVI, № 1, 1993, с. 20—23

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1.001.24

В. П. АРАКЕЛЯН, И. М. ЭЛЬ САНД, Д. С. ХАЧИКЯН

ФОРМУЛЫ ПОТЕРЬ МОЩНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагаются формулы потерь активной и реактивной мощностей, основанные на Z —эквивалентных уравнениях установившегося режима. Для решения практических задач разработана ФОРТРАН—программа.

Библиогр.: 5 назв.

Առաջարկվում է տեղիք է ունիտիվ հարաբերակցությունների կորուստների բաժանելը, որոնք հիմնված են կայունացված ուժի մեծության Z -համարժեք հավասարումների վրա: Գործնական խնդիրները լուծելու համար կազմված է Ֆորտրան ծրագիր:

В настоящее время предлагается много методов построения формулы потерь активной и реактивной мощностей [1—5] с целью их включения в математическую модель оптимизации режимов электроэнергетических систем (ЭЭС). Эти методы не обеспечивают необходимой маневренности при организации итерационного процесса по оптимизации режимов ЭЭС.

В отличие от вышеуказанных методов в настоящей работе предлагаются формулы потерь активной и реактивной мощностей, которые обеспечивают необходимую маневренность при определении частных производных от них по активным и реактивным мощностям электрических станций. В основу построения формулы потерь мощностей положена идея, выдвинутая в работе [5] при построении математической модели установившегося режима ЭЭС. На основании принятой системы индексов в [5] из матричного уравнения (3) вытекают следующие системы уравнений:

$$U_m = U_B + \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{m,n} I_n + Z_{m,\Sigma H} (I_{\Sigma H}^* + I_{\Sigma H}'), \quad (1)$$

$$U_{\Sigma H} = U_B + \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{\Sigma H,n} I_n + Z_{\Sigma H,\Sigma H} (I_{\Sigma H}^* + I_{\Sigma H}'), \quad (2)$$

где индексом В обозначен базисный стационарный узел, а ΣН — суммарный нагрузочный узел.

Если уравнение (1) умножить на $\widehat{I}_m$, а (2) — на $\widehat{I}_{\Sigma H}$, то они будут представлены в виде узловых комплексных мощностей

$$\widehat{S}_m = \widehat{U}_B \widehat{I}_m + \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{mn} \widehat{I}_n \widehat{I}_m + Z_{m, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_m, \quad (3)$$

$$\widehat{S}_{\Sigma H} = \widehat{U}_B \widehat{I}_{\Sigma H} + \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{\Sigma H, n} \widehat{I}_n \widehat{I}_{\Sigma H} + Z_{\Sigma H, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_{\Sigma H}. \quad (4)$$

Как известно, потери мощностей определяются как алгебраическая сумма узловых комплексных мощностей с учетом комплексной мощности базисного—завязанного стационарного узла. Если обозначить потерю активной мощности — Π_a , а реактивной мощности — Π_p , то согласно вышесказанному можно написать

$$\Pi_a + j\Pi_p = \widehat{U}_B \widehat{I}_B + \sum_{m=1}^{\Gamma} \widehat{S}_m + \widehat{S}_{\Sigma H} \quad (5)$$

или

$$\begin{aligned} \Pi_a + j\Pi_p = & \widehat{U}_B \widehat{I}_B + \sum_{m=1}^{\Gamma} \widehat{U}_B \widehat{I}_m + \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{mn} \widehat{I}_n \widehat{I}_m + \\ & + \sum_{m=1}^{\Gamma} Z_{m, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_m + \widehat{U}_B \widehat{I}_{\Sigma H} + \\ & + \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{\Sigma H, n} \widehat{I}_n \widehat{I}_{\Sigma H} + Z_{\Sigma H, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_{\Sigma H}. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что первое, второе и пятое слагаемые (6) взаимно компенсируются, последнее выражение принимает вид

$$\begin{aligned} \Pi_a + j\Pi_p = & \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{mn} \widehat{I}_n \widehat{I}_m + \sum_{m=1}^{\Gamma} Z_{m, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_m + \\ & + \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{\Sigma H, n} \widehat{I}_n \widehat{I}_{\Sigma H} + Z_{\Sigma H, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_{\Sigma H}. \end{aligned} \quad (7)$$

Четвертое слагаемое (6) представляется как

$$\sum_{m=1}^{\Gamma} Z_{m, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_m = - \sum_{m=1}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} Z_{m, \Sigma H} \widehat{I}_n \widehat{I}_m, \quad (8)$$

а шестое слагаемое —

$$\sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{\Sigma H, n} \widehat{I}_n \widehat{I}_{\Sigma H} = - \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=1}^{\Gamma} Z_{\Sigma H, n} \widehat{I}_n \widehat{I}_m. \quad (9)$$

Последнее слагаемое (6) представим в виде

$$Z_{\Sigma H, \Sigma H} (\widehat{I}_{\Sigma H}^* + \widehat{I}_{\Sigma H}) \widehat{I}_{\Sigma H} = \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} Z_{\Sigma H, \Sigma H} \widehat{I}_n \widehat{I}_m. \quad (10)$$

Преобразуя выражение (5) согласно (7)–(10), получаем

$$\begin{aligned} P_a + jP_p = & \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} Z_{m,n} \dot{I}_n \hat{I}_m - \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} Z_{m,\Sigma H} \hat{I}_m - \\ & - \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} Z_{\Sigma H,n} \dot{I}_n \hat{I}_m + \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} Z_{\Sigma H,\Sigma H} \dot{I}_n \hat{I}_m \end{aligned} \quad (11)$$

или

$$P_a + jP_p = \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} (Z_{m,n} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n} + Z_{\Sigma H,\Sigma H}) \dot{I}_n \hat{I}_m. \quad (12)$$

Если ввести обозначения

$$Z_{m,n} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n} + Z_{\Sigma H,\Sigma H} = Z_{m,n}, \quad (13)$$

то выражение (12) принимает следующий вид:

$$P_a + jP_p = \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} \hat{I}_m Z_{m,n} \dot{I}_n. \quad (14)$$

В полученной формуле (14) важным моментом является вопрос структуры квадратной матрицы $Z_{m,n}$. Элементы типа Z_{mn} фигурируют во всех клетках матрицы $Z_{m,n}$, кроме строки и столбца с нулевым номером, а элементы типа $Z_{m,\Sigma H}$ и $Z_{\Sigma H,n}$ не фигурируют соответственно только в клетках строки и столбца с нулевым номером. Элемент $Z_{\Sigma H,\Sigma H}$ фигурирует во всех клетках матрицы $Z_{m,n}$.

Для большей ясности в виде матрицы (15) показано строение матрицы $Z_{m,n}$.

0 — 0 — — 0 + $Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	0 — 0 — — $Z_{\Sigma H, 1} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	0 — 0 — — $Z_{\Sigma H, 2} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	0 — 0 — — $Z_{\Sigma H, \Gamma} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	.
0 — $Z_{1, \Sigma H}$ — — 0 + $Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{11} - Z_{1, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, 1} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{12} - Z_{1, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, 2} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{1\Gamma} - Z_{1, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, \Gamma} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	
0 — $Z_{2, \Sigma H}$ — — 0 + $Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{21} - Z_{2, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, 1} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{22} - Z_{2, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, 2} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{2\Gamma} - Z_{2, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, \Gamma} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	
.				
0 — $Z_{\Gamma, \Sigma H}$ — — 0 + $Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{\Gamma 1} + Z_{\Gamma, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, 1} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{\Gamma 2} + Z_{\Gamma, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, \Gamma} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	$Z_{\Gamma \Gamma} - Z_{\Gamma, \Sigma H}$ — — $Z_{\Sigma H, \Gamma} + Z_{\Sigma H, \Sigma H}$	.

