

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

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

Կ Ր Ա Չ Բ Ա Վ Ա Ն Կ Ո Ն Ե Ր Ի Ա

Чашинян Н. Վ. (завед. редакцией), Ազոնց Հ. Յ. (завед. редакцией - бухгалтер),
Ավերևեանի Վ. Վ., Ջաղոյան Մ. Ա., Հակոբյան Ի. Ե.,
Սարգսյան Յու. Լ., Մանուկյան Մ. Գ., Տեր-Ազարե Ի. Ա.,
Փինտոյան Վ. Վ. (завед. редакцией - бухгалтер),
Գլխավոր խմբագիր Սահակյան Զ. Կ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Касьян М. В. (ответ. редактор), Асени Г. Т. (зам. ответ. редактора),
Алексеевич В. В., Асипи Р. Е., Забоин М. А.,
Пинаджян В. В. (зам. ответ. редактора), Саркисян К. А.,
Смакин М. Г., Тер-Азарьев И. А.
Ответственный секретарь Стипини З. К.

М. Г. СТАКЯН, Н. С. ИСАХАНИЯН, А. И. БОРИСЕНКО

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ

Неоднородность свойств конструкционных материалов, вызванная действием металлургического фактора и технологией изготовления детали, приводит к естественному рассеянию характеристик сопротивления усталости материалов, которые при соблюдении идентичности условий эксперимента принимают разные значения при повторных испытаниях. Повышение точности оценки характеристик применением рациональной методики статистической обработки данных при минимальном объеме эксперимента является основной задачей планирования испытаний на усталость.

В настоящее время разработаны методики для проведения испытаний и обработки опытных данных [1, 2] и имеются рекомендации [2] по планированию испытаний с целью построения семейства квантильных кривых усталости. Однако точного решения задачи для определения необходимого объема испытаний не существует, а предложенные зависимости несколько громоздки и требуют предварительной информации о значениях основных характеристик сопротивления усталости [2]. Эффективность планирования в значительной степени зависит от достоверности построения медианной кривой усталости по справочной информации, а при необходимости построения семейства кривых усталости объем вычислительных операций резко возрастает. Вследствие высокой относительной стоимости этих испытаний наряду с учетом точности оценок требуется также учет стоимости подготовки и проведения испытаний. Экономический аспект планирования испытаний для основных вариантов их реализации изложен в [2].

Стремление получить достоверные результаты при выполнении уточненных расчетов зачастую заставляет проведение массовых испытаний лабораторных образцов (до 400 образцов на кривую усталости), используя при этом целый парк лабораторного оборудования. Но после определенного объема экспериментов дальнейшее их увеличение приводит к незначительному и экономически необоснованному повышению оценок точности и объема пакета «массива» данных. Несмотря на огромный объем накопленного экспериментального материала, до настоящего времени нет четких рекомендаций об устойчивости характеристик сопротивления усталости и законе изменения их дисперсий в связи с вариацией объема выборки и поэтому определение объема испытаний производится приближенными методами, без строгих статистических оценок тех или иных параметров кривой усталости и в большинстве носит интуитивный характер.

Целью настоящего исследования является моделирование на ЭВМ условий экспериментов на основе теории игр (метод Монте-Карло) и

получение сравнительно простых зависимостей и рекомендаций для создания инженерной методики расчета оптимального объема испытаний на усталость деталей из среднеуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей.

В качестве математической модели для описания процессов в области многоциклового усталости выбрана зависимость

$$\lg N_i = (\lg \bar{N} + z_p S_{N_i}) - (\bar{m} + z_p S_m)(\lg \sigma_i - \lg \bar{\sigma}) \quad (1)$$

или

$$\lg N_i = C - m \lg \sigma_i, \quad (2)$$

где $m = \bar{m} + z_p s_m$; $C = \bar{C} + z_p (s_{N_i} + s_m \lg \bar{\sigma})$ — показатель и параметр

кривой усталости; $\bar{m} = r \frac{s_N}{s_\sigma}$; $\bar{C} = \lg \bar{N} + \bar{m} \lg \bar{\sigma}$; $r = \frac{\rho}{s_N s_\sigma}$; r, ρ —

коэффициент корреляции и корреляционный момент; $s_m = \frac{s_N}{s_\sigma} \times$

$\times \sqrt{\frac{1-r^2}{n-1}}$; $s_N = s_N \sqrt{1-r^2}$; $\lg \bar{N}$, $\lg \bar{\sigma}$, s_N , s_σ — медианные значения логарифмов долговечностей и напряжений и их с. к. о.; z_p — квантиль нормированной функции Лапласа; n — объем испытаний.

Для проведения статистических вычислений использованы результаты испытаний [3] ($n = 160$ на 6 уровнях σ_i , гладкие образцы из стали 45, нормализация, $d = 7,5$ мм, круговой изгиб, $\bar{\sigma}_{-1} = 284$ МПа) и на языке „Фортран-IV“ составлена программа вычислительных операций. Первоначально на ЭВМ составлены вариационные ряды N_{ij} по уровням σ_i ($j = 1, \dots, m$, $i = 1, \dots, k$), каждому члену ряда присвоен код (табл. 1), определена суммарная долговечность $\sum_{i=1}^n N_i$ и по корреляционной таблице вычислены параметры уравнения (1) — (2) для общей совокупности ($\sum_{i=1}^m k_i = n$, $m = 6$). Затем, используя датчики случайных чисел (ДСЧ), на ЭВМ генерированы коды долговечностей N_{ij} и согласно схеме табл. 2 с каждого уровня σ_i осуществлен случайный поиск n_{ip} количества данных для формирования отдельной выборки объемов $n_p = \sum_{i=1}^m n_{ip}$. В программе предусмотрен также анализ кодов для отбрасывания данных, повторно попавших и n_p .

Аналогично, для отдельной выборки n_p определены параметры (1) — (2) и рассчитана сумма циклических долговечностей $\sum_{i=1}^m N_{ip}$, характеризующая время испытаний, необходимое для построения семейства кривых усталости при данном n_p . Для обеспечения сходимости результатов формирование n_p и расчет параметров (1) — (2)

повторялись u_p раз, причем, при $n_1 < n_2 < n_3 < \dots < n_p < \dots < n_q - u_1 > u_2 > \dots > u_p > \dots > u_q$. По завершении каждой серии вычислений (n_p, u_p) на ЭВМ составлялись вариационные ряды $\lg \bar{N}$, s_N , μ , σ , m , $\bar{C}$, s_m , s_N , $\lg \sum_{i=1}^m N_{ip}$ и проводилась комплексная проверка гипотезы нормальности их распределения согласно [4].

Таблица 1

σ_i	Вар. ряды N_{ij}	k_i
σ_1	$N_{11} \leq N_{12} \leq N_{13} \leq \dots \leq N_{1j} \leq \dots \leq N_{1k_1}$	k_1
σ_2	$N_{21} \leq N_{22} \leq N_{23} \leq \dots \leq N_{2j} \leq \dots \leq N_{2k_2}$	k_2
σ_3	$N_{31} \leq N_{32} \leq N_{33} \leq \dots \leq N_{3j} \leq \dots \leq N_{3k_3}$	k_3
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
σ_v	$N_{v1} \leq N_{v2} \leq N_{v3} \leq \dots \leq N_{vj} \leq \dots \leq N_{vk_v}$	k_v
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
σ_m	$N_{m1} \leq N_{m2} \leq N_{m3} \leq \dots \leq N_{mj} \leq \dots \leq N_{mk_m}$	k_m

Таблица 2

σ_v	Выборки по уровням σ						
	1	2	3	...	p	...	q
σ_1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	...	n_{1p}	...	n_{1q}
σ_2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	...	n_{2p}	...	n_{2q}
σ_3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	...	n_{3p}	...	n_{3q}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
σ_v	n_{v1}	n_{v2}	n_{v3}	...	n_{vp}	...	n_{vq}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
σ_m	n_{m1}	n_{m2}	n_{m3}	...	n_{mp}	...	n_{mq}
n_p	n_1	n_2	n_3	...	n_p	...	n_q
u_p	u_1	u_2	u_3	...	u_p	...	u_q

На первом этапе проведения статистического эксперимента для минимизации объема испытаний предусматривалась равномерная выборка данных n_{ip} ($n_{1p} = n_{2p} = n_{3p} = \dots = n_{vp} = \dots = n_{mp}$, $n_p = m n_{vp}$) согласно последовательности $n_{ip} = 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15$ и 20 (соответственно $n_p = 6, 12, 18, 24, 30, 42, 60, 90$ и 120 при $m = 105, 95, 85, 75, 65, 55, 45, 35$ и 25). Всего проведено 10 серий вычислений, получены 586 семейств кривых усталости и 81 вариационный ряд параметров (1) — (2).

Комплексная проверка „нулевой гипотезы“ по критериям Шапиро-Уилка ($w > w_0$), Колмогорова-Смирнова ($k \leq k_0$), Мизеса ($W^* \leq W_0^*$) и Пирсона ($\chi_1^2 \geq \chi_0^2$) показала, что вариационные ряды в подавляющем большинстве с надежностью вывода $\alpha = 0,05$ соответствуют нормальному закону распределения. Этим подтверждаются результаты и расширяются границы проведенных приближенных (графических) проверок параметров [5]. Для минимизации длительности испытаний представляет интерес статистическое исследование вариационных рядов $\lg \sum_{i=1}^m N_{i,p}$ (табл. 3) — здесь для всех выборок характерна низкая степень рассеяния данных ($v_{N,p} = 0,4 - 1,8\%$). Наиболее благоприятными оказались вычисления при $n_p = 90$ ($n_p = 35$), для которых критерильные оценки W^* и χ_1^2 соответствуют $\alpha = 0,01$, а из них универсальными оказались проверки по критерию χ_1^2 , которые в отдельных случаях соответствовали уровню значимости $\alpha = 0,945$. Это свидетельствует о достаточно высокой надежности принятой гипотезы распределения и позволяет при наличии априорной информации о законе $\sigma_{N,p}^2 = f(n_p)$ для вероятностной оценки значений суммы долговечностей воспользоваться известной формулой [2]

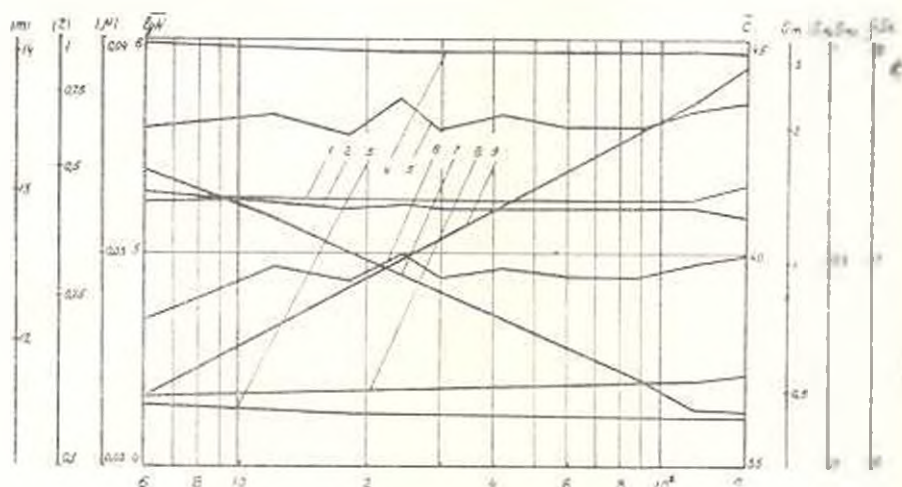


Рис. 1. Изменение медианных значений параметр и кривой усталости от объема выборки n : 1 — $\lg N$; 2 — s_N ; 3 — r ; 4 — $|r|$; 5 — $|\bar{m}|$; 6 — $\bar{C}$; 7 — s_{10} ; 8 — $s_{N,p}$; 9 — $\lg \sum_{i=1}^m N_{i,p}$.

$$\lg \sum_{i=1}^m N_{i,p} = \lg \sum_{i=1}^m N_{i,p} + z_p \bar{s}_{2N} \quad (3)$$

Медианные значения вариационных рядов (рис. 1) за исключением s_m и $\lg \sum_{i=1}^m N_{i,p}$ обнаруживают достаточно высокую сходимость и практически инвариантны к объему выборки n_p , что согласуется с тео-

ретиическим положением об устойчивости выборочных средних. С уменьшением объема выборки дисперсии параметров монотонно возрастают и при $n_p = 6 - 12$ приводят к значительному рассеянию вероятностных значений m и C , в связи с чем возникает необходимость оценки их показателей рассеяния. Предварительный графический анализ кривых вариационных коэффициентов показал (рис. 2), что в координатах $v - \lg n$ их можно аппроксимировать линейными корреляционными уравнениями типа $u_{y,x} = f_1(x)$, $\sigma_{y,x}^2 = f_2(x) = \text{const}$:

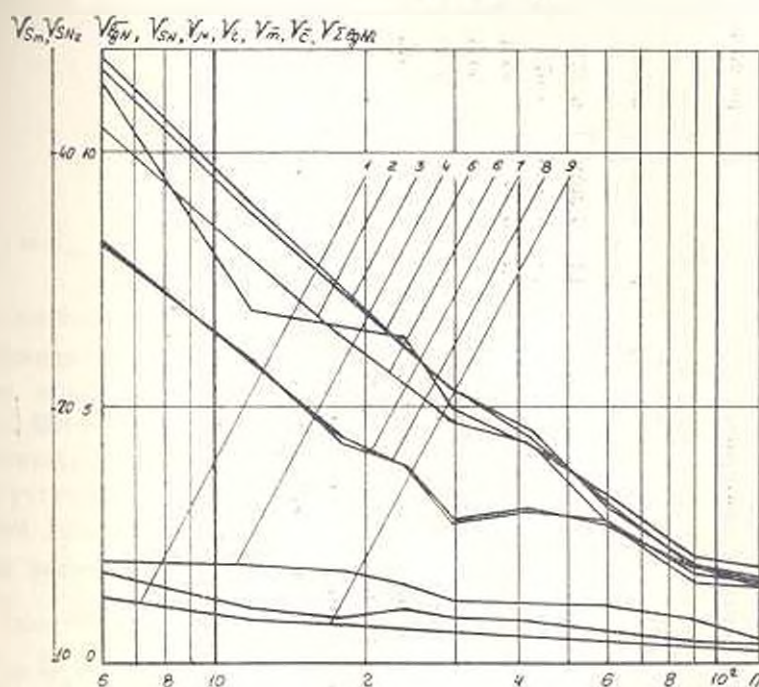


Рис. 2. Изменение вариационных коэффициентов параметров кривой устойчивости от объема выборки n . Обозначения аналогичны рис. 1.

$$Y = y + r \frac{s_y}{s_x} (x - \bar{x}) = a + b_{yx} x, \quad (4)$$

где $x = \lg n$, а $y = v_{\bar{x}}, v_{s_N}, v_{\mu}, v_r, v_m, v_C, v_{s_m}, v_{s_N}, v_{s_A}$. Для вычисления параметров уравнения (4) составлена подпрограмма, включающая расчеты по корреляционным таблицам, проверку значимости выборочного коэффициента корреляции r по преобразованию Фишера

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} + \frac{r}{2(n-1)} \cdot s_u = \sqrt{(n-3)^{-1}}, \quad |u| \geq z_{(1-\frac{\alpha}{2})} s_u, \quad (5)$$

по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена [2]:

$$r_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{(n^3 - n) - (T_x + T_y)} \geq r_{s(1-\frac{\alpha}{2})}, \quad (6)$$

Таблица

n_p	u_p	u_Φ	$\lg \Sigma N_p$	$u, \%$	Проверка по критериям							Дополнительные интегралы				3
					λ	W	χ^2					a		σ		
							χ_1^2	$\chi_{0,05}$	u_Φ	e_1	e	нижн.	верхн.	нижн.	верхн.	
6	105	82	6,3333	1,78	0,668	0,067	3,199	14,1	0,845	10	13	6,3089	6,3576	0,0997	0,1293	
12	95	75	6,6590	1,06	0,679	0,052	3,000	16,9	0,945	12	19	6,6430	6,6750	0,0623	0,0818	
18	85	63	6,8488	0,86	0,807	0,160	4,197	11,1	0,491	8	15	6,8342	6,8634	0,0504	0,0764	
24	75	66	6,9872	1,01	0,645	0,045	0,914	11,1	0,927	8	11	6,9702	7,0043	0,0603	0,0806	
30	65	60	7,0678	0,85	0,498	0,041	5,296	15,5	0,710	11	38	7,0527	7,0830	0,0509	0,0781	
42	55	47	7,2343	0,82	0,376	0,022	0,851	11,1	0,931	8	33	7,2172	7,2513	0,0496	0,0807	
60	45	45	7,3883	0,61	0,623	0,061	1,866	11,1	0,827	8	31	7,3751	7,4015	0,0375	0,0617	
90	35	32	7,5638	0,40	0,919	0,135	5,004	6,0	0,032	5	12	7,5532	7,5714	0,0245	0,0446	
120	25	24	7,6983	0,41	0,690	—	1,841	6,0	0,339	—	—	7,6849	7,7117	0,0247	0,0498	

Примечания. Проверка по Шапиро-Уилка (при $n_p = 25$): $w = 0,951 > w_{0,05}$.