(15)

На основании (14) можно установить аналитические выражения для потерь активной и реактивной мощностей

$$P_a = \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} [(\dot{I}_m \dot{I}_n + \dot{I}_m^* \dot{I}_n^*) R_{m,n} - (\dot{I}_m \dot{I}_n^* - \dot{I}_m^* \dot{I}_n) X_{m,n}], \quad (16)$$

$$P_p = \sum_{m=0}^{\Gamma} \sum_{n=0}^{\Gamma} [(\dot{I}_m \dot{I}_n + \dot{I}_m^* \dot{I}_n^*) X_{m,n} - (\dot{I}_m \dot{I}_n^* - \dot{I}_m^* \dot{I}_n) R_{m,n}], \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} I_m &= \operatorname{Re}(I_m), & I_m &= \operatorname{Im}(I_m), & I_n &= \operatorname{Re}(I_n), & I_n &= \operatorname{Im}(I_n), \\ R_{m,n} &= \operatorname{Re}(Z_{m,n}), & X_{m,n} &= \operatorname{Im}(Z_{m,n}) \end{aligned} \quad (18)$$

Как можно заметить из приведенной структуры матрицы (15): $Z_{m,n} \neq Z_{n,m}$, откуда вытекает, что

$$R_{m,n} \neq R_{n,m}, \quad X_{m,n} \neq X_{n,m}. \quad (19)$$

Качественный анализ показывает, что асимметричность (19) небольшая, но тем не менее требуется осуществление существенного количественного анализа. С другой стороны

$$\begin{aligned} R_{m,n} &= \operatorname{Re}(Z_{mn} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n} + Z_{\Sigma H,\Sigma H}), \\ X_{m,n} &= \operatorname{Im}(Z_{mn} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n} + Z_{\Sigma H,\Sigma H}). \end{aligned} \quad (20)$$

откуда следует, что

$$\begin{aligned} R_{m,n} &= R_{mn} + \operatorname{Re}(Z_{\Sigma H,\Sigma H} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n}), \\ X_{m,n} &= X_{mn} + \operatorname{Im}(Z_{\Sigma H,\Sigma H} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n}). \end{aligned} \quad (21)$$

Представим выражения (21) в следующем виде:

$$R_{m,n} = R_{mn} + R_{mn}^0, \quad X_{m,n} = X_{mn} + X_{mn}^0, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} R_{mn}^0 &= \operatorname{Re}(Z_{\Sigma H,\Sigma H} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n}), \\ X_{mn}^0 &= \operatorname{Im}(Z_{\Sigma H,\Sigma H} - Z_{m,\Sigma H} - Z_{\Sigma H,n}). \end{aligned} \quad (23)$$

На основании полученных формул разработана ФОРТРАН-программа, которая позволяет успешно решить практические задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В. С. Метод расчета частных производных от потерь активной и реактивной мощности по активным мощностям отдельных станционных узлов//Изв. вузов СССР. Энергетика.—1972.—№ 3.—С. 92—96.
2. Хачатрян В. С. Метод определения относительных приростов потерь в сетях больших энергосистем при задании P—Q режимных параметров станционных узлов//Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1974.—№ 2.—С. 57—65.
3. Хачатрян В. С. Метод определения относительных приростов потерь в сетях больших электроэнергетических систем//Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.—1974.—№ 5.—С. 133—144.
4. Гераскин О. Т. Матричные формулы для определения первых частных производных от потерь мощности по активным и реактивным мощностям узлов электрической сети//Изв. вузов СССР. Энергетика.—1981.—№ 8.—С. 3—8.
5. Аракелян В. П., Ангуладзе И. В., Эльсаид И. М. Об учете состояния сети при оптимизации режимов электроэнергетической системы//Межвуз. сб. науч. тр. «Стратегия создания самообеспечивающегося регионального энергохозяйства в экстремальных и при ограниченных внешних связях».—Ереван, 1992.—С. 77—80.

ЕрПИ

5. XI. 1991

УДК 621.317. 725

Р. А. СИМОНЯН, В. Р. МАРТИРОСЯН

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Предложен высокоточный и помехоустойчивый преобразователь среднеквадратического значения напряжения, который работает на основе определения теплового эквивалента входного напряжения. Прибор обеспечивает следующие технические параметры: частотный диапазон на уровне 0,9 от 1 Гц до 100 МГц, входные напряжения от 30 мВ до 10 В (без входного усилителя).

Ил. 1. Библиогр.: 7 назв.

Առաջարկված է մեծ հշտություն ու խանգարումների նկատմամբ կայուն լարման միջին քառակուսային արժեքի կերպափոխիչ, որն աշխատում է մուտքային լարման ջերմային համարմամբ որոշելու հիման վրա: Սարքը ապահովում է հետևյալ տեխնիկական պարամետրերը. հաճախային աիրանքը 0,9 մակարդակի վրա՝ 1 Հց-ից 10 ՄՀց, մուտքային լարմաններ՝ 30 մՎ-ից 10 Վ (առանց մուտքային ուժեղացուցիչի):

При измерении напряжения произвольной или шумоподобной формы широко применяются преобразователи среднеквадратического значения (ПСКЗ). ПСКЗ на основе определения теплового эквивалента входного сигнала на интегральных термопреобразователях обеспечивают хорошие точностные характеристики по сравнению с другими типами ПСКЗ [1].

В [2] описан ПСКЗ на термоэлектрическом преобразователе типа нагреватель—термодатчик, чувствительность и точность измерения которого ограничиваются тепловым дрейфом дифференциального усилителя, самонагревом транзисторов—термодатчиков, работающих одновременно в режиме усиления. К ухудшению точности измерения приводит также несогласованность термических усилителей [2].

В настоящей работе, применением принципов, изложенных в [3], наряду с высокой чувствительностью получена также высокая точность и помехоустойчивость измерения. Функциональная схема ПСКЗ показана на рисунке.

ПСКЗ состоит из входного нагревающего резистора 1, имеющего тепловой контакт с входным датчиком температуры 2, нагревающего резистора обратной связи 4, соединенного к выходу устройства и имеющего тепловой контакт с датчиком температуры обратной связи 3. Пары нагреватель—термодатчик находится в общем термостате и не имеют теплового контакта друг с другом. Датчики температуры—прямосмещенные р—п переходы, питание которых осуществляется генераторами токов 5 и 6. Токозадающие входы генераторов тока соединены друг с другом и с выходом стабилизированного источника напряжения постоянного тока 7. Для модуляции тока тер-

модатчики зашунтированы полевыми транзисторами 8 и 9. Управление транзисторов 8 и 9, а также управление синхронного фильтра с синхронным детектором II осуществляется опорным генератором напряжения прямоугольной формы 13.

ПСКЗ работает следующим образом.

При отсутствии сигнала на входе ПСКЗ схема балансируется резисторами 14 и 15 с целью получения нулевого значения на выходе. Подключенное напряжение на входе нагревает резистор 1 и 2, что приводит к изменению напряжения на диоде, и схема разбалансируется.

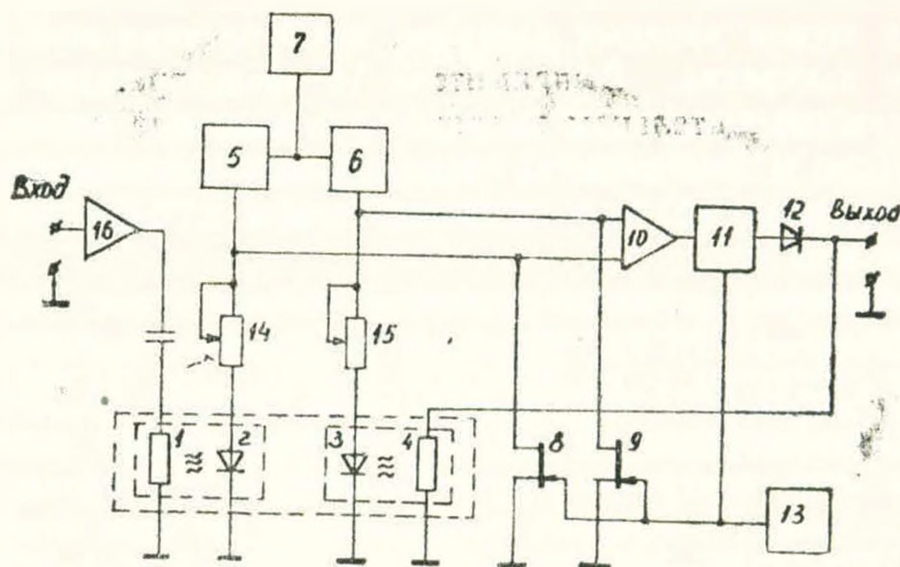


Рис. 1 — нагревающий резистор входа, 2 — датчик температуры входа, 3 — нагревающий резистор обратной связи, 4 — датчик температуры обратной связи, 5, 6 — генераторы тока, 8, 9 — полевые транзисторы, 10 — дифференциальный усилитель, 11 — синхронный фильтр с синхронным детектором, 12 — выпрямитель (активный диод), 13 — генератор напряжения прямоугольной формы, 14, 15 — полупеременные резисторы, 16 — усилитель входа.

На выходе усилителя 10 возникает напряжение прямоугольной формы с амплитудой, пропорциональной разности температур датчиков 2 и 3, т. к. при стабильном токе через прямосмещенные р—п переходы напряжение на них линейно меняется от температуры [4]. Напряжение с выхода усилителя выпрямляется и фильтруется от помех и шумов в синхронном фильтре с синхронным детектором 11, через выпрямитель 12 подается на выход преобразователя и одновременно на нагревающий резистор 4. Последний нагревается и нагревает термодатчик 3. Температуры датчиков 2 и 3 выравниваются и схема балансируется.

Таким образом, величина напряжения постоянного тока на выходе ПСКЗ с высокой точностью равна среднеквадратическому значению напряжения переменного тока на входе.

Применение генераторов тока для питания термодатчиков существенно улучшает стабильность и уменьшает температурный коэффициент тока через датчики. Применение общего постоянного тока-задающего напряжения приводит к тому, что временные и темпера-

турные нестабильности токозадающего напряжения в одинаковой степени влияют на величину тока через датчики, уменьшаются в дифференциальном усилителе по коэффициенту ослабления синфазных составляющих и в конечном итоге не влияют на точность измерения.

Модуляция тока через термодатчики приводит к полному устранению влияния дрейфа дифференциального усилителя на точность измерения и кроме того, существенно уменьшает ошибку, связанную с самонагревом датчиков.

Введение синхронного фильтра с синхронным детектором улучшает помехоустойчивость и чувствительность, уменьшает влияние собственных шумов входных каскадов дифференциального усилителя на точность измерения. Выпрямитель 12 предотвращает нагрев резистора 4 при отрицательном напряжении на выходе дифференциального усилителя и выполнен на операционных усилителях по схеме «идеального диода» [5], что приводит также к снижению нижнего порога измерения.

Входной широкополосный усилитель 16 расширяет динамический диапазон измерения ПСКЗ. Источник напряжения постоянного тока 7 выполнен в виде параметрического стабилизатора на термокомпенсированном стабилитроне КС191Ф. Дифференциальный усилитель 10 выполнен в виде инструментального усилителя с большим коэффициентом ослабления синфазных составляющих на трех операционных усилителях [6]. Синхронный фильтр с синхронным детектором реализован по схеме аналогичной с [7].

Конструктивно пара термодатчик—нагреватель выполнена на двух бескорпусных транзисторах КТ202 и КП308, подложки которых приклеены друг с другом. При этом функцию термодатчика выполняет прямосмещенный переход база—эмиттер биполярного транзистора, а функцию нагревателя выполняет открытый канал сток—исток полевого транзистора. На разработанном макете ПСКЗ были получены следующие технические данные (без входного усилителя): частотный диапазон на уровне 0,9—от 1 Гц до 100 МГц; уровень входных напряжений—от 30 мВ до 10 В; время установления показаний—5 с; потребляемая мощность—10 Вт (с учетом внутреннего термостата); питание от сети— $220 \pm 10\%$ В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексенко А. Г., Коломбет Е. А., Стародуб Г. И. Применение прецизионных аналоговых ИС.—М.: Радио и связь, 1981.—224 с.
2. Зайцев Ю. В., Громов В. С., Григораш Т. С. Полупроводниковые термоэлектрические преобразователи.—М.: Радио и связь, 1985.—120 с.
3. А.с. 1347029 СССР, G 01 R 19/02. Преобразователь среднеквадратического значения напряжения/Р. А. Симонян, В. Р. Мартиросян, № 3991828. Заявл. 17.12.85 г., Опубл. 22.06.87 г.—3 с.
4. Додик С. Д. Полупроводниковые стабилизаторы постоянного напряжения и тока.—М.: Сов. радио, 1962.—350 с.
5. Проектирование и применение операционных усилителей/Под ред. Дж. Грома. Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана.—М.: Мир, 1974.—510 с.

6. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах.—Л.: Энергия, 1988.—304 с.
7. Горошков Б. И. Радиоэлектронные устройства: Справочник.—М.: Радио и связь, 1985.—400 с.

ИРФЭ АН Армении

28. IV. 1990

Изв. АН Армении (сер. ТН) т. XLVI, № 1, 1993, с. 27—30.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.391:519.47

М. З. ПОГОСЯН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Предлагается метод оптимального выбора альтернатив проектируемого объекта микропроцессорных средств вычислительной техники (МСВТ), основанный на использовании нечетких мер и нечетких интегралов. Метод применяется для оптимального синтеза тестов функционального контроля (ТФК) оперативных запоминающих устройств (ОЗУ), частные критерии оптимальности которых определены нечетко.

Библиогр.: 6 назв.

Առաջարկվում է ազոտ չափերի և ազոտ ինտեգրալների օգտագործմամբ հաշվողական տեխնիկայի միկրոպրոցեսորային միջոցների նախագծվող օբյեկտի երկրնորանքային օպտիմալ ընտրության մեթոդ: Մեթոդը կիրառմամբ հիմադրվում են գործադրական հիշատարգրերի օպտիմալ գործառական վերահսկման տեսուեր, որոնց մասնակի լավարկման հայտանիշերը ազոտ ևն որոշված:

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к изучению нечетких многокритериальных задач принятия решений. В задачах проектирования часто приходится иметь дело с множествами, в которых трудно провести четкую границу между элементами, принадлежащими данному множеству, и элементами, не принадлежащими ему. В подобных случаях пользователю приходится принимать решения в условиях неопределенности. В ряде работ для решения нечеткой многокритериальной задачи используется свертка частных критериев оптимальности и рассматривается скалярная нечеткая задача принятия решений [1, 2].

В данной работе описывается метод свертки с применением нечетких мер и нечетких интегралов для решения задачи оптимального выбора альтернатив проектируемого объекта МСВТ, частные критерии оптимальности которых нечетко определены (известны лишь их расплывчатые экспертные оценки или показатели качества).

Пусть X — множество альтернатив. Обозначим через $f = \{f_i\}$, ($i = \overline{1, m}$) множество частных критериев оптимальности на X , значения которых нечетко определены. Реализация предложенного метода выполняется поэтапно.

1. Вычисляются степени принадлежности альтернатив для одного или группы экспертов [3]: для одного эксперта—методом Саати [4], а для группы экспертов—методами ранжирования или приписывания баллов [5]. После применения одного из этих методов получаются:

- а) вектор $\mu_f = (\mu_{f1}, \mu_{f2}, \dots, \mu_{fm})$, координаты которого являются степенями принадлежности частных свойств альтернатив;
- б) матрица

$$\begin{pmatrix} \mu_{x_1^1} & \mu_{x_2^1} & \dots & \mu_{x_n^1} \\ \mu_{x_1^2} & \mu_{x_2^2} & \dots & \mu_{x_n^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{x_1^m} & \mu_{x_2^m} & \dots & \mu_{x_n^m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

в каждом столбце которой указаны степени принадлежности альтернативы $x_i \in X$ ($i = \overline{1, n}$) при их оценке с точки зрения свойств (показателей) f_j ($j = \overline{1, m}$).