Критериальные значения: $w_{0,05} = 0,916$; $\lambda_{0,05} = 0,89$; $\chi_{0,01}^2 = 1,44$; $W_{0,05}^2 = 0,126$; $W_{0,01}^2 = 0,178$.

а также оценки параметров эмпирической линии регрессии (4):

$$r_1 < r < r_2$$

$$b_{y/x} - t_{\alpha,k} \frac{s_y}{s_x} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}} < b < b_{y/x} + t_{\alpha,k} \frac{s_y}{s_x} \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}};$$

$$\bar{y} - t_{\alpha,k} s_y \sqrt{\frac{(n-1)(1-r^2)}{n(n-2)}} < \bar{Y} < \bar{y} + t_{\alpha,k} s_y \sqrt{\frac{(n-1)(1-r^2)}{n(n-2)}}; \quad (7)$$

$$Y - s_{Y/x} t_{\alpha,k} < a_y < Y + s_{Y/x} t_{\alpha,k},$$

где

$$r_{1,2} = \frac{e^{2u_{1,2}} - 1}{e^{2u_{1,2}} + 1}; \quad u_{1,2} = u - z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) s_u;$$

$$s_{y/x} = s_y \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2}}; \quad s_{Y/x} = s_y \sqrt{\left(\frac{n-1}{n-2}\right)(1-r^2)};$$

$t_{\alpha,k}$ — квантиль распределения Стьюдента ($\alpha = 0,05$, $k = n - 1$).

Проведенные вычисления свидетельствуют о достаточно высокой степени корреляционной связи между рассмотренными величинами ($|r| = 0,938 - 0,994$, $a = 1,7363 - 44,1557$, $b = 0,7614 - 19,5409$), обеспечивающей значимость r на уровне $\alpha = 0,05$. Это позволяет наряду с установлением нормальности распределения параметров (1)–(2) с учетом доверительной вероятности $P(N)$ скорректировать вероятностные значения m и C , используя медианные значения $\bar{m}_p$, $\bar{s}_{m_p}$, $\lg \bar{N}_p$, $\bar{s}_{N_p}$ вариационных рядов при заданном n_p :

$$m_p^* = \bar{m}_p + z_p \bar{s}_{m_p}; \quad C_p^* = (\lg \bar{N}_p + \bar{m}_p \lg 2) + z_p (\bar{s}_{N_p} + \bar{s}_{m_p} \lg 2). \quad (8)$$

Значения m_p^* и C_p^* фактически являются характеристиками обобщенной (априорной) кривой усталости, представляющей всю совокупность параметров при заданном объеме выборки n_p . Значительная вариация их величин (рис. 3) наблюдается при $n_p < 12 - 15$, а при $n_p > 10$ дальнейшее увеличение объема испытаний не приводит к столь заметному повышению точности их вероятностных значений и поэтому оптимальным и экономически обоснованным является объем $n_p = 18 - 25$. Плавный переход графиков m_p^* , C_p^* (рис. 3) к аналогичным значениям для общей совокупности ($n = 160$) свидетельствует об удовлетворительном соответствии статистической модели (8) процессу усталости, поэтому значения m_p^* и C_p^* могут стать достоверной и обоснованной априорной информацией для описания процесса разрушения в области многоциклового усталости для исходных (модельных) испытаний и использованы в расчетах сопротивления усталости деталей без проведения аналогичных массовых испытаний.

В итоге, комплекс проведенных вычислений сводится к разработке расчетной методики, позволяющей количественно оценивать отно-

сительные ошибки показателей прочности и долговечности $\delta_s = \frac{\sigma_{Ro}}{\sigma_{Rp}}$,

$\delta_N = \frac{N_0}{N_p} (\sigma_{Ro}, \sigma_{Rp}$ — пределы выносливости, а N_0, N_p — долговечности при фиксированном уровне σ , для сопоставимых испытаний), вызванные вариацией n , или при заданных уровнях δ_s и δ_N минимизировать продолжительность испытаний. Аналогично методике [6], учитывая взаимное расположение кривых усталости для общей совокупности и при данном n , получены функции относительных ошибок:

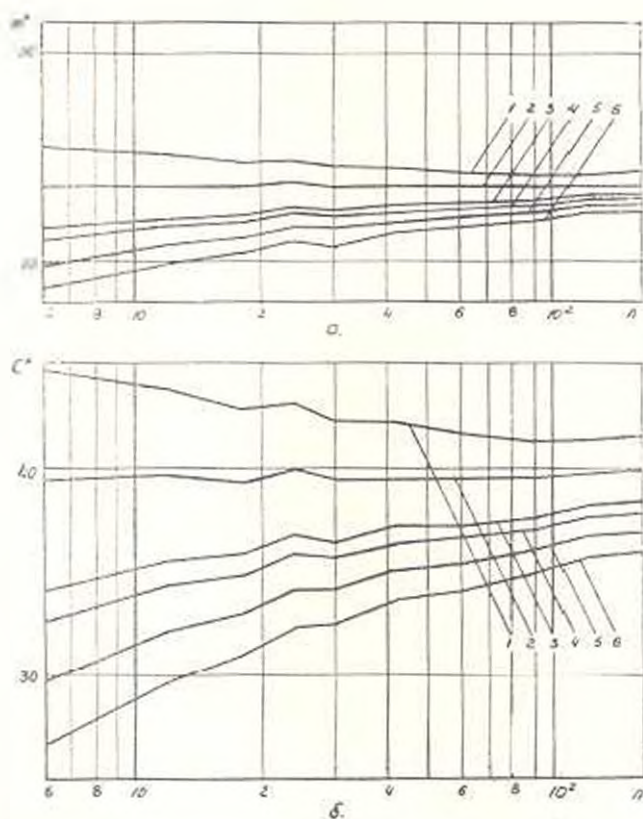


Рис. 3. Изменение показателя и параметра обобщенной кривой усталости от объема выборки n : а — m^* ; б — C^* . Кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют вероятности разрушения $P(N)$ — 0,1, 0,3, 0,4, 0,95, 0,9 и 0,999.

а) по пределу выносливости — $\lg \delta_s = S_p - M_p \lg N_s$; (9)

б) по заданному уровню N_s — $\lg \delta_N = \Delta C - \Delta m \lg \tau_s$, (10)

где

$$S_p = (C_0/m_0 - C_p^*/m_p^*); M_p = (m_0^{-1} - m_p^{*-1}); \Delta C = C_0 - C_p^*; \Delta m_p = m_0 - m_p^*.$$

Используя функции распределения (3) для сопоставимых испытаний, аналогично получаем выражение для количественной оценки

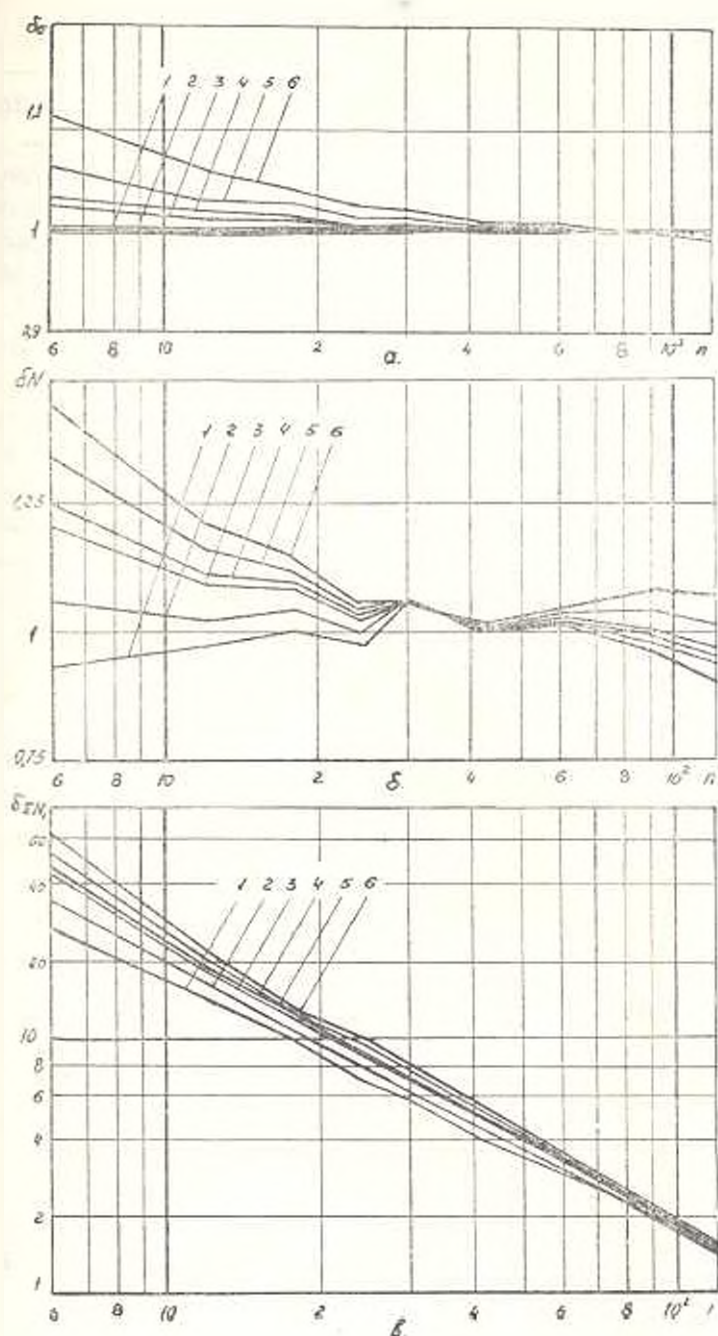


Рис. 4. Изменение δ_0 , δ_N и δ_{EN} от объема выборки n . Обозначения аналогичны рис. 3.

Функ- ция	$P(N)$, %	a	b_{yx}	r	$ u $	r_1	r_2	r_3
$C^* = f_1(n)$	10	46,1937	-2,3697	-0,9484	1,8687	-0,9892	-0,8103	-0,9273
	50	39,3543	0,1592	0,3202	0,3496	—	—	—
	90	32,5148	2,6882	0,9724	2,1881	0,8952	0,9943	0,9879
	95	30,5925	3,3983	0,9758	2,2549	0,9077	0,9950	0,9879
	99	26,9043	4,7627	0,9782	2,3077	0,9165	0,9955	0,9879
	99,9	22,8431	6,2643	0,9788	2,3234	0,9190	0,9956	1,0
$R^* = f_2(n)$	10	16,0698	-0,9515	-0,9501	1,8886	0,9697	-0,8170	-0,9273
	50	63,4415	0,0611	0,3137	0,3421	—	—	—
	90	10,8191	1,0738	0,9733	2,2064	0,8987	0,9945	0,9879
	95	10,0507	1,3585	0,9767	2,2750	0,9111	0,9952	0,9879
	99	8,6555	1,9344	0,9790	2,3266	0,9195	0,9957	0,9879
	99,9	7,1067	2,5056	0,9796	2,3424	0,9219	0,9958	1,0
$z_0 = f_3(n)$	10	0,9963	0,0040	0,8236	1,2195	0,3964	0,9654	0,7833
	50	1,0038	-0,0011	-0,2918	0,3187	—	—	—
	90	1,0337	-0,0177	-0,9310	1,7244	-0,9373	-0,7279	-0,9667
	95	1,0481	-0,0255	-0,9429	1,8224	-0,9895	-0,7708	-0,9667
	99	1,0863	-0,0461	-0,9482	1,8731	-0,9905	-0,7906	-0,9435
	99,9	1,1510	-0,0810	-0,9435	1,8280	-0,9896	-0,7731	-1,0
$b_N = f_4(n)$	10	0,8577	0,1058	0,9117	1,5995	0,6509	0,9835	0,9167
	50	1,0529	-0,0151	-0,2988	0,3280	—	—	—
	90	1,2768	-0,1513	-0,9152	1,6156	-0,9442	-0,6726	-0,8833
	95	1,3431	-0,1915	-0,9291	1,7119	-0,9869	-0,7220	-0,9667
	99	1,4757	-0,2717	-0,9414	1,8092	-0,9892	-0,7654	-0,9667
	99,9	1,6279	-0,3633	-0,9441	1,8360	-0,9898	-0,7762	-0,9749
$z_{2N} = f_5(n)$	10	2,1933	-0,9731	-0,9995	4,2215	-0,9999	-0,9979	1,0
	50	2,3378	-1,0435	-0,9998	4,7211	-1,0	-0,9992	
	90	2,4822	-1,1139	-0,9995	4,1918	-0,9999	-0,9977	
	95	2,5221	-1,1337	-0,9993	4,0445	-0,9999	-0,9970	
	99	2,6095	-1,1716	-0,9999	3,8055	-0,9998	-0,9951	
	99,9	2,6865	-1,0137	-0,9983	3,6024	-0,9997	-0,9927	

коэффициента $\delta_{LM} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\sum_{i=1}^m N_{i,n}}$, учитывающего снижение длительности испытаний

$$\lg \delta_{LM} = \Delta \lg \sum N_p + z_p \Delta s_{\lg \sum N_p}, \quad (11)$$

где

$$\Delta \lg \sum N_p = \lg \sum_{i=1}^n N_i - \lg \sum_{i=1}^m N_{i,n}, \quad \Delta s_{\lg \sum N_p} = s_{\lg \sum N_i} - s_{\lg \sum N_{i,n}}.$$

На рис. 4а, б представлены вероятностные значения δ_z и δ_N , соответствующие точке перегиба кривой усталости для общей совокупности ($\bar{z}_{p0}$, $\bar{N}_{c0}$), а на рис. 4в — значения δ_{zN} . Как и на рис. 3, резкое изменение значений δ_z и δ_N происходит при $n < 12$, а для оптимального интервала $n = 18 - 25$ и при $P(N) = 0,95 - 0,999$, представляющем интерес для уточненных расчетов, исходные характеристики прочности и долговечности должны быть скорректированы на величину $\delta_z = 1 - 1,06$ и $\delta_N = 1,03 - 1,18$. При этом продолжительность испытаний по сравнению с $n = 160$ сокращается, примерно, на порядок ($\delta_{zN} = 9 - 12,9$), что имеет немаловажное значение для повышения производительности испытаний.