2. Так как понятие степени нечеткости в теории нечетких мер включает в себя понятие степени принадлежности теории нечетких множеств [3], то на точках f_j и x_i^j можно определить степени нечеткости, которые в этих точках совпадают со степенями принадлежности

$$g_f(|f_j|) = g^j = \mu_{f_j}, \quad \sigma_x(|x_i^j|) = g_i^j = \mu_{x_i^j}. \quad (2)$$

Согласно определению λ -нечеткой меры на конечном множестве $K = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ [3]:

$$g_\lambda(\{s_i\}) = g^i, \quad g_\lambda(\{s_i, s_j\}) = g^i + g^j - \lambda g^i g^j, \quad i \neq j,$$

где $0 \leq g^i \leq 1$ ($i = \overline{1, n}$), нечеткие плотности λ -нечеткой меры g_λ —по Сугено, а из соотношений (2) строятся нечеткие меры g_f и $\sigma_x(\cdot|f_i)$ на $(f, 2^f)$ и на множествах $(X|f, 2^{X|f})$ соответственно.

Таким образом, задача нечеткой многокритериальной оптимизации сводится к задаче принятия решений в нечеткой обстановке. Задача описывается набором $\langle f, X, g_f, \sigma_x(\cdot|f_i), h \rangle$, где h —частная оценка альтернатив, т. е. $h: X \rightarrow [0, 1]$, и заключается в поиске стратегии, максимизирующей нечеткое ожидание.

3. С помощью нечетких мер g_f и $\sigma_x(\cdot|f_i)$ получается обобщенная g_λ -нечеткая мера в точках $x_i \in X$

$$g_\lambda = g_f \cdot \sigma_x(\cdot|f_i), \quad (3)$$

где $g_f = (g^1, g^2, \dots, g^m)$, $\sigma_x(\cdot|f_i) = |g_i^j|$.

Смысл обобщенной g_λ -нечеткой меры заключается в том, что она показывает обобщенный вес альтернативы $x_i \in X$ с точки зрения всех показателей f_j .

4. Для g_λ -нечеткой меры из условия нормировки [3] получается числовое значение параметра λ . Выбор оптимальных альтернатив осуществляется по критерию максимума значений нечеткого интеграла вида $f h_i g_\lambda$ [3], где g_λ — нечеткая мера, характеризующая обобщенный вес альтернатив, а h_i — частная оценка, характеризующая полезность i -ой альтернативы. Значение нечеткого интеграла вычисляется по следующей формуле:

$$S = \sup_{z \in [0, 1]} [z \wedge g_\lambda], \quad (1)$$

где $g_\lambda = \frac{1}{\lambda} \left(\prod_{i \in I} (h_i^\lambda + 1) - 1 \right)$, $I_\lambda = \{i | h_i(x) \geq z\}$.

Согласно [3], значение нечеткого интеграла S представляет собой обобщенную оценку альтернатив, а множество I_λ — оптимальное множество альтернатив.

Алгоритм метода программно реализован на языке ФОРТРАН-IV в среде ОС ЕС. Метод применяется для оптимального синтеза тестов функционального контроля (ТФК) для БИС ОЗУ КМ581РУ4 микроЭВМ «Электроника 60М». Из наиболее распространенных ТФИ запоминающих устройств найдем такой набор из табл. 5 [6], который за период времени, равный 4,5 с, обнаруживает наибольшее количество неисправностей. В качестве свойств (признаков) примем следующие характеристики ТФК БИС ОЗУ: f_1 — время прохождения теста (длительность теста в циклах); f_2, f_3, f_4 — способности обнаружения отказов в матрице элементов памяти (ЭП), дешифраторе и по динамическому параметру $T_{\text{пер}}$.

Показатели свойств f_2, f_3, f_4 принимают следующие качественные значения, которые заданы нечетко: $\pm, -, 0$, т. е. данные свойства тестом ФК контролируются эффективно, неэффективно и не контролируются соответственно.

Функцию полезности для ТФК x_i ($i = \overline{1, 28}$) определяем формулой, исходя из табл. 5 [6]

$$h(x_i) = \sum k_i^M + \sum k_i^D + \sum k_i^P + T(x_i),$$

$$k_i^M = \frac{s_M - s_M^+}{s_M} + \frac{s_M - s_M^-}{s_M}, \quad k_i^D = \frac{s_D - s_D^+}{s_D} + \frac{s_D - s_D^-}{s_D},$$

$$k_i^P = \frac{s_P - s_P^+}{s_P},$$

где s_i^M и s_M^+, s_M^- — общее число и числа показателей соответственно эффективного и неэффективного обнаружения отказов в матрице ЭП тестами; s_D и s_D^+, s_D^- — общее число и числа показателей соответственно эффективного и неэффективного обнаружения отказов в дешифраторе тестами; s_P, s_P^+ — общее число и число показателей эф-

фективного обнаружения отказов и динамическому параметру $T_{\text{рп}}$ тестами: $T(x_i)$ — слагаемое, принимающее следующие значения:

$$T(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{если не существует ТФК, покрывающего ТФК } x_i; \\ -5, & \text{если существует ТФК, покрывающий ТФК } x_i; \\ -10, & \text{если время прохождения ТФК } x_i \text{ превышает} \\ & \text{время, отведенное для контроля.} \end{cases}$$

ТФК x_i покрывает ТФК x_j , если отказы, обнаруживаемые тестом ФК x_i , обнаруживаются тестом ФК x_j . Для ТФК, функция полезности которых принимает отрицательные значения, примем $h = 0,001$.

По значениям g^t , $h(x_i)$ ($i = 1, 28$), полученным в результате реализации вышеизложенных этапов, и с учетом соотношения (4) определяем: а) значение нечеткого интеграла $S = 0,3717818$, б) оптимальные точки x_{21} и x_{27} . Время прохождения ТФК x_{21} и x_{27} равно 2,2355 с, а для оставшегося времени процедура повторяется аналогичным образом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации.—М.: Наука, 1981.—208 с.
2. Жуковин В. Е. Нечеткие многокритериальные модели принятия решений.—Тбилиси: Мецниереба, 1988.—72 с.
3. Аверкин А. Н. и др. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/Под ред. Поспелова Д. А.—М.: Наука, 1986.—312 с.
5. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. Т. Теоретические основы САПР.—М.: Энергоатомиздат, 1987.—400 с.
6. Георгиев Н. В., Орлов Б. В. Функциональный контроль полупроводниковых запоминающих устройств/Электронная промышленность.—1980.—№ 6.—С. 3—21.
4. Saaty T. L. Measuring the fuzziness of sets//Journ. of Cybernetics.—1974.—V. 4.—P. 3—61.

УДК 519.6.621.311

В. Х. ШАХИН

МЕТОД СПЛАЙН АППРОКСИМАЦИИ В САПР ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Работа посвящена получению расчетных формул решения задачи оптимального проектирования программных средств. Алгоритм оптимизации параметров проектируемых программных средств реализован на ПЭВМ IBM PC AT.

Библиогр.: 3 назв.

Ոչխատանքում դիտարկվում էն ծրագրային միջոցների օպտիմալ նախագծման խնդրի լուծման հաշվարկային բաժանիկը: Խնդրի լուծման ալգորիթմը իրականացված է IBM PC AT համակարգիչով:

Численное описание характеристик программного обеспечения обуславливает возможность его использования для целенаправленного управления и оптимального проектирования разрабатываемых программных средств [1].

Известно [1], что комплексы программ характеризуются конкретными функциональными показателями качества, в роли которых выступают такие показатели, как время наработки на отказ, вероятность ошибки, число маршрутов в программе и т. д. Следовательно, если задачу оптимального проектирования программных средств можно свести к задаче нахождения глобального максимума или минимума функции многих переменных и таким образом сформулировать критерий эффективности, то с другой стороны, приходится сталкиваться с проблемой, связанной с трудностями решения оптимизационной задачи.

В настоящей статье изложен метод решения задачи оптимального проектирования программных средств, основанный на методе сплайн-аппроксимации. Преимущество сплайнов по сравнению с многочленами и рациональными дробями состоит в том, что последние обладают рядом недостатков, состоящих в определении поведения аппроксимируемой функции в целом поведением в окрестности какой-либо точки [2].

Пусть:

а) $C^{(m_j)}(P)$ означает совокупность функций $f(x^1, \dots, x^k)$, имеющих непрерывные частные производные на P , порядок дифференцирования которых по x^j не превосходит m_j , $j = 1, \dots, k$; $P = \prod_{l=1}^k [a^l, b^l]$;

б) $P_{m_1}(x)$ — множество алгебраических многочленов степени не выше m по x ;

$$\text{в) } \Delta_{n_1, n_2, \dots, n_k} : \begin{cases} a^l = x_0^l < x_1^l < \dots < x_n^l = b^l, \\ u_1^l < u_2^l < \dots < u_{n_l}^l, \\ x^j < u_n^j < x_{n+1}^j; \end{cases} \quad (1)$$

$$r) (y - v_j) + m = \max \{0, (y - v_j)\}^m. \quad (2)$$

Функции по

$$S_2(x^1, x^2, \dots, x^k) = P_{0,0,\dots,0}(x^1, \dots, x^k) + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{nj} P_{lj}(x^l) (x^j - u_l^j)^2 + \\ + \sum_{j \neq q}^k \sum_{l=1}^{nj} \sum_{l=1}^{nq} a_{ll}^{jq} (x^j - u_l^j)^2 (x^q - u_l^q)^2, \quad (3)$$

где $x^j \in [a^j, b^j] = [a^1, b^1] \cdot [a^2, b^2] \cdot \dots \cdot [a^k, b^k]$, будем называть интерполяционным сплайном.

Пусть заданы функции эффективности и ограничений

$$\epsilon(x^1, \dots, x^k) \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$g_{\xi}(x^1, \dots, x^k) \leq b_{\xi}, \quad \xi = 1, \dots, v. \quad (5)$$

Представим функцию $\epsilon(x^1, \dots, x^k)$ и функции $g_{\xi}(x^1, \dots, x^k)$ следующим образом

$$\Phi_2(x^1, \dots, x^k) = \Phi_{0,0,\dots,0}(x^1, \dots, x^k) + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{nj} \sum_{l=1}^{nq} a_{ll}^{jq} (x^j - u_l^j)^2 \times \\ \times (x^q - u_l^q)^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{nj} P_{lj}(x^l) (x^j - u_l^j)^2; \quad (6)$$

$$C_{2\xi}(x^1, \dots, x^k) = C_{\xi,0,\dots,0}(x^1, \dots, x^k) + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{nj} P_{lj}^{\xi}(x^l) (x^j - u_l^j)^2 + \\ + \sum_{j \neq q}^k \sum_{l=1}^{nj} \sum_{l=1}^{nq} a_{ll}^{jq} (x^j - u_l^j)^2 (x^q - u_l^q)^2, \quad (7)$$

где

$$\Phi_{0,0,\dots,0}(x^1, \dots, x^k) = \sum_{j=1}^k c^j x^j + \sum_{j,z=1}^k c^{jz} x^j x^z, \\ P_{lj}(x^j) = \alpha_l^j x^j + w_l^j (x^j)^2, \\ C_{\xi,0,\dots,0}(x^1, \dots, x^k) = \sum_{j=1}^k v_{\xi}^j x^j + \sum_{j,z=1}^k v_{\xi}^{jz} x^j x^z, \\ P_{lj}^{\xi}(x^j) = \alpha_l^{j\xi} x^j + w_l^{j\xi} (x^j)^2. \quad (8)$$

Решение задачи (4), (5) будем искать при помощи функции Лагранжа

$$L(x^1, \dots, x^k) = \sum_{j=1}^k c^j x^j + \sum_{j,z=1}^k c^{jz} x^j x^z + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{nj} (\alpha_l^j x^j + w_l^j (x^j)^2) (x^j - u_l^j)^2 + \\ + \sum_{j \neq q}^k \sum_{l=1}^{nj} \sum_{l=1}^{nq} a_{ll}^{jq} (x^j - u_l^j)^2 (x^q - u_l^q)^2 + \sum_{\xi=1}^v \sum_{j=1}^k \lambda_{\xi} v_{\xi}^j x^j + \sum_{\xi=1}^v \sum_{z,j=1}^k \lambda_{\xi} v_{\xi}^{jz} x^j x^z + \\ + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{nj} \sum_{\xi=1}^v \lambda_{\xi} (\alpha_l^{j\xi} x^j + w_l^{j\xi} (x^j)^2) (x^j - u_l^j)^2 + \\ + \sum_{\xi=1}^v \sum_{j \neq q}^k \sum_{l=1}^{nj} \sum_{l=1}^{nq} \lambda_{\xi} a_{ll}^{jq} (x^j - u_l^j)^2 (x^q - u_l^q)^2. \quad (9)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x^{l'}} = & c^{l'} + \sum_{\xi=1}^v \lambda_{\xi} v_{\xi}^{l'} + \sum_{z=1}^k x^z \left(c^{l'z} + \sum_{\xi=1}^v \lambda_{\xi} v_{\xi}^{l'z} \right) + \sum_{j=1}^k x^j \left(c^{jl'} + \sum_{\xi=1}^v \lambda_{\xi} v_{\xi}^{jl'} \right) + \\ & + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{n_j} (x^j - u_l^j)^2 \left[\sum_{\xi=1}^v \lambda_{\xi} (a_l^{l'\xi} + 2w_l^{l'\xi} x^{l'}) + (a_l^{l'} + 2w_l^{l'} x^{l'}) \right] + \\ & + \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{n_j} 2(x^{l'} - u_l^{l'}) \left[(a_l^j x^j + w_l^j (x^j)^2) + \sum_{\xi=1}^v \lambda_{\xi} (a_l^{j\xi} x^j + w_l^{j\xi} (x^j)^2) \right] + \\ & + \left(1 + \sum_{\xi=1}^v \lambda_{\xi} \right) \left[2 \sum_{l=1}^{n_l} \sum_{q=1}^k \sum_{l=1}^{n_q} (x^{l'} - u_l^{l'}) (x^q - u_l^q)^2 + \right. \\ & \left. + 2 \sum_{j=1}^k \sum_{l=1}^{n_j} \sum_{l=1}^{n_l} (x^j - u_l^j)^2 (x^{l'} - u_l^{l'}) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Приравнявая к нулю производную

$$\frac{\partial L}{\partial x^{l'}} = 0, \quad l' = 1, \dots, k, \quad (11)$$

получим систему нелинейных уравнений относительно переменных x^l , $l = 1, \dots, k$.

Применение метода [3] позволяет решить систему (II).

Алгоритм решения задачи (4), (5) на основе решения системы (II) реализован на ПЭВМ IBM PC AT.

ЛИТЕРАТУРА

1. Липаев В. В. Качество программного обеспечения.—М.: Финансы и статистика, 1983.—263 с.
2. Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике.—М.: Наука, 1976.—248 с.
3. Карманов В. Г.—М.: Наука, 1980.—256 с.

ГИУА

20. IV. 1992

УДК 621.382.333

Г. Е. АЙВАЗЯН, А. Б. БАГДАСАРЯН, А. А. ВАРДАНЯН

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЯХ

Показана необходимость учета возможности протекания пластической деформации при определении остаточных напряжений и диффузионных слоев механическими и расчетными методами.