Характер изменения графиков на рис. 3 и 4 позволяет, используя расчетную процедуру (4) — (7), получить сравнительно простые линейные связи, пригодные для инженерных расчетов и обобщающие комплекс проведенного статистического исследования. Результаты расчетов представлены в табл. 4. Критериальные оценки по (5) и (6) для 9 (δ_z , δ_N , δ_{zN}) и 10 серий вычислений (C^* , m^*) соответственно равны $z_{1-\frac{\alpha}{2}} s_z = 0,8$, $0,741$ и $z_{1-\frac{\alpha}{2}} s_{zN} = 0,653$, $0,636$ ($\alpha = 0,05$), что подтверждают высокую степень корреляционной связи между C^* , m^* , δ_z , δ_N , $\lg \delta_{zN}$ и $\lg n$ согласно неравенствам (5) и (6). Для медианных значений C^* , m^* , δ_z и δ_N подтверждается их некоррелированность от объема выборки, что согласуется с данными рис. 1. Выявленные связи, которые фактически являются многомерными, позволяют построение номограммы в координатах $\delta_N - \delta_z - \lg n - \lg \delta_{zN}$, где параметром является вероятность неразрушения $P(N)$. Графическим способом из этой номограммы при заданных уровнях δ_N и δ_z можно получить минимальный объем и продолжительность испытаний на усталость.

Проведенный статистический эксперимент позволил для равномерной выборки данных определить оптимальный объем испытаний ($n = 18 - 25$). Дальнейшим развитием этого метода является рациональное распределение данных по этим уровням для дальнейшей минимизации длительности испытаний.

ՀԱՅԿԱՍՏԱՅԻՆ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ՓՈՏԻՄԵՂԱՅՄԱՆ ՀԱՐՑԵՐԸ

Ա. մ փ ո փ ո մ

Նախկինում կատարված դանդաղածալին փորձարկումների հիման վրա էՀՄ-ի միջոցով մոդելավորված է հոգնածալին լարորաստորիալուս տարվող աշխատանքների իրական ֆիզիկական պրոցեսը: Վերջինից լեզվով մշակված են ալգորիթմներ և հաշվարկային ծրագրեր ու նրանցով իրականացված է վիճակագրական փորձարկում՝ Մոնտե-Կառլոյի մեթոդով փորձի տվյալների ամբողջությունից առանձին ընտրվածք ձևավորելու համար: Յուրաքանչյուր ընտրվածքի ծավալի համար հաշվարկված են հոգնածալին կորի պարամետրերը, իսկ նրանց զուգամիտումը ապահովելու համար տվյալների պատահական որոնումը բաղապատիկ անգամ կրկնված է: Ստացված են այդ պարամետրերի փոփոխման շարքերը և ապացուցված է նրանց նորմալ բաշխումը, որը թույլ է տվել որոշել նրանց հավանական աղծվածքները ընդհանրացված հոգնածալին կորերի համար: Ապացուցված է այդ պարամետրերի միջին արժեքների կայունությունը և ստացված են աղբյուրություններ նրանց ցրման մեծությունները ընտրվածքի ծավալի փոփոխությունից որոշելու համար: Փորձարկումների ծավալի օպտիմիզացման համար ստացված են դիմացկունության սահմանի և ցիկլային երկարակենցության մակարդակի հարաբերական սխալի δ_1 և δ_2 ֆունկցիաները: Յուրյ է տրված, որ պատահականում դեպքում պողպատ 45-ից պատրաստված փորձանմուշների համար օպտիմալ է համարվում $n = 18-25$ ընտրվածքի ծավալը, որը ապահովում է հաշվարկների ճշտություն $\delta_0 = 1,03-1,06$ և $\delta_1 = 1,03-1,20$ մակարդակով և կրճատում է փորձարկումների մասկետը $9-13$ անգամ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шахматов Л. М. Методы усталостных испытаний: Справочник.—М.: Металлургия, 1978.—320 с.
2. Степанов М. И. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник.—М.: Машиностроение, 1985.—232 с.
3. Багдасар Р. Д., Шихорина О. И., Хрипина Л. А. Моделирование при испытаниях на усталость // Испытание деталей машин на прочность.—М.: Машгиз, 1960.—С. 24—52.
4. Степанов М. Г., Оганесян Л. Г., Исаханян Н. С. Исследование параметров режимов нагружения шпоночных соединений // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1987.—Т. XI. № 6.—С. 8—18.
5. Степанов М. Г., Исаханян Н. С. Оптимизация методов исследования прочности и долговечности деталей передаточных механизмов // Теория и конструирование машин: Межвуз. тем. сб. науч. тр. по маш.—Ереван, 1983.—С. 77—85.
6. Степанов М. Г., Исаханян Н. С. Циклическая прочность и долговечность шпоночных соединений // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1982.—Т. XXXV, № 4.—С. 8—15.

С. О. ХАЧАТРИАН, Г. К. МАРТИКЯН

ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ
В ЗАДАЧАХ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Предлагается практический метод расчета зданий на сейсмостойкость с учетом волновых процессов с использованием акселерограмм прошлых землетрясений. При этом определяются смещения на разных уровнях здания, модель которого представляется в виде консольного дискретного стержня, с применением волновой теории.

Рассмотрим распространение поперечных сейсмических волн со скоростью v вдоль оси x , перпендикулярной поверхности земли. Волновые уравнения для однородной структуры представляются в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

а их решение — в виде [1]:

$$U(x, t) = \bar{P}\left(t - \frac{x}{v}\right) + \Psi\left(t + \frac{x}{v}\right),$$

где $\bar{P}\left(t - \frac{x}{v}\right)$ соответствует волне, идущей вдоль положительного направления оси ox , а $\Psi\left(t + \frac{x}{v}\right)$ — в противоположном направлении.

Для решения задачи необходимо установить параметры волны $\bar{P}\left(t - \frac{x}{v}\right)$, для чего сделаем следующие допущения.

При неглубоком залегании фундамента будем считать, что: а) здание опирается на основание и не имеет связи с грунтом по боковым поверхностям; б) растягивающие напряжения между подошвой и основанием при совместном действии статистической и сейсмической нагрузок равны нулю; в) касательные напряжения вдоль плоскости соприкосновения фундамента и основания не должны превышать силы трения.

Инструментальная запись акселерограммы землетрясений представим в виде последовательно действующих импульсов, продолжительность которых намного меньше периода свободных относительных колебаний первого этажа зданий. При действии первого импульса фундамент с массой M_0 получает скорость. Из условия равенства величины импульса $I = P\Delta t$ и приращения количества движения $M_0 v$

за время Δt получим: $P\Delta t = M_0 v$, откуда $v = \frac{P\Delta t}{M_0}$. За этот срок времени Δt действия импульса масса M_0 получает перемещение

$$\Delta U = \frac{v\Delta t}{2} = \frac{P\Delta t^2}{2M_0}.$$

откуда следует, что в течение времени Δt воздействия вынуждающей силы конструкция получает только изменение скорости, после чего возникают колебания конструкции. В отличие от спектральной теории, перемещения конструкций на разных уровнях здания не возникают одновременно, обусловленные конечной скоростью распространения сейсмической волны смещений.

Проследим за распространением волны

$$\tilde{P}\left(t - \frac{x}{v}\right) = Ue^{i\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)}.$$

В течение времени $\frac{x}{v} = t_1$ волна перемещается на расстояние $x = vt_1$, и

$$\tilde{P}(t - t_1) = Ue^{i\omega(t - t_1)} = (A - iB)e^{i\omega(t - t_1)}. \quad (2)$$

Возьмем действительную часть уравнения (2):

$$\operatorname{Re}[\tilde{P}(t - t_1)] = A \cos \omega(t - t_1) + B \sin \omega(t - t_1). \quad (3)$$

Продифференцировав уравнение (3) и имея в виду, что $t = t_1 \rightarrow 0$, $\Delta t_1 = 0$ и $v = \frac{P\Delta t}{M_0}$, получим: $B = \frac{v}{\omega} = \frac{P\Delta t}{\omega M_0}$, следовательно

$$\tilde{P}\left(t - \frac{x}{v}\right) = \frac{P\Delta t}{M_0 \omega} \sin\left(t - \frac{x}{v}\right),$$

а при действии второго и последующих n импульсов—

$$\tilde{P}(t - n\Delta t) = \sum_{i=1}^n \frac{P(n\Delta t) \Delta t}{M_0 \omega} \sin \omega(t - n\Delta t).$$

Установим время t^* , при котором смещение фундамента получается максимальным: $t^* = \frac{x}{v} = n\Delta t$. Тогда:

$$\tilde{P}_1(t) = \int_0^t \frac{P(\xi)}{\omega M_0} \sin \omega\left(t - \frac{\xi}{v}\right) d\xi. \quad (4)$$

Естественно предполагать, что чем меньше скорость волны, тем больше энергии накапливается в здании. Наименьшая скорость, согласно [2] равна

$$V_{\phi \min} = \frac{2}{\pi} \omega_1 H_1,$$

при которой длина волны имеет наименьшее значение $\lambda = 2H_1$, а частота и период равны $\omega = 2\omega_1$ и $T = \frac{T_1}{2}$, в этом случае $t^* = \frac{T_1}{2}$.

При этом волна проходит путь $x = \frac{T_1}{2} \omega_1 H_1$, $x = 2H_1$.

Максимальное значение перемещения фундамента для любого фиксированного $t=t_1$ с учетом рассеяния энергии определяется по формуле

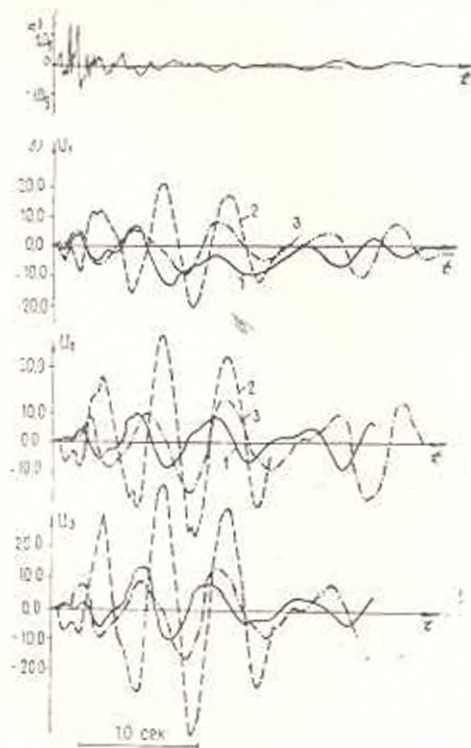
$$\bar{P}_1(t) = \frac{1}{2\omega_1} \int_0^t U_0(\tau) e^{-\omega_1(t-\tau)} \sin 2\omega_1(t-\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $U_0(\tau) = \frac{P(\tau)}{AI_0}$ — запись ускорения грунта.

Имея значение функций $\bar{P}_1(t)$, нетрудно определить перемещение любого уровня здания. Так, согласно выражению, приведенному в [3], перемещение k -ой массы консольной расчетной схемы при отсутствии отражений и преломлений на уровне междуэтажных перекрытий определяется:

$$U_k(t) = \bar{P}_1\left(t - \sum_{j=1}^k \frac{H_j}{v_j}\right) - 2\bar{P}_1\left(t - \sum_{j=1}^k \frac{H_j}{v_j} - \sum_{j=1}^n \frac{H_j}{v_j}\right). \quad (6)$$

Рис. а) акселерограмма сейсмозрывного воздействия; б) сейсмограммы, зарегистрированные и построенные по расчетам на этажах модели здания. 1 — зарегистрированные при сейсмозрывном воздействии; 2 — построенные по результатам расчета спектральной теории; 3 — построенные по результатам расчетов волновой теории.



Чтобы получить достоверные результаты расчетов, необходимо иметь конкретные значения физико-механических параметров строй-



материалов и конструкций, которые лучше всего установить при интенсивных сейсмических воздействиях. Но до сих пор полных данных, включающих записи на этажах, фундаменте, и жесткостные характеристики до и после интенсивных сейсмических воздействий крайне мало. Такие данные имеются для крупномасштабных моделей, подвергшихся сейсмовзрывным воздействиям [4]. На рисунке приведены сейсмограммы сейсмовзрывного воздействия, зарегистрированные на грунте, фундаменте и на этажах модели.

Сопоставлением графиков смещений, построенных по формуле (5), с реальной записью, зарегистрированной на свободной поверхности грунта, устанавливаем значения $\omega_1^* = 15 \text{ с}^{-1}$ и $T_1^* = 0.42 \text{ с}$. Имея сейсмограмму на свободной поверхности грунта, легко построить сейсмограммы на уровнях перекрытий. Вычисления осуществляются по формуле (6) на ЭВМ и графическим способом. На рисунке приведены сейсмограммы, полученные по расчету на ЭВМ. Расчеты графическим способом и на ЭВМ привели к расхождению значений амплитуд не более, чем на 15%. Для сравнения результатов на рисунке приведены также сейсмограммы, построенные по расчетам спектральной теории. Сопоставляя графики смещений на уровнях этажей, можно заключить, что предложенный метод расчета дает более достоверные результаты, чем спектральный метод.

Предложенный практический метод расчета на сейсмостойкость с учетом конечной скорости распространения волны смещений в конструкции можно применять при исследовании поведения зданий и сооружений при землетрясениях.

ИНСТИТ АН АрмССР

27. VI. 1985

II. Հ. ԿԱԶԱՅԱՆ, Գ. Կ. ՄԱՐՏԻՍՅԱՆ

ԵՐԿՐԱՆԱԲԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐՈՒՄ ԱՎԳԱՅԻՆ ՏՆՈՒԹՅԱՆ ՕԳՏԱԿԱՐԾՄԱՆ ԳՈՐԴՆԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴ

Ա. մ թ ո թ ո ռ ռ

Հոգնվածում բերված է ախրային տեսությունը շենքերի և կառույցների երկրաշարժակայունության հաշվման գործնական մեթոդիկա՝ առանց էՄ-ի օգտագործման: Որպես հաշվարկային սխեմա վերցված է միջհարկային ծածկերի մակտրդակներում կենտրոնացված դանդաժներով կոնսոլային ձողի նշված մեթոդիկայով կատարված հաշվարկների արդյունքները համեմատված են սպեկտրայի և ախրային տեսություններով էՄ-ի օգնությամբ կատարված հաշվարկների արդյունքներին: Հետև համատարված է, որ առաջարկվող մեթոդիկան չի բերում նկատելի սխալներ:

- 1 Вицадзе А. В. Уравнения математической физики.—М.: Наука, 1982—336 с.
- 2 Назаров А. Г. Колебания упругой системы с одной степенью свободы при землетрясении с учетом скачкообразного изменения её жесткости // ДАН АрмССР.—1967—Т. XIV, № 5.—С. 203—208.
- 3 Напетваридзе III. Г., Хачатрян С. О Совместный учет волнового процесса и локальных повреждений в зданиях при расчете на сеймостойкость // Анализ последствий землетрясений: Сб. науч. тр. —М., 1982, ЦНИИСК.—С. 32—45
- 4 Микацкян В. Л., Назаров А. Г. Эксперименты на моделях обычных сейсмостойких зданий.—Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1984—86 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 3, 1988

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Ю. А. ГАСПАРЯН, А. В. АРШАКЯН, С. А. МАРКАРЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ НИЗКОЧАСТОТНОГО РЕЗОНАНСНОГО ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЯ С ВНУТРЕННЕЙ ПАНЕЛЮ НА УПРУГИХ СВЯЗЯХ

Для снижения основной резонансной частоты звукопоглотителя (ОРЗП) предложен новый способ смещения частоты в низкочастотную область [1]. Составим уравнения движения акустической системы, схема которых показана на рис. 1. При падении плоской звуковой волны в резонансную полость 1 через горловину, площадь входного поперечного сечения которой равна S_0 , а длина— l_0 , там же действует избыточное акустическое давление $P(t)$. Резонансные полости 1, 2 связаны с помощью перфорированной панели 3, имеющей толщину t и упруго опертой по краям с помощью пружинных подвесов с жесткостью k . Площадь отверстий перфорации обозначим S_p , их число— n , а площадь поперечного сечения резонатора— S . Когда перфорированная панель находится в состоянии равновесия, глубины секций камер 1 и 2 равны l_1 и l_2 . Панель может смещаться под воздействием звуковых волн на расстояние X . Для составления уравнений движения механической колебательной системы, состоящей из отдельных звеньев с массами m , и упругостью k , удобно применять метод Даламбера.

ОРЗП имеет по одной степени свободы для горловины и каждой резонансной полости 1, 2 и одну степень для упруго опертой панели. Согласно рекомендациям [2] в частотном диапазоне его работа в простейшем случае теоретически описывается системой для связанных линейных осцилляторов.

Рассматривая движение скорости воздуха и давление звуковой волны в отверстиях перфорации и балансовые соотношения в объемах камер, используя осредненное изменение импульса, получаем линейные системы уравнений:

$$\rho_0 l_0 \dot{U}_0 = P_0 - P_1; \quad \rho_0 l_0 \dot{U}_1 = P_1 - P_2; \quad \dot{X} + \omega_2 X = (P_2 - P_1) / \rho_n \tau; \quad (1)$$

$$\rho_1 l_1 + \rho X = \rho_0 \frac{S_0}{S} U_0 - \rho_0 \frac{S_z}{S} (U_1 - X); \quad \rho_1 = \rho_0 / \epsilon^2;$$

$$\rho_2 l_2 - \rho_0 X = \rho_0 \frac{S_z}{S} (U_1 - X); \quad \rho_2 = \rho_0 / \epsilon^2.$$

Преобразуя величины из (1), получаем:

$$\begin{aligned} & \ddot{P}_1 + \frac{\epsilon^2}{\tau l_1} \left[\left(\frac{\tau}{l_0} \cdot \frac{S_0}{S} + \frac{S_z}{S} + \frac{\rho_0}{\rho_1} S_1 \right) \right] + \\ & + \frac{(\epsilon \rho)^2}{\tau l_1} \left[\frac{l_0}{\rho_n} + \frac{S_z}{S} S_1 \right] - S_1 \frac{\rho (\omega, \epsilon)^2}{l_1} = \frac{\epsilon^2 \rho}{l_0 l_1} \cdot \frac{S_0}{S}; \\ & \ddot{P}_2 + \frac{\epsilon^2}{\tau l_2} \left[\frac{S_z}{S} - \frac{l_0}{\rho_n} S_1 \right] (P_2 - P_1) + \frac{\rho_0 (\omega, \epsilon)^2}{l_2} S_1 X = 0; \\ & \dot{X} + \omega_2 X - \frac{P_1 - P_2}{\rho_n \tau} = 0; \quad \left(1 - \frac{S_z}{S} \right) = S_1. \end{aligned} \quad (2)$$

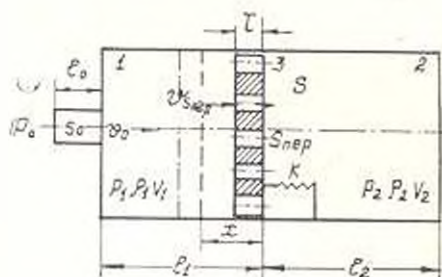


Рис. 1. Схема двухсекционного объемного низкочастотного звукопоглотителя

Исследуем собственные колебания резонансного поглотителя рассматриваемого типа. Зная, что $P_1 = P_1^0 e^{i\omega t}$, $X = X^0 e^{i\omega t}$, $P_2 = P_2^0 e^{i\omega t}$, где P_1^0 , P_2^0 , X^0 — амплитуды, а ω — круговая частота колебаний, условие совместности однородных уравнений (2) позволяет записать характеристическое уравнение частот системы в виде определителя:

$$\begin{vmatrix} \frac{\epsilon^2}{\tau l_1} \left(\frac{S_0}{S l_0} + \frac{S_z}{S} + \frac{S_1 l_0}{\rho_1} \right) - \omega^2 & - \frac{\epsilon^2}{\tau l_1} \left(\frac{S_z}{S} + \frac{l_0 S_1}{\rho_n} \right) - \frac{\epsilon^2 \rho_0 S_1 \omega^2}{l_1} \\ - \frac{\epsilon^2}{\tau l_2} \left(\frac{S_z}{S} + \frac{l_0 S_1}{\rho_n} \right) & \frac{\epsilon^2}{\tau l_2} \left(\frac{S_z}{S} - \frac{l_0 S_1}{\rho_n} \right) - \omega^2 \frac{\epsilon^2 \rho_0 S_1 \omega^2}{l_2} \\ - \frac{1}{\rho_n \tau} & \frac{1}{\rho_n \tau} \end{vmatrix} \omega^2 - \omega^2 = 0, \quad (3)$$

который приводит к кубическому уравнению для квадрата частоты в безразмерном виде:

$$\omega^6 - \alpha \omega^4 + \beta \omega^2 - \gamma = 0; \quad \omega_2 = \omega_1 \frac{l_1 + l_2}{c}; \quad \alpha = \frac{S_0}{\rho_n \tau} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}\alpha &= \omega \frac{l_1 + l_2}{c}; \quad \beta = \frac{\bar{S}_0 + \kappa(1 - \bar{S}_0)}{\bar{z} \bar{l}_1 \bar{l}_2} + \frac{\bar{S}_0}{l_0 l_1} + \omega^2; \\ \gamma &= \frac{\omega^2}{\bar{l}_1} \left(\frac{\bar{S}_0}{\bar{z} \bar{l}_1} + \frac{\bar{S}_0}{\bar{l}_2} \right) + \frac{\bar{S}_0 [S_0 + \kappa(1 - \bar{S}_0)]}{\bar{z} \bar{l}_0 \bar{l}_1 \bar{l}_2}; \quad \tau = \frac{\bar{S}_0 \bar{S}_0 \omega^2}{\bar{z} \bar{l}_0 \bar{l}_1 \bar{l}_2}.\end{aligned}$$

При этом геометрические параметры резонатора имеют вид:

$$\begin{aligned}\bar{S}_0 &= \frac{S_0}{S}; \quad \bar{S}_1 = \frac{S_1}{S} = \frac{n S_0}{S}; \quad \bar{z} = \frac{z}{l_1 + l_2}; \\ \bar{l}_0 &= \frac{l_0}{l_1 + l_2}; \quad \bar{l}_1 = \frac{l_1}{l_1 + l_2}; \quad \bar{l}_2 = \frac{l_2}{l_1 + l_2}.\end{aligned}$$

Значения ω , для которых определитель (3) равен нулю, являются собственными частотами системы. Между акустическими и механическими параметрами резонатора существуют соотношения акустических масс воздуха в горле, резонирующей полости и в отверстиях перфорации, которые равны: $m_g = \rho_0 S_0 L$, $m_p = \rho_0 S L$, $m_{out} = \rho_0 S_0 z$, и колебания панели $m_p = \rho_n z (S - S_0)$. В долях сечения горловины, резонатора и перфорированной панели с учетом $\frac{m}{S^2}$ имеем: $M_g = \rho_0 l_0 S_0$,

$$M_p = \frac{\rho_0 L}{S}; \quad M = \frac{\rho_n z}{S - S_0}; \quad \frac{M}{M_g} = \frac{\rho_n}{\rho_0} \left(\frac{S}{S_0} - 1 \right).$$

Акустическая гибкость воздушного промежутка в горле, резонирующей полости и панели резонатора, а также жесткость пружин равны: $k_g = \rho_0 c^2 S L$; $k_{out} = \rho_0 c^2 S_{out} z$; $k_n = k_n (S - S_0)^2$, откуда соответствующие собственные частоты с учетом $\omega^2 = k/M$ и концевых поправок можно записать:

$$\omega_g = c [S_0 \kappa (1 + 2\bar{z})]^{-1}; \quad \omega_{1,2} = c [S_0 S_1 / \bar{l}_1]^{-1}; \quad \omega_n = [k_n z^2 (S - S_0)]^{-1}.$$

Умножив уравнение (4) на $[c(l_1 + l_2)]^2$ и учитывая, что $\omega^2 = \omega \frac{l_1 + l_2}{c}$, после преобразования запишем:

$$\begin{aligned}\omega^6 - \alpha_1 \omega^4 + \beta_1 \omega^2 - \tau &= 0; \quad \gamma \left(\frac{c}{l_1 + l_2} \right)^6 \equiv \gamma = (\omega_1 \omega_2 \omega_3)^2; \\ \left(\frac{\alpha c}{l_1 + l_2} \right)^2 &\equiv \alpha_1 = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 \left(1 + \frac{M}{M_0} \right) \left(1 + \frac{l_2}{l_1} \right); \\ \left(\frac{\beta c}{l_1 + l_2} \right)^2 &\equiv \beta_1 = \omega_1^2 \left[\omega_1^2 + \omega_2^2 \left(1 + \frac{l_2}{l_1} \right) \right] + \left(1 + \frac{M}{M_0} \right) \omega_1 \omega_2.\end{aligned} \quad (5)$$

Проведем исследование уравнения (4). Для этого положим $y = \omega^2$ и запишем уравнение в виде:

$$f(y) = y^3 - \alpha y^2 + \beta y - \tau = 0. \quad (6)$$

Если $S_1 > \alpha$, что выполняется практически всегда, то параметры α , β , γ положительны. Функция $f'(y)$ обращается в нуль в точках $y_{1,2}$, если выполняется условие $\alpha^2 > 3\beta$ и тогда: $y_{1,2} = \frac{\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - 3\beta}}{3}$, а если $\alpha^2 < 3\beta$, то корни $y_{1,2}$ комплексные. Поскольку в этом случае кубическое уравнение (6) имеет единственный вещественный корень и $f_0 = -\gamma$, то этот корень положителен; обозначим его через $y_1 = \omega_1$. Если $\alpha^2 = 3\beta$, то могут быть три случая: $\gamma > \left(\frac{\alpha}{3}\right)^3$, $\gamma < \left(\frac{\alpha}{3}\right)^3$, $\gamma = \left(\frac{\alpha}{3}\right)^3$.

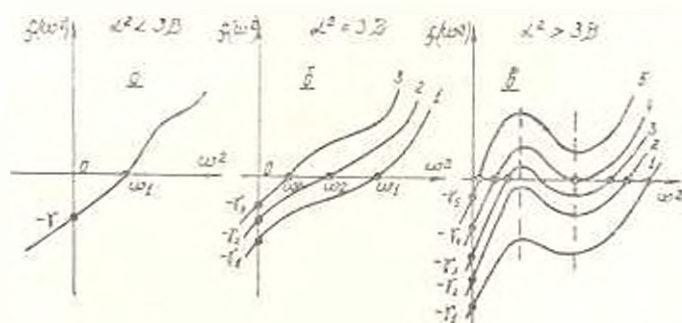


Рис. 2. Графики собственных резонансных и антирезонансных частот звукопоглотителя.

Пересечение кривых γ_i с осью абсцисс характеризует собственные резонансные частоты резонатора, а максимумы — антирезонансные частоты. В первых двух случаях (рис. 2а и 2б) при $\alpha^2 < 3\beta$ получаем одну резонансную частоту, а при $\alpha^2 > 3\beta$ (кривые γ_{10} , γ_1 и γ_2) — одну резонансную и по две антирезонансные частоты. Кривые γ_{10} , γ_1 имеют по две резонансные и антирезонансные частоты и характер их хода с оптимальными геометрическими параметрами резонатора является наиболее выгодным при проектировании низкочастотных звукопоглотителей. Заметим, что параметр κ в (4) удовлетворяет неравенству $\kappa = \frac{\rho_n \beta_n}{\rho_0} \ll 1$. Действительно, невозмущенная плотность ρ_n воздуха $\rho_0 = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, тогда как материал панели из дерева или полимерных материалов имеет плотность $\rho_n = 0,5 - 1 \text{ г/см}^3$. Таким образом, параметр κ в (4) имеем порядок $\kappa = (1,3 - 2,6) \cdot 10^{-3}$.