Ил. 3. Библиогр.: 5 назв.

Ցույց է տրված զիջողիոն շերտերում մեխանիկական և հաշվարկային մեթոդներով մնացորդային լարումների որոշման ժամանակ պլաստիկ դեֆորմացիայի բնթանալու հնարավորության հաշիբ առնելու անհրաժեշտությունը:

При изготовлении полупроводниковых приборов широкое применение находит диффузионное легирование полупроводниковых подложек для создания активных областей и слоев. Диффузия атомов примесей, имеющих тетраэдрический ковалентный радиус, отличающийся от радиуса атомов матрицы, сопровождается появлением остаточных напряжений (ОН) в диффузионных слоях, что, в свою очередь, приводит к генерации структурных дефектов [1—3]. Эти напряжения и дефекты оказывают отрицательное влияние на свойства полупроводниковых материалов и параметры приборов, изготовленных на их основе.

В литературе определение ОН, возникающих при диффузии, осуществляют как теоретически, с помощью формул Пруссина (расчетный метод) [1], так и экспериментально, по величине деформации изгиба подложки, используя при этом формулы Стоунли (механический метод) [2, 3]. Однако указанные формулы выведены при существенных упрощениях и допущениях и, в частности, не учитывают возможность протекания пластической деформации. Поэтому возникает вопрос о пределах применимости расчетного и механического методов.

В настоящей работе для определения ОН в качестве арбитражного использовали известных в машиностроении экспериментально-расчетный метод деформационных кривых [4]. Данный метод предполагает экспериментальное измерение деформации изгиба подложки при последовательном удалении с образцов напряженных слоев. Расчет ОН при этом осуществляется соотношением

$$\varepsilon(a) = \frac{E}{3r^2(1-\nu)} \left[(h-a)^2 \frac{df(a)}{da} - 4(h-a)f(a) + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right],$$

где r и h — радиус и толщина подложки, ν и E — коэффициент Пуассона и модуль Юнга, $f(a)$ — деформация изгиба подложки при удалении напряженного слоя толщиной a .

Исходными образцами служили подложки бездислокационного кремния с удельным сопротивлением $35 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и ориентацией в плоскости (111). Для эксперимента отбирали первоначально плоскопараллельные подложки, подвергнутые симметричной химико-механической полировке. Диаметр образцов составлял 60 мм , толщина— 230 мкм . Диффузию атомов примеси (бор или фосфор) осуществляли по методу открытой трубы в «мягких» режимах в две стадии: загонка—из жидкого источника VBH_3 или PCl_3 , разгонка—в атмосфере сухого-влажного-сухого кислорода с хлорсодержащей добавкой. Глубина диффузии составляла $x_n = 10$ и $x_p = 41 \text{ мкм}$ при значениях поверхностного сопротивления $R_n = 40$ и $R_p = 0.6 \text{ Ом}/\square$.

Деформацию изгиба подложек измеряли лазерным интерферометром с призмой полного внутреннего отражения [3]. Чувствительность интерферометра составляла $0,6 \text{ мкм}$. Последовательное вдавление тонких (не больше 2 мкм) напряженных слоев проводили с одной стороны подложек химическим травлением в полирующем растворе состава $2\text{HF}—2\text{CH}_3\text{COOH}—5\text{HNO}_3$. При этом другая сторона подложек защищалась химически стойким лаком. Наличие структурных дефектов контролировали методом селективного травления поверхности и сколов подложек в травителе Сиртля. Концентрацию дефектов определяли с помощью оптического микроскопа высокого разрешения Bosch.



Рис. 1а

Травление и оптическая микроскопия обнаруживают сильное различие степени дефектности диффузионных слоев бора и фосфора. После диффузии бора выявляются только единичные дислокации, следы травления которых имеют вид мелких плоскодонных треугольников и темных сравнительно больших треугольных ямок с четкой кристаллографической огранкой (рис. 1а). Последние соответствуют

местам выхода изолированных дислокаций, идущих под большим углом к поверхности. При загонке фосфора появляются разряженные дислокационные сетки, лежащие в плоскости (111) (рис. 1б). Сетки образованы дислокациями, ориентированными по трем эквивалентным кристаллографическим направлениям типа $\langle 110 \rangle$. Разгонка фосфора сопровождается заменой дислокационной сетки сплошным фоном плоскостных треугольников с концентрацией до $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ (рис. 1в).

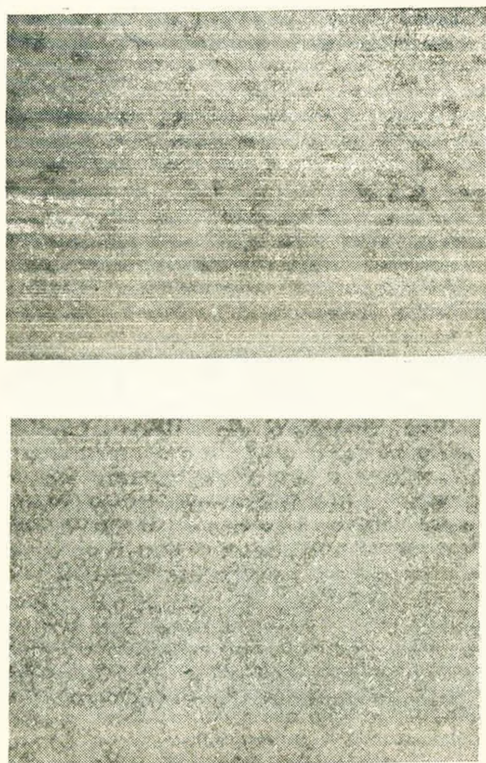


Рис. 1. Образование структурных дефектов после диффузии бора (а), загонки (б) и разгонки (в) фосфора.

Эпюры распределения ОН в диффузионных слоях бора и фосфора, определенные методом деформационных кривых, представлены

на рис. 2 и 3 (сплошные кривые). Там же для сравнения приведены эпюры ОН, определенные механическим и расчетным методами (пунктирные и штрих-пунктирные кривые соответственно)

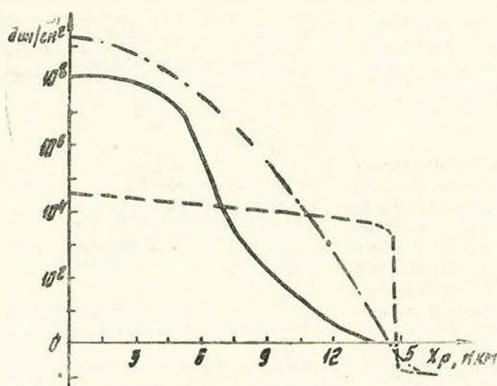


Рис. 2. Эпюры распределения ОН в диффузионном слое бора.

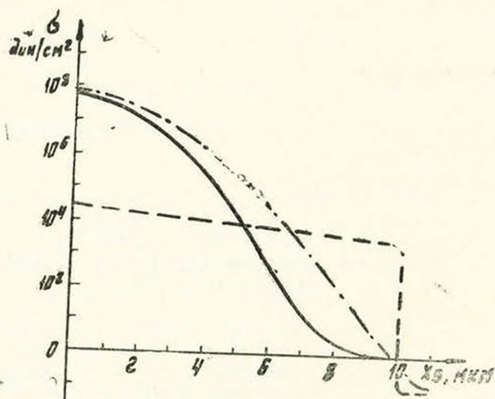


Рис. 3. Эпюры распределения ОН в диффузионном слое фосфора

Анализ полученных результатов показывает, что расчетный метод дает приближенную оценку ОН только в случае диффузии бора, когда деформация носит упругий характер. Некоторая погрешность расчета может быть связана с несовпадением теоретических и реальных концентрационных кривых распределения примесей в диффузионном слое. При диффузии фосфора, когда вызванные диффузией напряжения превышают предел текучести кремния, имеет место пла-