В случае двухкамерного резонатора ОРЗПП, когда перфорированная панель неподвижна, что соответствует $k \rightarrow \infty$, $\omega_1 \rightarrow \infty$, формула (4) имеет вид:

$$\omega^4 - \beta_{01} \omega^2 + \gamma_{01} = 0; \quad \beta_{01} = \omega_1^2 + \omega_2^2 \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right); \quad \gamma_{01} = (\omega_1 \omega_2)^2;$$

$$\omega_{1,2}^2 = 0,5 \left[\omega_1^2 + \omega_2^2 \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right) \pm \left| \omega_1^2 + \omega_2^2 \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right) \right|^2 - (2\omega_1 \omega_2)^2 \right]^{1/2}.$$

В случае двухкамерного резонатора со сплошной внутренней упругой панелью ($S_2 = 0$): $\alpha_1 = \omega_1^2 + \frac{S_3}{l_1 l_2} + \frac{x}{z l_1 l_2}$; $\gamma_1 = 0$; $\beta = \frac{S_3}{l_1 l_2} \left(\omega_1^2 + \frac{x}{z l_2} \right)$, а уравнение для собственных частот принимает вид:

$$\omega^4 - \alpha_{12} \omega^2 + \beta_{12} = 0; \quad \alpha_{12} = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2; \quad \beta_{12} = \omega_1^2 (\omega_2^2 + \omega_3^2);$$

$$\omega_1^2 = \frac{1}{S_1} \frac{M}{S_1 + M} \omega_0^2 - \frac{P_0}{S_1} \left(\frac{c}{l} \right)^2;$$

$$\omega^2 = 0,5 [(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2) \pm [(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2)^2 - 4\omega_1^2 (\omega_2^2 + \omega_3^2)]^{1/2}].$$

При применении ОРЗП11 размером $(50 \times 50 \times 20)$ см сечением (4×4) , (8×8) см и длиной горла 8 и 10 см с коэффициентом перфорации $\alpha = 0,01 - 0,1$ податливой внутренней панели и жесткостью пружин $k = (1,2 - 2) \cdot 10^6$ дин/см собственные частоты резонатора равны: $f_{min} = 2 - 34$ Гц, $f_{up} = 10 - 280$ и $f_{max} = 150 - 800$ Гц.

ЕрП11 им. К. Маркса

9. III. 1987

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ Ա. Վ. ԱՐԵՎԿՅԱՆ, Ս. Ա. ՄԱՐԿՍՅԱՆ

ԱՌՍԱԿԵԱԿԱՆ ԿԱՊԵՐԻ ՎՐԱ ԴՐՎԱՅ ՆԵՐՔԻՆ ՊԱՆԵԼԻՈՎ ՅԱՄՐ
ՀԱՆՈՒՍԿԱՆՈՒԹՅԱՆ, ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՆՅԻՆ ՉԱՅՆԱԿԱՆՈՎ
ՍԵՓԱԿԱՆ ՀԱՆՈՒՍԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԲՐՈՇՈՒՄԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Կապակցված տատանակների տեսության առաջնությունից հարմ ձայնալին ալիքի դաշտում դիտարկվում է ձայնադիտական սեղանատարի աշխատանքը: Որոշված էն առաձգական կապերի վրա դրված ներքին պանելով ցածր հաճախականության ռեզոնատորի սեփական հաճախությունները: Կատարված է ռեզոնանսային ձայնակայանի ռադիական ուսումնասիրությունը և նշվում է համակարգի պարամետրերի ճիշտ բնութագրման դեպքում ռեզոնանսային հաճախության իջեցման փարսափորությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А. с. 1350284 СССР, МКПЧ Е04В1 81 Резонансный широкополосный звукоогло-
титель / Ю. А. Гаспарян, Л. А. Борисов (СССР) — № 3939248; Заяв 15. 4.
1985; Оpubл. 7. 11. 1987, Б11, № 41 — 3 с.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц М. Е. Механика сплошных сред — М. Наука. 1954. —
807 с.
3. Лепендин Л. Ф. Акустика. — М. Высш. школа. 1976. — 447 с.

Э. А. ЭТМЕКЧЯН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ
РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проблема расчета установившегося режима электрической системы продолжает оставаться актуальной [1—3], однако до конца не решен вопрос, связанный с заданием различной информации относительно стационарных узлов, чему и посвящена настоящая работа.

Рассматривается электрическая система, состоящая из $(M+1)$ узловых точек. Каждый узел характеризуется четырьмя режимными параметрами—активной и реактивной мощностями, модулем и аргументом комплексного напряжения. Из них для каждого узла задаются лишь два, а остальные два параметра определяются решением соответствующей системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима электрической системы. Узлы классифицируются следующим образом.

1. Типа $U-\varphi$, для которых задаются модуль и аргумент комплексного напряжения и необходимо определить активную и реактивную мощности. В качестве такого узла выбирается стационарный узел, называемый базисным.

2. Типа $P-U$, для которых задаются активная мощность и модуль комплексного напряжения и необходимо определить реактивную мощность и аргумент комплексного напряжения. Узлами такого типа могут быть только стационарные узлы.

3. Типа $P-Q$, для которого задаются активная и реактивная мощности и необходимо определить модуль и аргумент комплексного напряжения. Узлами такого типа могут быть как стационарные, так и нагрузочные узлы.

Принимается следующая система индексов—для стационарных узлов типа $P-U$: $m (n)=0, 1, 2, \dots, \Gamma$ (узел с нулевым индексом выбирается в качестве базисного); для стационарных узлов типа $P-Q$ и для нагрузочных узлов: $k (l)=\Gamma+1, \Gamma+2, \dots, \Gamma+N=M$.

Матричное уравнение установившегося режима в Y -форме с учетом выбранной системы индексов можно представить:

$$\begin{bmatrix} \frac{I_m}{I_l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{mn}}{Y_{ln}} \left| \frac{Y_{mk}}{Y_{lk}} \right. \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{U_m}{U_n} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где I_m, I_l —комплексные токи узлов типа $P-U$ и $P-Q$; U_m, U_n —комплексные напряжения узлов типа $P-U$ и $P-Q$ относительно напряжения базисного (балансирующего) узла; Y_{mn} —собственные и взаимные комплексные проводимости между узлами типа $P-U$; Y_{mk}, Y_{lk} —взаимные комплексные проводимости между узлами типа

$P-U$ и $P-Q$; $Y_{\alpha\kappa}$ — собственные и взаимные комплексные проводимости между узлами типа $P-Q$.

После определенных преобразований матричное уравнение (1) можно представить в виде:

$$\left[\frac{I_m}{U_{\alpha\alpha}} \right] = \left[\frac{Y_{m,n}}{C_{\alpha,\alpha}} \frac{A_{m,n}}{Z_{\alpha,\alpha}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\alpha\alpha}}{I_l} \right], \quad (2)$$

где

$$Y_{m,n} = Y_{mq} - Y_{mk} Y_{\alpha\alpha}^{-1} Y_{lq}, \quad Z_{\alpha\alpha} = Y_{\alpha\alpha}^{-1}; \quad (3a)$$

$$A_{m,l} = Y_{mk} Y_{lk}^{-1}, \quad C_{\alpha,\alpha} = -Y_{lk}^{-1} Y_{ln}. \quad (3b)$$

Представив уравнение (2) в алгебраической форме и переходя к выражениям узловых мощностей, получим:

$$P_m = P_{l,m} + \sum_{n=1}^r [g_{m,n} (U_m^* U_n^* + U_m^* U_n^*) + b_{m,n} (U_m^* U_n^* - U_m^* U_n^*)], \quad (4a)$$

$$Q_m = Q_{5m} + \sum_{n=1}^r [g_{m,n} (U_m^* U_n^* - U_m^* U_n^*) - b_{m,n} (U_m^* U_n^* - U_m^* U_n^*)]; \quad (4b)$$

$$P_k = P_{5k} + \sum_{l=1}^M [R_{k,l} (I_k I_l + I_k I_l) + X_{k,l} (I_k I_l - I_k I_l)], \quad (5a)$$

$$Q_k = Q_{5k} - \sum_{l=1}^M [R_{k,l} (I_k I_l - I_k I_l) - X_{k,l} (I_k I_l + I_k I_l)], \quad (5b)$$

В системах (4) и (5) использованы следующие обозначения:

$$P_{mH} = P_{l,m} + \sum_{l=1}^M [a_{m,l}^* (U_m^* I_l^* + U_m^* I_l^*) + a_{m,l}^* (U_m^* I_l^* - U_m^* I_l^*)]; \quad (6a)$$

$$Q_{5m} = q_{5m} + \sum_{l=1}^M [a_{m,l}^* (U_m^* I_l^* - U_m^* I_l^*) - a_{m,l}^* (U_m^* I_l^* + U_m^* I_l^*)]; \quad (6b)$$

$$P_{5k} = p_{5k} + \sum_{n=1}^r [c_{k,n} (I_k U_n^* + I_k U_n^*) + c_{k,n} (I_k U_n^* - I_k U_n^*)]; \quad (7a)$$

$$Q_{5k} = q_{5k} - \sum_{n=1}^r [c_{k,n} (I_k U_n^* - I_k U_n^*) - c_{k,n} (I_k U_n^* + I_k U_n^*)], \quad (7b)$$

где

$$p_{5k} = - \sum_{n=1}^r (g_{k,n} U_n^* + b_{k,n} U_n^*) U_k^*, \quad (8a)$$

$$q_{5k} = \sum_{n=1}^r (g_{k,n} U_n^* - b_{k,n} U_n^*) U_k^*, \quad (8b)$$

$$p_{5k} = I_k U_0^* - \sum_{n=1}^r (c_{k,n}^* I_k^* + c_{k,n}^* I_k^*) U_n^*, \quad (9a)$$

$$q_{5k} = -I_k U_0^* + \sum_{n=1}^r (c_{k,n}^* I_k^* - c_{k,n}^* I_k^*) U_n^*, \quad (9b)$$

В выражениях (4) — (9) одним штрихом обозначена действительная составляющая, а двумя — мнимая составляющая соответствующих

комплексных величин. Учитывая структуру полученных систем уравнений (4) и (5), можно представить их в следующей компактной форме:

$$\Phi_{pm} = P_m - [P_{\text{бк}} + \varphi_{pm}(U'_n, U'_n)]; \quad (10a)$$

$$\Phi_{qm} = Q_m - [Q_{\text{бк}} + \varphi_{qm}(U'_n, U'_n)]; \quad (10b)$$

$$\Phi_{pk} = P_k - [P_{\text{бк}} + \varphi_{pk}(I'_l, I'_l)]; \quad (11a)$$

$$\Phi_{qk} = Q_k - [Q_{\text{бк}} + \varphi_{qk}(I'_l, I'_l)]; \quad (11b)$$

Для решения поставленной задачи достаточно воспользоваться системой уравнений (10a) и (11). Применяя метод Ньютона-Рафсона для решения полученных систем уравнений, необходимо установить соответствующие рекуррентные выражения для указанных систем уравнений в отдельности:

$$[U'_m]^{l+1} = [U'_m]^l - \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} \right]^{-1} \cdot [\Phi_{pm}]; \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{I'_n}{I'_l} \end{bmatrix}^{l+1} = \begin{bmatrix} \frac{I'_n}{I'_l} \end{bmatrix}^l - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_l} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial I'_l} \\ \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_l} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_l} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{pk} \\ \Phi_{qk} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

При рассмотрении (12) необходимо учесть и следующее выражение:

$$U_n^2 = (U'_m)^2 + (U''_m)^2. \quad (14)$$

Важным при решении поставленной задачи является вопрос организации итерационного процесса, при котором информация, полученная из рекуррентного выражения (13), используется в (12), и наоборот, что является особенностью предложенного нового метода для решения уравнений установившегося режима электрической системы.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби выражения (12), определяются:

для одинаковых индексов ($m=n$)—

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_m} = - \left[I_{\text{бк}} + \sum_{n=1}^N H_{mn} + (g_{m,n} U'_n + b_{m,n} U'_n) \right], \quad (15)$$

где

$$I_{\text{бк}} = - \sum_{n=1}^N g_{m,n} U_n + \sum_{n=1}^N (a'_{m,n} I'_n - a''_{m,n} I'_n); \quad H_{mn} = g_{m,n} U'_n - b_{m,n} U'_n, \quad (16)$$

для разных индексов ($m \neq n$)—

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U'_n} = - (g_{m,n} U'_m + b_{m,n} U'_m), \quad (17)$$

для одинаковых индексов ($k=l$)—

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} = - \left[U_{bk} + \sum_{l=1}^M L_{kl} + (R_{k,k} I'_k + x_{k,k} I'_k) \right], \quad (18a)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} = - \left[U_{bk} + \sum_{l=1}^M N_{kl} + (R_{k,k} I'_k - x_{k,k} I'_k) \right], \quad (18b)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_k} = - \left[U_{bk} + \sum_{l=1}^M N_{kl} - (R_{k,k} I'_k - x_{k,k} I'_k) \right], \quad (18a)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_k} = - \left[-U_{bk} - \sum_{l=1}^M L_{kl} + (R_{k,k} I'_k + x_{k,k} I'_k) \right], \quad (19b)$$

где

$$U_{bk} = \left(1 - \sum_{n=1}^T c'_{kn} \right) U'_0 + \sum_{n=1}^T (c'_{kn} U'_n - c'_{kn} U'_n); \quad L_{kl} = R_{k,l} I'_l - x_{k,l} I'_l, \quad (20a)$$

$$U_{bk} = - \sum_{n=1}^T c'_{kn} U'_0 + \sum_{n=1}^T (c'_{kn} U'_n + c'_{kn} U'_n); \quad N_{kl} = R_{k,l} I'_l + x_{k,l} I'_l, \quad (20b)$$

для разных индексов ($k \neq l$)—

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_l} = -(R_{k,l} I'_k + x_{k,l} I'_k); \quad \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_l} = -(R_{k,l} I'_k - x_{k,l} I'_k); \quad (21a)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_l} = -(-R_{k,l} I'_l + x_{k,l} I'_k); \quad \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_l} = -(R_{k,l} I'_k + x_{k,l} I'_k). \quad (21b)$$

На основании предложенного метода решения нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима электрических систем разработан соответствующий вычислительный алгоритм «ФОРТРАН»—программа для решения практических задач на ЦВМ.

ЕрПН им. К. Маркса

3. I. 1987

է. Ա. ԽՈՄԻՔՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱՅՎԱԾ ԴԵՋԻՏԻ
ՀԱՇՎԱՆԱԿԱՆ ՄԻ ՄԵԹՈԴԻ ՄԱՍԻՆ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հոգովոր նվիրված է Y—Z տեսակի հավասարումների համակարգի լուծմանը, որի համար օգտագործված է նյութառն-Ռաֆսոնի մեթոդը: Մշակած հաշվողական ալգորիթմը հնարավորություն է ապահովում կարգի մատրիցայի շրջման փոխարեն շրջել ընդ որում համաձայն փոքր կարգի մատրիցաների ապահովում է հաշվման ծախսի խիստ փոքրացում: Կողմնակի Ֆորտրան-ծրագրի օգնությամբ հնարավոր է լուծել գործնական խնդիրներ:

1. Хачатрян В. С. Определение установившихся режимов больших электроэнергетических систем с применением метода Ньютона-Рафсона // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. — 1974. — № 4. — С. 36—43.
2. Хачатрян В. С., Эмекчян Э. А. Метод коррекции установившихся режимов электрических систем // Электричество. — 1987. — № 3. — С. 6—14.
3. Nagendra P. S., Prakasa K. S., Nunda J. J. A novel Hybrid load flow method // IEEE Trans. on PAS. — 1981. — V. PAS — 100, № 1. — P. 333—308.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLI, № 3, 1988

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. Р. ВАРДАНЯН, В. В. ВАРДАНЯН, Н. В. ВАРДАНЯН

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ

При применении пьезодатчиков с обратным пьезоэффектом открывается принципиальная возможность достижения значительно большей точности измерения. Таким датчикам свойственны высокая добротность, воспроизводимость свойств, безгистерезисность, временная стабильность, химическая и радиационная стойкость и др. [1].

В разработанных ранее пьезорезонансных датчиках площадь силовопередающего упругого элемента с пьезорезонатором имела значительную величину, что вызывает утечку энергии из резонатора, снижение его добротности, стабильности частоты и точности измерений. Для упрощения конструкции и повышения быстродействия, чувствительности и термостабильности была разработана новая конструкция пьезорезонаторного датчика [2], где устранены промежуточные каналы передачи давления через жидкий диэлектрик со значительным повышением герметичности (рис. 1). С корпусом 1 прикрепляются мембраны 2 и 3, имеющие симметрично расположенные ножки 4, 5, 8, 9, на торцевых участках которых по своим углам прикреплены пьезорезонаторы 10 и 11. Между мембранами 2, 3 и корпусом 1 образуется замкнутая полость, заполненная жидким диэлектриком, находящимся под давлением. Пьезорезонаторы 10 и 11 со своими электродами и герметично выполненными выводами 12 и 13 соединяются с автогенераторами на плате 14. С нижней части корпуса закрепляется защитный цилиндрический экран 15. Для создания давления внутри замкнутой полости служат винт 16, герметичность которого обеспечивается прокладкой 17 и винтом 18.

Под действием давления мембраны 2 и 3 деформируются и нагрузка через ножки передается пьезорезонаторам 10 и 11. Пьезорезонатор 10, входящий в схему автогенератора, увеличивает свою частоту на величину Δf , тогда как пьезорезонатор 11, входящий в схему другого автогенератора, уменьшает частоту на Δf . Выходные сигналы обеих ав-

тогенераторов подаются сместителю, на выходе которого разностная частота изменяется на величину $\pm 2\Delta f$. Из-за предварительного давления внутри замкнутой полости датчик измеряет как давление, так и разрежение. Чувствительность датчика увеличивается из-за передачи деформаций мембран 2 и 3 пьезоэлементам через рычаги (ножки), выполненные на мембранах. Деформация мембран W в разных точках на расстоянии r от центра определяется выражением [3]

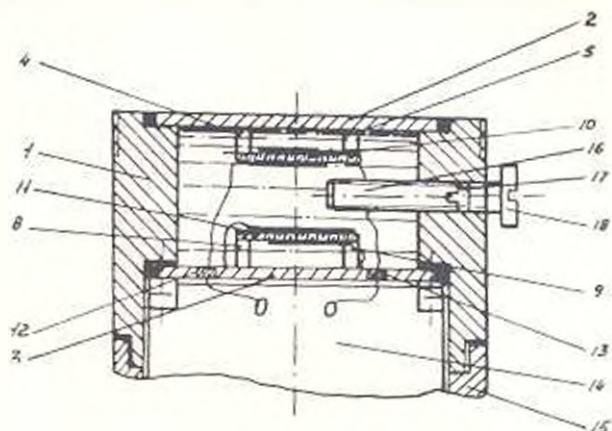


Рис. 1.

$$W = \frac{3}{16} p \frac{1-\nu^2}{Et^3} (R^2 - r^2)^2 = Ap (R^2 - r^2)^2, \quad (1)$$

где p — действующее давление; E — модуль упругости; t — толщина мембраны; ν — коэффициент Пуассона; R — радиус мембраны; $A = \frac{3}{16} \frac{1-\nu^2}{Et^3}$ — постоянная.

Для облегчения задачи деформированную мембрану можно заменить ломанной линией FBE (рис. 2). При действии давления p мембрана стремится возвратиться в первоначальное состояние (линия FE), при котором деформация x одной половины пьезоэлемента гораздо больше, чем деформация мембраны.

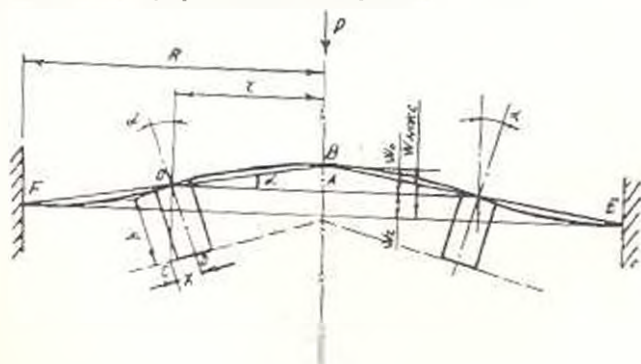


Рис. 2.

Из геометрических соотношений (рис. 2) можно определить

$$x = h \operatorname{tg} \alpha, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{W_0}{r}, \quad (2)$$

где $W_0 = W_{\max} - W_r$ — разность деформаций;

$$W_{\max} = \frac{3}{16} p \frac{1-\nu^2}{Et^3} R^4 = ApR^4, \quad (3)$$

Для определения значения $r_{\text{опт}}$ в местах перегиба деформационной мембраны используем уравнение (1):

$$\frac{d^2 W}{dr^2} = Ap(-4R^2 + 12r^2) = 0, \quad (4)$$

откуда

$$r_{\text{опт}} = R/\sqrt{3}. \quad (5)$$

Для оптимального расстояния $r_{\text{опт}}$ определим приращение W' :

$$W' = W_{\max} - W_{\text{опт}} \approx 0.5 ApR^4, \quad (6)$$

откуда и получим:

$$x = h \frac{W_0}{r_{\text{опт}}} \approx hApR^3 = Bh\rho, \quad (7)$$

где $B = \text{const}$.

При постоянном давлении p приращение одной половины пьезопластины будет

$$x = Kh, \quad (8)$$

т. е. существует линейная зависимость между максимальным приращением половины пьезопластины и высотой ножки h . Если приращение пьезоэлемента сравнить с удлинением мембраны по диагонали, то получим

$$m = \frac{x}{\Delta l} \approx \frac{h \frac{W_0}{r}}{\sqrt{r^2 + W_0^2} - r}, \quad (9)$$

которое характеризует повышение чувствительности по сравнению с непосредственным прикреплением пьезоэлемента к мембране. При $h=5$ мм, $W_0=0,01$ мм и $r=25$ мм согласно (10) $m \approx 10^3$. Приведенный расчет показывает, что приращением мембраны по диагонали можно пренебречь и считать, что приращение пьезоэлемента происходит только из-за эффекта рычага (пожек).

Рассмотренная силовопередающая система обеспечит повышение чувствительности, если тензодатчики будут через легко деформируемую подложку прикреплены к торцам ножек.

Соотношение $R/\sqrt{3}$ удаления ножек от центра мембраны справедливо только для случая жесткого защемления по краям мембран 2 и 3 (рис. 1). Если значительно уменьшить толщину корпуса 1 датчика, то за

счет податливости стенок корпуса 1 форма упругой линии изогнутых мембран 2 и 3 (рис. 2) не будет соответствовать случаю, описанному приведенными уравнениями, и расстояние ножек на $R \sqrt{3}$ не обеспечит максимальной чувствительности датчика. Дополнительное максимальное увеличение чувствительности из-за прикрепления пьезоэлементов к торцам ножек возможно при абсолютной их жесткости. Поэтому ножки выполняются с сечением в виде квадрата, расположенные по окружности. Другие формы сечения ножки имеют меньшую жесткость [4]: так, например, экономичность сечения α для стержня прямоугольного сечения равна $\alpha=0,167$, треугольника— $\alpha=0,083$, а для круга— $\alpha=0,125$. Прочное присоединение угла пьезоэлемента с торцем ножки достигается с увеличением площади взаимоперекрываемого участка, что возможно при квадратном сечении ножек. Другие формы профилей ножек нецелесообразны, исходя из технологических соображений.

Прикрепление пьезоэлементов к торцам ножек по своим углам обеспечивает высокую степень добротности системы. Сечение и высоту ножек необходимо подобрать так, чтобы это с жидким диэлектриком не привело к значительному снижению частотных свойств датчика. В [5] показано, что влияние жидкого диэлектрика на снижение частотных свойств полностью можно компенсировать с учетом радиальных напряжений, возникающих из-за приведения мембран в предварительно напряженное состояние. Если в предлагаемом устройстве из-за дополнительного груза ножек и пьезоэлемента его частотные свойства несколько ухудшаются, то примерно такое же уменьшение частотных свойств получается в [5] из-за притока жидкости через узкие каналы зазоров и отверстия на электродах.

В рассмотренном датчике замкнутая полость между мембранами, наполненная жидким диэлектриком, обеспечивает одинаковую температуру в ее разных участках, в частности, в местах закрепления пьезоэлементов, и поэтому значительно повышается термостабильность датчика.

Վ. Ի. ՎԱՐԿԱՆՅԱՆ, Վ. Վ. ՎԱՐԿԱՆՅԱՆ, Ե. Վ. ՎԱՐԿԱՆՅԱՆ

ՀԱՆՐԱՊԵՏԱՆԱՅԻՆ ԵՎՐՈՎ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՊԵՃԱԿԻՉՈՒՄԱՆՈՒՅՈՒՆ
ՀԱՇՎԱՆ ՀԱՅՏՆԻԳ

Ա Վ Ի Ո Վ Ո Վ

Պատարկվում է նոր տիպի պինդատեղոնանալիս հայտնի է կառուցվածքի, որտեղ պինդալիմենտները իրենց անկյուններով ամրացվում են մեմբրանի հետ միասին պատրաստված քառակուսի հատվածով ոտիկների ճակատային մասերին: Մեմբրանների միջև լցված հեղուկ զննվող օբյեկտներից միջոցով պինդալիմենտները բերված են նախնական սեղմված վիճակի: Նկարա-

որոված կառուցվածքը ապահովում է դիֆերենցիալ գործողության հայտնիքի
ստացում, որտեղ ղղալի բարձր է զգայունությունը և շերտակաշխույթությունը:
Շատարված հաշվումները թույլ են տալիս որոշելու ուղիղների օպտիմալ
դասավորությունը մեմբրանի վրա:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Малов В. В. Пьезо-резонансные датчики.—М.: Энергия, 1978.—248 с.
2. А. с. 1345076 СССР, МКН4, G01L 9/08. Датчик давления / В. Р. Варданян, В. Б. Варданян, И. В. Варданян (СССР) — № 4038133/24—10; Заявл. 20.03.86; Опубл. 15.10.87. Бюл. № 38—3 с.
3. Нуберт С. Н. Измерительные преобразователи неэлектрических величин.—М.: Энергия, 1970.—360 с.
4. Беляев Н. М. Сопротивление материалов.—М.: Наука, 1976.—607 с.
5. Варданян В. Р. Дифференциальный емкостной преобразователь давления // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1977.—Г. XXX. № 1.—С. 40—49.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 3, 1988

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

А. А. МУРАДЯН

СОВМЕЩЕННЫЙ МНОГОВАРИАНТНЫЙ АЛГОРИТМ КОМПОНОВКИ И РАЗМЕЩЕНИЯ

Достигнутый уровень формализации и программной реализации многокритериальных задач оптимизации можно было бы считать вполне приемлемым, если бы не стояла проблема поиска эффективно-го и компактного алгоритма, дающего широкий спектр допустимых решений [6].

Предположим задано некоторое множество $S = \{s_i\}$, $i = \overline{1, n}$ и его разбиение $S = \bigcup_{i=1}^r A_i^{(r)}$, где $A_i^{(r)} = \{S_j^{(r)}\}$, $1 \leq i \leq r$. Для каждого $A_i^{(r)}$ построена матрица расстояний $D_i^{(r)} = \|d_{ij}^{(r)}\|$. Предлагается алгоритм выборки и упорядочения многоарных отношений на множестве вершин мультиграфа $H(X, U)$, осуществляющий взаимоднозначное отображение $S = \varphi(X)$ с экстремализацией целевых функций

$$F_{\max} = \max \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^s u_{ij}^{(k)}, \quad F_{\min} = \min \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^s u_{ij}^{(k)} d_{i(i) \in (j)}^{(k)}.$$

Рассмотрим алгоритм формирования m -го отношения N -ой размерности $\chi_N^{(m)} = \{y_i^{(m)}\}$, $y_i^{(m)} = x_j$, $\forall i, j$, $y_i^{(m)} \neq y_i^{(n)}$ на базисе R , которое оценим на связность по критериям

$$F^{(m)} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N U_{ij}^{(m)}, \quad J^{(m)} = \sum_{i=1}^N U_i^{(m)}.$$

Построим кортеж $B = \{b_i\}$, где $b_i = \{x_j^{(i)}, x_j^{(i)}\}$, $U_i = U_{ij}$, $\forall i$, $U_i \geq U_{i+1}$ и через k обозначим базовый индекс, по которому осуществ-

ляется исходная загрузка в R , т. е. $\forall m (y_1^{(m)}, y_2^{(m)}) \in b_i$. Тогда условие загрузки в R по текущему поисковому индексу i запишем, как

$$(x_i^{(i)} \subset R) \& (x_i^{(i)} \cap R = \emptyset) \vee (x_i^{(i)} \cap R \neq \emptyset) \& (x_i^{(i)} \subset R),$$

причем, при заполнении базиса $y_N^{(m)} = A$, $m = m + 1$, если $\forall i < m \wedge y_N^{(i)} \neq \emptyset$.

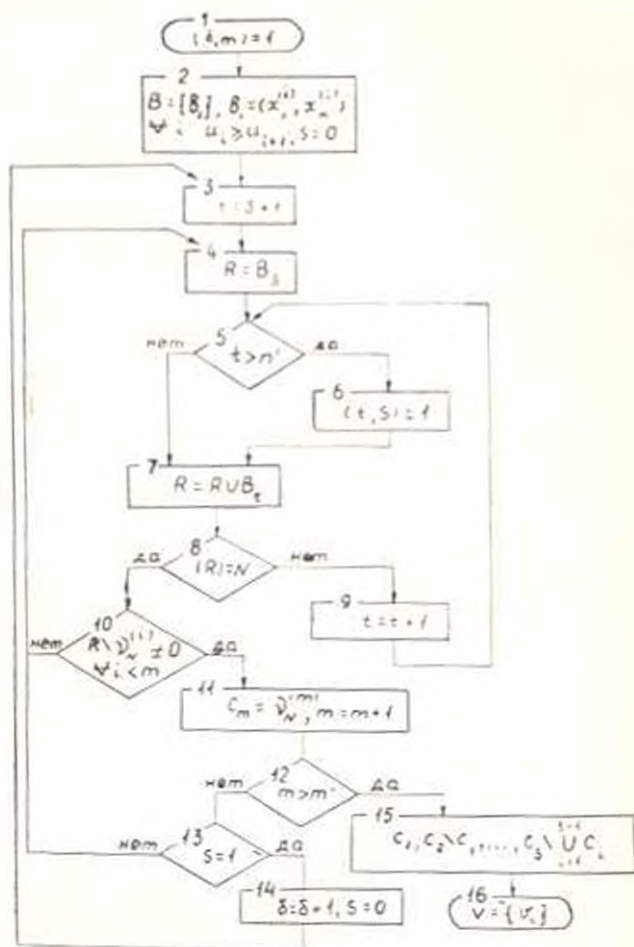


Рис.