стическая деформация (релаксация напряжений), приводящая к образованию дислокаций. В результате ОН, вычисленные по формулам Пруссина, оказываются на один—два порядка больше. Механический метод, как следует из рис. 2 и 3, позволяет определить только интегральное значение ОН в диффузионном слое. Однако в данном случае нетрудно восстановить реальную эпюру ОН при условии, что известен закон распределения напряжений (по аналогии с эпитаксиальными структурами [5]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов И. Ф., Федоров А. Г. Определение критической толщины слоя и границ области накопления дислокаций в диффузионно-легированных монокристаллах//Микроэлектроника.—1989.—Т. 18, вып. 1.—С. 56—60.
2. Александров О. В., Кютт Р. Н., Алексис Т. Г. Деформация решетки в слоях кремния, высоколегированных фосфором//Физика твердого тела.—1980.—Т. 22, вып. 10.—С. 2892—2896.
3. Айвазян Г. Е., Сковорода А. М. Расчет внутренних напряжений в системе слой—подложка//Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.—1986. Вып. 1.—С. 117—120.
4. Биргер А. И. Остаточные напряжения.—М.: Машгиз, 1963.—231 с.
5. Тхорик Ю. А., Хазан Л. С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в эпитаксиальных структурах.—Киев: Наук. думка, 1983.—301 с.

НПО «Транзистор»

11. IV. 1991

Изв. АН Армении (сер. ТН), т. XLVI, № 1, 1993, с. 38—42.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.547+66.096.5

Р. Е. АКОПЯН, Р. М. МИРЗАХАНИЯН, Я. А. АЛМАСЯН, С. Е. СИРАДЕГЯН

ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ НА ТРЕНИЕ ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАЗБАВЛЕННОМ СЛОЕ

На основе экспериментальных данных с различными порошкообразными материалами показано, что при пневмотранспорте этих материалов в разбавленном слое потери давления на трение можно определить по ранее выведенному уравнению для пневмотранспорта в плотном слое. Предложен новый способ пневмотранспорта в разбавленном слое.

Ил. 2, Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

Տարբեր փոշեման նյութերի հետ կատարված փորձերի տվյալների հիման վրա ցույց է տրված, որ ուղի նյութերի նստր շերտով պնեմատրանսպորտի ժամանակ շփման վրա ծախսվող հնչման կորուստները կարելի է որոշել նախկինում խիտ շերտով պնեմատրանսպորտի համար արտածված բանաձևով: Առաջարկված է նստր շերտով պնեմատրանսպորտի նոր նպատակ:

В статье приведены результаты исследований некоторых физических свойств 7 видов порошкообразных материалов НПО «ТУЛА».

ЧЕРМЕТ» и Запорожского завода ферросплавов. Предложен способ пневмотранспорта этих материалов в разбавленном слое аэросмеси «твердые частицы—воздух». На основе опытных данных пневмотранспорта показано, что выведенное ранее уравнение [1] для определения потерь давления на трение при пневмотранспорте порошкообразных материалов в *плотном* слое справедливо также для пневмотранспорта материалов в *разбавленном* слое аэросмеси.

Физические параметры транспортируемых материалов приведены в табл. 1, где d —средний диаметр частиц материала, ρ_T —плотность материала, $w_{н}$ —скорость начала псевдоожижения слоя материала.

Таблица 1
Физические параметры материалов

Материал	d , мкм	ρ_T , кг/м ³	$w_{н}$, м/с
Ванадий, содержащий шлак	131,39	3120	0,084
Концентрат № 2	33,69	3509	0,052
Шлак № 3	386,74	3544	0,160
Шлак № 4	104,39	3421	0,064
Известняк	333,81	2730	0,106
Доломит	360,46	2557	0,089
Силикомарганец	72,76	2989	0,031

Схема предлагаемой установки, на которой приведены опыты пневмотранспорта вышеуказанных материалов, показана на рис. 1.

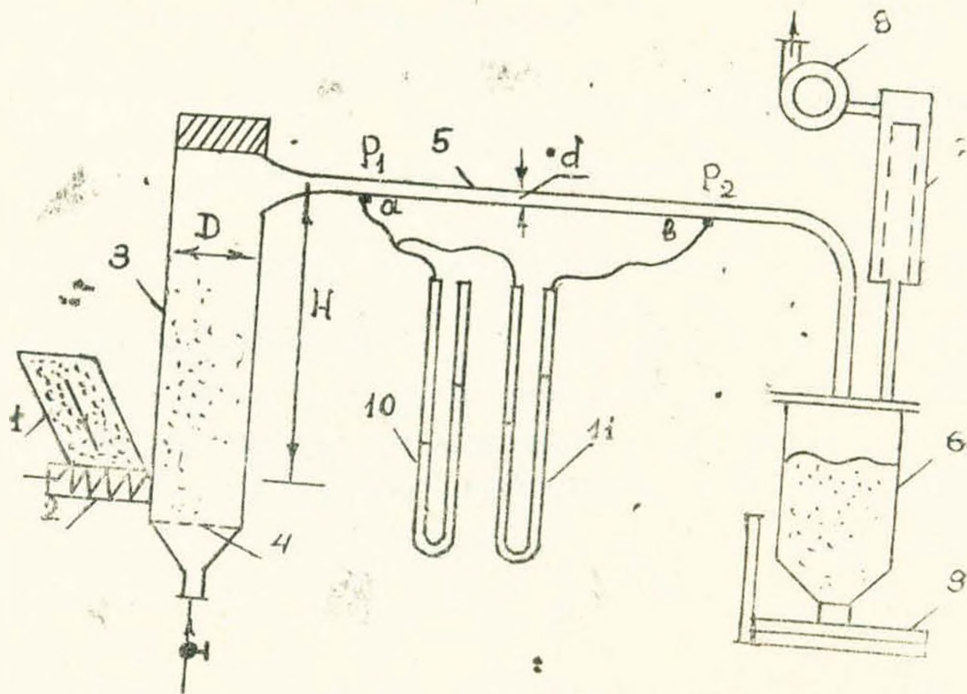


Рис. 1. Схема пневмотранспортной установки

В табл. 2 приведены опытные и расчетные данные пневмотранспорта одного из испытуемых материалов—ванадий содержащего

шлама. Здесь G —расход твердых частиц, Q_0 —расход воздуха при атмосферном давлении $P_0=680$ мм рт.ст, ρ —количество твердого материала, перемещаемого единицей объема газа, ΔP —общие потери давления в транспортной линии, а $v_{см}$, $\rho_{см}$ —скорость движения и плотность аэросмеси.

Таблица 2

Опытные и расчетные данные пневмотранспорта ванадий содержащего шлама

Номер опыта	G , г/с	Q_0 , см ³ /с	$\rho \approx G/Q_0$, г/см ³	P , мм рт.ст.	$v_{см}$, м/с	$\rho_{см}$, кг/м ³	ΔP , мм рт.ст.	
							опытн.	расчетн.
1	8,10	330	0,0245	40	6,29	25,8	60	60,97
2	9,03	396	0,0228	41	7,85	23,0	75	79,66
3	9,81	464	0,0211	50	9,49	20,7	105	102,48
4	10,70	518	0,0207	55	12,0	17,7	135	138,55
5	11,30	600	0,0188	60	14,58	15,5	180	173,60
6	11,92	715	0,0166	66	17,03	14,0	210	212,00

Средняя скорость аэросмеси определяется по формуле

$$v_{см} = \frac{G/\rho_r + Q}{S_{тр}}, \quad (1)$$

где Q —расход воздуха при среднем давлении P в рассматриваемом участке трубы, $Q = Q_0 P_0 / P$, $S_{тр}$ —площадь поперечного сечения трубы.

Плотность движущейся аэросмеси $\rho_{см}$ определяется по формуле

$$\rho_{см} = \frac{G}{G/\rho_r + Q}, \quad (2)$$

а общие потери давления ΔP —

$$\Delta P = \Delta P_k + \Delta P_{тр}, \quad (3)$$

где $\Delta P_k = \frac{v_{см}^2 \rho_{см}}{2}$ —потери давления для сообщения движущей аэросмеси кинетической энергии [2], $\Delta P_{тр}$ —потери давления на трение.

Предполагалось, что значение $\Delta P_{тр}$ при движении аэросмеси в разбавленном слое можно определить по полученной ранее формуле для движения аэросмеси в плотном слое [1, 3]

$$\frac{\Delta P_{тр}}{g \rho_{см} \Delta l} = 1,4 Re^{0,5} \left(\frac{\partial}{d} \right)^{1,21} \left(\frac{\rho_{см}}{\rho_r} \right)^{0,28} Re_0^{-0,35}. \quad (4)$$

Здесь g —ускорение силы тяжести, Re и Re_0 —модифицированные критерия Рейнольдса для потока и частицы соответственно

$$Re = \frac{v_{см} d \rho_{см}}{\mu}, \quad Re_0 = \frac{C_0 \partial \rho_0}{\mu}, \quad (5)$$

где μ , ρ_g — вязкость и плотность транспортирующего газа, C_0 — скорость свободного падения одиночной частицы.

На рис. 2 приведена прямая линия, отражающая зависимость между безразмерными комплексами в соответствии с уравнением (4). На оси ординат отложены значения

$$y = \lg \left[\frac{\Delta P_{тр}}{g \rho_{см} \Delta l} \cdot \left(\frac{d}{\delta} \right)^{1.21} \cdot \left(\frac{\rho_r}{\rho_{см}} \right)^{0.28} Re_0^{0.35} \right]$$

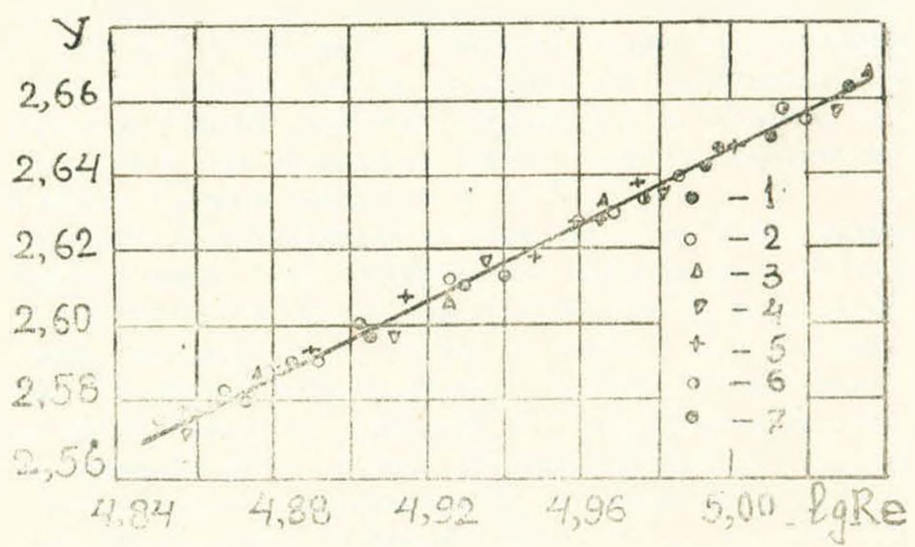


Рис. 2. Корреляция данных по потерям давления на трение при пневмотранспорте порошкообразных материалов в разбывленном слое, 1 — ванадий содержащий шлам, 2 — концентрат № 2, 3 — шлам № 3, 4 — шлам № 4, 5 — известняк, 6 — доломит, 7 — силикомарганец.

Расположение вокруг этой линии опытных точек для исследуемых в настоящей работе материалов показывает, что уравнение (4) достаточно точно выражает зависимость потерь давления $\Delta P_{тр}$ от параметров материалов, газа и транспортной трубы.

При расчете и проектировании пневмотранспортной установки диаметр D и высота H колонны 3 (рис. 1) определяются следующим образом. Выбирается скорость воздуха w в этой колонне в пределах $w = (5 \dots 15) w_n$, а затем определяется диаметр $D = \sqrt{4Q/(\pi w)}$. Высоту H рекомендуется брать в пределах $H = (5 \dots 8) D$. Определение диаметра d транспортной трубы приводится в [2].

Предложенный способ пневмотранспорта приводит к значительным сокращениям энергетических расходов при перемещении сыпучих материалов на производстве и улучшению экологического состояния окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акопян Р. Е. и др. Определение потерь давления на трение при пневмотранспорте порошкообразных материалов в плотном слое // Изв. АН Армении. Сер. ТН. — 1991. — Т. XLIV, № 2. — С. 81—84.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Հ. Լ. Արսենյան. Փոքր հզորության ասինխրոն շարժիչների վահանիկների հուսալիությունը	3
Հ. Մ. Սարգսյան. Փոփոխական առաձգականություն ունեցող հեծանի՝ բույսերի ցողունների նախատիպի գլխամիկ հաշվարկը	8
Ռ. Ս. Մինասյան, Ս. Հ. Չունգուբյան. Շարժմանը տեղահայաց հարթությունում փրեցուցիչի բանդորական մարմնի դինամիկական ամրությունը ծոման դեպքում	13
Վ. Ն. Ներսիսյան, Կ. Ռ. Քերեբյան. Ապաստատիկ համակարգերի համադրումը ըստ որակի տրված ցուցանիշների	17
Վ. Պ. Առաքելյան, Ի. Մ. Էլ. Սաիգ, Գ. Ս. Խաչիկյան. Էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի հզորությունների կորուստների բանաձևերը	20
Ռ. Հ. Սիմոնյան, Վ. Ռ. Մառտիրոսյան. Լարման միջին քառակուսային արժեքի ձևափոխիչ	24
Մ. Ջ. Պողոսյան. Հաշվողական տեխնիկայի միկրոպրոցեսային միջոցների օբյեկտի օպտիմալ նախագծման մի եղանակի մասին	27
Վ. Հ. Շահին. Մրադրային միջոցների ՆԱՀ-ում սպլայն մատակարարման մեթոդը	31
Դ. Ն. Այվազյան, Ա. Ռ. Բաղդասարյան, Ա. Հ. Վառդանյան. Իիֆուլտոն շերտերում մնացորդային լարումների որոշման մասին	34
Ռ. Ն. Հակոբյան, Ռ. Մ. Մառտիրոսյան, Յ. Հ. Ալմասյան, Ս. Ն. Սիբադեղյան. Ճնշման կորուստների շիման վրա փոշնման նյութերի նոսր շերտով պնեմատիկազրման ժամանակ	38

СОДЕРЖАНИЕ

Г. Л. Артемьян. Вибронадежность шпотов асинхронных двигателей малой мощности	3
Г. М. Саркисян. Динамический расчет балки-прототипа стеблей растений с переменным модулем упругости по длине	8
Р. С. Минасян, С. Г. Чунгуриян. Динамическая прочность рабочих органов рыхлителей при изгибе в плоскости, перпендикулярной к направлению движения	13
В. Н. Нерсисян, К. Б. Берберян. Синтез астатических систем по заданным показателям качества	17
В. П. Аракелян, И. М. Эль-Саид, Д. С. Хачикян. Формулы потерь мощностей электроэнергетических систем	20
Р. А. Симонян, В. Р. Мартиросян. Преобразователь среднеквадратического значения напряжения	24
М. З. Погосян. Об одном методе оптимального проектирования объекта микропроцессорных средств вычислительной техники	27
В. Х. Шахин. Метод сплайн аппроксимации в САПР программных средств	31
Г. Е. Айвазян, А. Б. Багдасарян, А. А. Вирданян. Об определении остаточных напряжений в диффузионных слоях	34
Р. Е. Акопян, Р. М. Мирзаханян, Я. А. Алмасян, С. Е. Сиридегян. Потери давления на трение при пневмотранспорте порошкообразных материалов в разбавленном слое	38