Если формирование $y_N^{(m)}$ не завершилось в процессе последовательного сканирования на B , то $t = 1$ и для загрузки по следующему базису: $\delta = \delta + 1$, $i = \delta + 1$. При $m = m_{\max}$ и $\forall i \in I$, что $x_i \subset y_N^{(i)}$, осуществляем построение кортежа $C = \{c_i\}$, где $c_i = y_N^{(i)}$, $F_i = F^{(i)}$, $\forall i \in I$.

Упорядочив разбиение $A_N^{(i)}$ по убыванию соответствующих r и последовательно присваивая $N = r$, по содержанию C , однозначно решаем задачу компоновки на $A_N = X \setminus \bigcup_{i=1}^{k-1} X_i$, $A_i = \tau^{-1}(A_i^{(i)})$ с экстермализацией $F_{\text{комп}}$.

При решении задачи размещения упорядочиваем элементы множества $\{y_i^{(m)}\}$ для всех c_m , получаемых на некотором X_m , по убыванию соответствующих $f_i^{(m)}(y_i^{(m)}) \in \chi_N^{(m)}$, $3 \leq N \leq r$ и, проводя сцепление

$$c_1, c_2, c_1, c_3, (c_1 \cup c_2), \dots, c_k, \bigcup_{i=1}^{s-1} c_i,$$

задаем приоритетность на $X_q \subseteq X_m$ для текущего $X_q^{(p)}$ через вектор $V_k = (v_1, v_2, \dots, v_r)$.

Для экстремализации $F_{\text{разм}}$ непосредственно в процессе линейного размещения при

$$(x_m^{(k)} = \varphi^{-1}(z_k), x_s^{(k)} = \varphi^{-1}(z_s)) \in A_k^{(n)}; \quad L = \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{j=1}^r u_{ij}^{(k)} d_{\varphi(i) \varphi(j)}^{(k)}$$

воспользуемся следующими очевидными соотношениями:

$$1. \text{ Если } u_{lp}^{(k)} = 1, \text{ то при } l \neq p \quad L_E = L + \sum_{(i)} (u_{il}^{(k)} - u_{il}^{(s)});$$

$$2. \text{ Если } x_j^{(k)} = \varphi^{-1}(z_s), \quad \sum_{(u < j)} u_{mj}^{(k)} + \sum_{(u > p)} u_{mj}^{(k)} > \sum_{(u < j)} u_{mj}^{(k)} + \sum_{(u < p)} u_{mj}^{(s)},$$

то $L < L_s$, причем, мощности подмножеств $\{x_j^{(k)} | \forall m_{kl} - u_{kl} > 0\}$ и $\{x_j^{(k)} | \forall m_{kl} - u_{kl} < 0\}$ равны.

Каждому значению N соответствует свое построение, которое при $m_{\text{max}} = C_N^N$ сводит оптимизацию к перебору.

В качестве примера по U [1], при $N = 3$ получим:

$$B = \{(C, F), (B, F), (B, E), (A, F), (C, E), (C, D), (A, D), (B, A), (A, C), (B, C)\}$$

После упорядочения отношений по $F^{(m)}$ и $D^{(m)}$ имеем:

$$\{(F, F, D), (E, F, A), (D, B, F), (F, E, C), (E, A, D)\}$$

с вектором $V = (E, F, D, A, B, C)$. В итоге размещение $B - D - F - E - A - C$ имеет $L_{\text{min}} = 152$, в то время, как методом Шафера было получено 158.

Для оценки качества размещения воспользуемся показателем

$$P = \sum_{(i)} p_i = \sum_{(i)} \lambda_i \cdot e^{\frac{1 - \sum_{(j)} \lambda_{ij} \cdot a_{ij}}{(i)}} \quad (\lambda_i = \sum_{(j)} u_{ij} / \sum_{(j)} a_{ij}, \quad \lambda_{ij} = u_{ij} / \sum_{(j)} u_{ij}),$$

полученным в предположении о наличии экспоненциальной зависимости качества каждого размещенного модуля от расстояния и числа связей его с остальными [4].

На основании практических данных для сложной матрицы соединений при достижении глобального экстремума имеем:

$$P_{\text{max}} = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{(i)} \lambda_i \cdot e^{\frac{1 - \sum_{(j)} \lambda_{ij} \cdot a_{ij}}{(i)}} = 1,$$

что объясняется наличием определенной экспоненциальной зависимости между линейно возрастающей $\sum_{(i)} \lambda_i$ и убывающей $1 - \sum_{(j)} \lambda_{ij} \cdot a_{ij}$.

Если $M = |B_k|$ — множество вариантов размещения, упорядоченных

по L_n , то предположив, что с увеличением k от 1 до l значение $p_c - p_n$ линейно возрастает, получим:

$$\frac{L(|p_c - p_n|)}{ak} = f(L_c - L_n); \quad \alpha_r(|p_c - p_n|) = \frac{(L_c - L_n)^2}{2},$$

где α_r — согласующий коэффициент.

Таблица 1

A F	Алгоритмы									
	A-0	A-IM	A-15	A-13	A-7	A-61	A-62	A-10	A-11	A-MI
SRT	20,07	19,44	19,18	19,73	17,25	19,67	19,66	19,74	19,41	19,74
ML	1377	1405	1407	1397	1454	1463	1448	1531	1512	1192
SUP	4258	8016	8344	8320	10752	11144	9840	7200	7784	2096
SL1	278	233	233	235	264	258	272	285	248	307
SL2	426	486	480	488	464	490	464	455	469	327
SL	704	719	713	723	726	748	736	740	717	634
L_{max}	34	34	34	34	35	34	34	34	34	31
SIR	250	250	255	241	264	240	244	254	249	264
SRMG	8,429	9,543	9,8	9,77	9,4	10,77	9,543	9,229	9,286	7,857
SRMV	13,83	13,03	12,89	13,4	13,66	14,17	13,83	17,37	13,09	14,57
V_{cp}	28,57	32,94	32,51	32,26	27,17	32,34	32,34	30,83	31,09	19,09

Таблица 2

N	23	14	5	17	13	12	7	28	3	20	8
I_n	4	8	57	6	12	49	32	2	104	5	27
L	724	697	690	689	686	682	664	662	659	652	650
P	0,32	0,33	0,38	0,39	0,38	0,37	0,42	0,48	0,41	0,43	0,42

N	22	29	4	10	21	15	24	32	16	10	33
I_n	4	2	70	4	4	7	4	2	7	19	1
L	644	644	640	636	635	634	630	618	618	612	612
P	0,42	0,45	0,42	0,44	0,45	0,45	0,47	0,46	0,47	0,48	0,47

N	34	9	27	25	18	6	26	11	31	30
I_n	1	20	3	3	4	49	3	16	2	2
L	612	611	609	605	603	594	594	572	560	536
P	0,47	0,5	0,48	0,5	0,5	0,48	0,52	0,52	0,58	0,62

Для глобального экстремума имеем: $L_s = L_c - 2(\alpha_c(|p_s - p_c|))^{-\frac{1}{2}}$. Тогда, рассчитав усредненное значение α_c и учитывая, что $L_s p_s = 1$, получим:

$$\alpha_c = \frac{2}{2t} \sum_{c=1}^t \frac{(L_c - L_s)^2}{|p_c - p_s|};$$

$$L_s = \frac{1}{t} \sum_{c=1}^t \left(L_c - 2 \left(\frac{1}{2t} (p_s - p_c) \sum_{c=1}^t \frac{(L_c - L_s)^2}{|p_c - p_s|} \right)^{-\frac{1}{2}} \right).$$

В табл. 1 приведен анализ результатов, полученных предлагаемым алгоритмом [3] в сравнении с целым классом существующих [2]. Значения суммарной длины связей L и максимальной длины связей l_m при изменении размерности отношения $3 \leq N \leq 32$ с соответствующей оценкой на P рассмотрены в табл. 2.

Анализ полученных материалов позволяет рекомендовать предлагаемую методику для практического использования как на этапе конструкторского проектирования [7], так и в процессе оптимального распределения памяти ВЗУ [8].

Ерлмн им. К. Маркса

15. IX. 1985

Ա. Ա. ԽԱՐԱՊԵՅԱՆ

ԲԱԶՄԱՏԱՐԵՐԱԿ ՀԱՄԱՏԵԼԻՍԻ ԱՄԲՈՂՋԱՅՐԱՆ ԵՎ
ՏՆՂԱՐԱՇԵՐԱՆ ԱՎԿՈՐԹՈՐ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Դիտարկվում է ալգորիթմ, որը բազմաբանակ օպտիմիզացիայի գնացում իրացնում է մոգեկների ամբողջացումը և տեղաբաշխումը դժի կամ հարթության փոխ, հիմք ընդունելով n -հարաբերությունները: Ալգորիթմի բարձրատիճանի արդյունավետությունը դառնում է ակնհայտ. երբ այն կիրառվում է նախազման փուլում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Штейн М. Е., Штейн Б. Е. Методы машинного проектирования мифровой аппаратуры.—М.: Сов. радио, 1973.—293 с.
2. Карапетян М. А. Выбор типоразмеров и оптимизация конструкторских модулей на основе принципа справедливого компромисса//Автоматизация проектирования электронной аппаратуры: Межвед. тем. науч. сб.—Тяганрог: ГРТИ, 1983. Вып. 2.—с. 28—34.
3. Карапетян М. А., Мурадян А. А. Об одном алгоритме выборки и упорядочения многоарных отношений по заданным критериям на множестве вершин мультиграфа//Тел. докл. по автомат. констр. проекти. РЭА и ЭВА.—Пенза, 1985.—с. 48—49.
4. Мурадян А. А., Карапетян А. М. К вопросу оценки качества достигнутого решения при автоматизации технологических процессов на этапе конструкторского проектирования//Тел. докл. по метод. пробл. автомат. проект. АСОВ: Научный Совет по комплексной проблеме «Кибернетика» при През. АН СССР, ВЦ АН СССР—Севан, 1985.—С. 92—93.

5. Каранетян А. М. Оптимизация оптимального конструирования ЭВМ—М.: Сов. радио, 1973—149 с.
6. Мурадян А. А., Каранетян А. М. К вопросу применения многовариантных алгоритмов в процессе многокритериальной оптимизации//Тез. докл. II Всесоюзной конф. по актуальным пробл. информатики и выч. техники.—Ереван: ВЦ АН Арм.ССР.—с. 40—41.
7. Каранетян А. М., Мурадян А. А., Каранетян М. А. Система алгоритмов сравнения и размещения на основе упорядочения многоярных отношений//Промышленность, строительство и архитектура Армении.—1986—№ 10.—с. 54—56.
8. Мурадян А. А., Каранетян А. М., Хачоян Г. М. Некоторые примеры из класса задач размещения и метод их решения//Тез. докл. V научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов района 26 Комиссаров.—Ереван, 1986.—С. 27—28.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. ХLI, № 3, 1988

ГИДРОТЕХНИКА

С. А. АПАНЯН, В. С. САРКИСЯН

ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ПОРОВЫХ РАСТВОРОВ И ГРУНТОВЫХ ВОД ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ЯДОХИМИКАТОВ И УДОБРЕНИЙ

При поливах орошаемых земель, когда грунтовые воды залегают неглубоко, поливные воды, насыщенные химическими препаратами, доходят до уровня грунтовых вод и загрязняют их. Поэтому представляет практический интерес развитие количественных методов прогнозирования процессов миграции в почвогрунтах ядохимикатов.

Рассмотрен гидродинамический метод прогноза гидрохимического режима подземных вод при внесении в почву удобрений и ядохимикатов с учетом кинетики растворения, сорбции и разложения.

Кинетика растворения описывается уравнением вида:

$$\partial N_1 / \partial t = -\gamma_1 (C_m - C) N_1, \quad (1)$$

где N_1 —весовое содержание вещества в твердой фазе грунта; C_m —концентрация насыщения данного элемента в воде; α_1 —показатель, отражающий характер загрязнения грунта; γ_1 —коэффициент скорости растворения.

Сорбционные процессы описываются уравнением кинетики:

$$\partial N_2 / \partial t = \gamma_2 n_0 (C - C_0), \quad (2)$$

здесь N_2 —количество вещества, поглощенного твердой фазой; γ_2 —константа скорости сорбции; C_0 —концентрация растворенного вещества, равновесная с N_2 , поглощенного твердой фазой; n_0 —пористость.

Связь между величинами N_2 и C_0 определяется изотермой сорбции. Наиболее общими являются нелинейная изотерма Ленгмюра и Генри [1]. При большой емкости поглощения уравнение кинетики принимает вид:

$$\partial N_2 / \partial t = \gamma_2 n_0 C. \quad (3)$$

Разложение веществ, внесенных в почву под действием химических факторов (гидролиз, окислительные и восстановительные реакции), описывается уравнением необратимой кинетики:

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = \gamma_3 n_0 C, \quad (4)$$

где N_3 —количество разложившегося вещества; γ_3 —коэффициент неконсервативности.

Прогноз изменения содержания ядохимикатов и удобрений в грунтах зоны аэрации и грунтовых водах осуществляется на базе геохимической гидродинамики. Принимается, что в грунтах зоны аэрации мощностью z_0 внесены химические вещества, концентрация каждой фазы которых по глубине распределяются по экспоненциальному закону:

$$C_1(z, 0) = C_{10} \exp\left(-\alpha \frac{z}{z_0}\right), \quad (5)$$

где C_{10} —концентрация ядохимиката на поверхности почвы в момент времени $t=0$; α —параметр, зависящий от механического состава почвы и определяемый экспериментально. Предполагается также, что на поверхности земли подается поливная вода, содержащая такие же препараты с постоянной концентрацией C_0 . Уровень грунтовых вод в начальный момент времени находится на глубине z_0 . Через определенный промежуток времени t_1 поливные воды доходят уровня грунтовых вод и начинается их подъем с постоянной скоростью W . Предполагается также, что диффузионный перенос в грунтах зоны аэрации мал по сравнению с конвективным переносом, а в зоне грунтовых вод преобладает диффузионный перенос над конвективным.

Задача сводится к интегрированию следующей системы уравнений:

$$-v^* \frac{\partial C_1}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial t} = \gamma_1 \frac{\partial C_1}{\partial t}, \quad 0 < z < z_0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \gamma_1^* C_1, \quad (7)$$

$$D^* \frac{\partial^2 C_2}{\partial z^2} = \gamma_2 \frac{\partial C_2}{\partial t}, \quad z_0 < z < \infty, \quad (8)$$

при краевых условиях

$$t = 0; \quad \left| \begin{array}{l} C_1(z, 0) = C_{10} \exp\left(-\alpha \frac{z}{z_0}\right), \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left| \begin{array}{l} C_2(z, 0) = C_{20} \exp(-\gamma) = k, \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left| \begin{array}{l} N(z, 0) = N_{10}; \end{array} \right. \quad (11)$$

$$t > 0; \quad \left| \begin{array}{l} z = 0, \quad C_1(0, t) = C_0 = \text{const}, \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left| \begin{array}{l} z \rightarrow \infty, \quad \frac{\partial C_2}{\partial z} = 0. \end{array} \right. \quad (13)$$

На подвижной границе:

$$C_1(z - Wt, t) \Big|_{z=z_1-Wt} = C_2(z - Wt, t) \Big|_{z=z_2-Wt}, \quad (14)$$

здесь $C_1(z, t)$, $C_2(z, t)$ — соответственно концентрации ядохимиката в зонах аэрации и грунтовых вод; D^* — коэффициент диффузии; μ_1, μ_2 — активные пористости ненасыщенной и водонасыщенной зон; γ^* — коэффициент скорости поглощения (детоксикации); v^* — скорость фильтрации. Начало координат расположено на поверхности земли, ось z направлена вертикально вниз.

В начальных этапах развития фильтрационных процессов, когда фронт загрязнения не доходит до уровня грунтовых вод, достаточно исследовать уравнения (6), (7). При этом необходимо рассматривать две области — перед ($z < vt$) и за фронтом загрязнения ($z > vt$).

Уравнения (6), (7) с условиями (9), (11), (12) решаются путем преобразования Лапласа. Для концентрации $C_1(z, t)$ решение имеет вид:

$$C_1(z, t) = \begin{cases} C_0 \exp\left(-\frac{\gamma}{v}z\right), & z < vt; \\ C_{10} \exp\left[-\alpha \bar{z} - \left(\gamma - \alpha \frac{v}{z_0}\right)t\right], & z > vt, \end{cases} \quad (15)$$

$$C_1(z, t) = \begin{cases} C_0 \exp\left(-\frac{\gamma}{v}z\right), & z < vt; \\ C_{10} \exp\left[-\alpha \bar{z} - \left(\gamma - \alpha \frac{v}{z_0}\right)t\right], & z > vt, \end{cases} \quad (16)$$

где $v = v^* \mu_1$; $\gamma = \gamma^* \mu_1$; $\bar{z} = z/z_0$.

Зависимости (15), (16) в дальнейшем служат в качестве граничных условий при $z = z_0$ для решения дифференциального уравнения (8). Интегрируя уравнение (7) с условием (11), получаем формулу для нахождения концентрации твердой фазы ядохимикатов:

$$N(z, t) = \begin{cases} \gamma C_0 t \exp\left(-\frac{\gamma}{v}z\right) + N_{10}, & z < vt; \\ \frac{\gamma C_{10} e^{-\alpha \bar{z}}}{\gamma - \alpha \frac{v}{z_0}} \left[1 - \exp\left(\alpha \frac{v}{z_0} - \gamma\right)t\right], & z > vt. \end{cases} \quad (17)$$

$$N(z, t) = \begin{cases} \gamma C_0 t \exp\left(-\frac{\gamma}{v}z\right) + N_{10}, & z < vt; \\ \frac{\gamma C_{10} e^{-\alpha \bar{z}}}{\gamma - \alpha \frac{v}{z_0}} \left[1 - \exp\left(\alpha \frac{v}{z_0} - \gamma\right)t\right], & z > vt. \end{cases} \quad (18)$$

Решение задачи (8) с условиями (10), (13) — (16) имеет вид [2] соответственно до смыкания фронта загрязнения с уровнем грунтовых вод C_{21} и после C_{22} :

$$C_{21}(z, t) = \left\{ \frac{k}{2} \left[e^{\frac{W^2 t - 2W y}{4D}} \Phi^* \left(\frac{Wt + y}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{\frac{W^2 t + 2W y}{4D}} \Phi^* \left(\frac{Wt + y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{k}{2} e^{\lambda t} \left[e^{\frac{y\sqrt{\lambda}}{D}} \Phi^* \left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{\lambda t} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + e^{\frac{y\sqrt{\lambda}}{D}} \Phi^* \left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}} + \sqrt{\lambda t} \right) \right] \right\} e^{\lambda y - \gamma t}; \quad (19)$$

$$C_{22}(z, t) = \left\{ \frac{k}{2} \left[e^{\frac{W^2 t - 2W'y}{4D}} \Phi^* \left(\frac{Wt - y}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{\frac{W^2 t + 2W'y}{4D}} \Phi^* \left(\frac{Wt + y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{k}{2} e^{\gamma_1 t} \left[e^{-y\sqrt{\frac{\gamma_1}{D}}} \Phi^* \left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{\gamma_1 t} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - e^{y\sqrt{\frac{\gamma_1}{D}}} \Phi^* \left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}} - \sqrt{\gamma_1 t} \right) \right] \right\} e^{\pi y - \gamma_1 t}, \quad (20)$$

где

$$k = C_{10} e^{-\gamma_1 z_0}; \quad \lambda = \lambda_1 + \frac{2(W + v)}{z_0}; \quad \lambda_1 = \frac{w^2}{4D} - \gamma_1; \quad \frac{w}{2D} = \pi; \\ k_1 = C_0 e^{-\gamma_1 \frac{z_0}{v}}; \quad \gamma_1 = \gamma \frac{W}{v} + \gamma_0; \quad \gamma = \frac{W^2}{4D}; \quad \Phi^*(\theta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-\xi^2} d\xi; \quad (21) \\ y = z - (z_0 - Wt).$$

В случае отрицательного λ выражение функции ошибок от комплексного аргумента в формуле (19) имеет вид:

$$F(x) = e^{-2iab} \Phi^*(a - ib) + e^{2iab} \Phi^*(a + ib), \quad (22)$$

где $x = a + ib$, $a = y/2\sqrt{Dt}$; $b = \sqrt{\beta t}$; $\beta = -\lambda > 0$.

Так как $F(x) = F(\bar{x})$, следовательно

$$F(x) = 2 \operatorname{Re} [e^{2iab} \Phi^*(a + ib)]. \quad (23)$$

Учитывая известную формулу для функции ошибок от комплексного аргумента

$$\Phi^*(a + ib) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-\xi^2} d\xi = \Phi^*(a) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-a^2} \int_0^b e^{\xi^2} (\sin 2a\xi + i \cos 2a\xi) d\xi$$

и определяя действительную часть в выражении (23), получаем зависимость, аналогичную приведенной в [3].

Окончательное решение задачи для концентраций ядохимикатов в случае отрицательного λ будет иметь следующий вид:

$$C_{23}(z, t) = \left\{ \frac{k}{2} \left[e^{\frac{W^2 t - 2W'y}{4D}} \Phi^* \left(\frac{Wt - y}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{\frac{W^2 t + 2W't}{4D}} \Phi^* \left(\frac{Wt - y}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{k}{2} e^{\gamma_1 t} F(x) \right\} e^{\pi y - \gamma_1 t}, \quad (24)$$

где

$$F(x) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left[\cos(2ab) \Phi^*(a) + e^{-a^2} \int_0^b e^{\xi^2} \sin[2a(y - b)] dy \right]$$

Полученные зависимости (15) — (21), (24) дают возможность прогнозировать изменение концентрации ядохимикатов, подверженных разложению и сорбции, в зонах аэрации и грунтовых вод для любых значений λ .

Երբ III իմ. Կ. Մարքս

21. VI. 1986

Ս. Ա. ԱՆԱՆՅԱՆ, Վ. Ս. ՍԱԲՈՅԱՆ

ԲՆԱՀՈՂԱՅԻՆ ՋՐԵՐԻ ԵՎ ՄԱԿՈՏԿԻՆ ԼՈՒՄՈՒՅԹՆԵՐԻ ՈՐԱԿԻ ԿԱՆՈՐՈՇՈՒՄԸ ԹՈՒՆԱՔԻՄԻԿԱՏՆԵՐԻ ԵՎ ՊԱՐԱՐՏԱՆՅՈՒԹՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ԴԵՊԳՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Թերված է բնահողի մեջ մտցված ֆունտրիմիկատների և պարարտանյութերի տեղափոխության մասին խնդրի լուծումը և ծակոտկեն լուծույթի խտության ու բնահողային ջրերի փոփոխությունը ժամանակի ընթացքում և տարածությունում:

Խնդրի լուծման առանձնահատկությունը կայանում է նրանում, որ հաշվի է առնված ոռոգման ժամանակ բնահողային ջրերի մակարդակի փոփոխությունը, որը սահման է հանդիսանում օդահագեցման դոսիսների և բնահողային ջրերի միջև: Ստացված են բանաձևեր, որոնք թույլ են տալիս կանխորոշել օդահագեցման դոսիսների բնահողի մեջ մտցվող առանձին բաղադրիչների խտության փոփոխությունը: Հաշվարկային բանաձևերը թույլ են տալիս կանխորոշել ինչպես ծակոտկեն լուծույթների ու բնահողային ջրերի, այնպես էլ պինդ բաղադրիչի խտությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод // И. И. Веригин, С. В. Васильев, В. С. Саркисян и др.—М.: Колос, 1979.—336 с.
2. Карслюу Г., Еггер Э. Теплопроводность твердых тел.—М.: Наука, 1964.—488 с.
3. Шулгин Л. Ф., Акимян С. А. Моделирование миграции в почвогрунтах агрохимикатов, подверженных разложению и сорбции // Гидравлика русловых и подземных потоков: Сб. науч. тр.—Казань, КГУ, 1987.—С. 78—82.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 3, с. 1988

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Б. Г. АРУТЮНОВ, Ի. Ա. ՈՒՆՈՒՅԱՆ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА АКТИВНОСТИ ВИНИЛАЦЕТАТА

Для оптимизации действующих химико-технологических процессов построение экономико-математических моделей часто производится на основе сбора и обработки статистических данных параметров управления. При этом предполагается, что распределение вероятностных значений параметра управления описывается нормальным законом.

Однако изучение производства винилацетата показало, что закон распределения вероятностей основного выходного параметра—активности винилацетата, характеризующей его качество, не подчиняется нормальному закону и, следовательно, применение общеизвестных методов построения математической модели данного процесса неправомерно. С целью построения адекватной экономико-математической модели производства винилацетата необходимо точное определение аналитического выражения закона распределения с дальнейшей разработкой модели эффективности функционирования производства винилацетата. Для этого были использованы статистические данные, собранные в процессе нормального функционирования агрегата синтеза винилацетата на Ереванском заводе «Поливинилацетат».

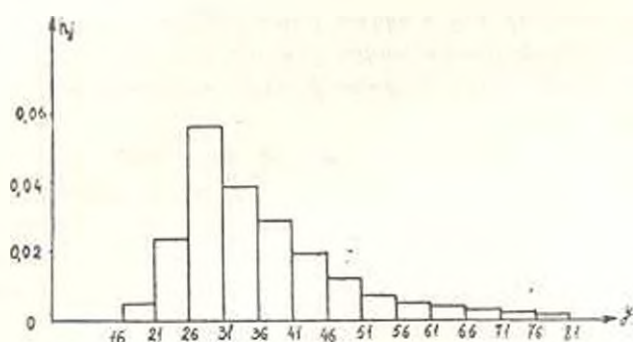


Рис.

На основе статистической обработки была определена оценка математического ожидания активности винилацетата, равная 35'. По внешнему виду гистограммы (рис.) выдвинута гипотеза о Релевском законе распределения вероятностей с математическим ожиданием, равным 35'. Гипотетический закон Релевского распределения вероятностей определяется по формуле [1, 2]:

$$\varphi(y) = \begin{cases} \frac{v}{\sigma^2} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}, & y \geq 0 \\ 0, & y < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Теоретическая гипотетическая оценка среднеквадратического отклонения оказалась равной 28'. Для проверки выдвинутой гипотезы необходимо было вычислить экспериментальное значение σ , которое оказалось равным 27,58', что свидетельствует о его совпадении с теоретически ожидаемым значением. Как видно из рисунка, минимальное значение активности винилацетата равно 16', поэтому смещенный Релевский закон будет иметь следующий окончательный вид:

$$\varphi(y) = \begin{cases} \frac{y - 16}{760,8} e^{-\frac{(y - 16)^2}{2 \cdot 760,8}}, & y \geq 16 \\ 0, & y < 16 \end{cases} \quad (2)$$

Следуя основным принципам метода оптимального распределения [3], была построена математическая модель эффективности функционирования производства винилацетата в виде интеграла

$$I = \int_{\Omega} \varphi(y) b(y) dx \longrightarrow \max, \quad (3)$$

где $b(y)$ — функция, характеризующая зависимость качества винилацетата от его активности.

Полученная модель эффективности учитывает реальную форму закона распределения вероятностей активности винилацетата, является адекватной и может быть использована в качестве критерия оптимизации технологического процесса производства винилацетата на Ереванском заводе «Полвинилацетат».

ЕрГУ

14. I. 1987

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е. Г. Теория вероятностей.—М.: Наука, 1961.—576 с.
2. Щеголев В. М. Математическая обработка наблюдений.—М.: Наука, 1969.—344 с.
3. Арешян Г. Л., Захарян С. С., Налчаджян Т. А. Два метода повышения эффективности сложных технологических процессов.—Ереван: Айтаган, 1983.—161 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН). т. XLI, № 3, 1988

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

В. О. ТОКМАДЖЯН, Р. Г. МАРТИРОСЯН

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ С КРИВОЛИНЕЙНЫМ ОЧЕРТАНИЕМ ПРОФИЛЯ ДНА

Гидравлический расчет каналов с криволинейным очертанием профиля дна построен на расчетной схеме и законе распределения давления, приведенных в [1]. Давление в произвольной точке потока с учетом отклонения от гидростатического согласно [1] определяется:

$$P = P_{\text{стат}} + \rho g (h - y) \cos \varphi \pm \rho \int_y^h \frac{u^2}{R_0 + t} dt, \quad (1)$$

Давление на дне канала, выраженное высотой жидкостного столба будет:

$$\frac{P}{\rho g} = \frac{P_{\text{стат}}}{\rho g} + h \cos \varphi \pm \Phi_1 \left(\frac{h}{R_0} \right) \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

где

$$\Phi_1 \left(\frac{h}{R_0} \right) = \frac{\int_0^h \frac{u^2}{R_0 + y} dy}{v^2}; \quad (3)$$

p и $p_{\text{атм}}$ — полное и атмосферное давления; ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести; h — глубина потока по нормали; y — расстояние произвольной точки от дна по нормали; φ — угол касательной дна с горизонтом; u — скорость в произвольной точке; l — переменное расстояние, изменяющееся от y до h ; R_0 — радиус кривизны дна, v — средняя скорость потока. Здесь и далее положительный знак соответствует вогнутым, а отрицательный — выпуклым профилям.

Полный напор сечения согласно (1) будет:

$$H = z + h \cos \varphi + \frac{v^2}{2g} \pm \frac{I(l)}{gQ}, \quad (4)$$

где $I(l) = \int_0^h \left(\int_y^h \frac{u^2}{R_0 + t} dt \right) u b dy$; z — высота произвольной точки от некоторой плоскости отсчета; α — коэффициент кинетической энергии; Q — расход жидкости; b — ширина канала; l — длина пути.

В общем случае скорость в произвольной точке u и ширина канала b являются функцией высоты l и пути l , а в пределе: $u = u(y, l)$ и $b = b(y, l)$.

Выражение (4) можно представить в виде:

$$H = z + h \cos \varphi + \frac{v^2}{2g} \left[\alpha \pm \Phi_2 \left(\frac{h}{R_0} \right) \right], \quad (5)$$

где

$$\Phi_2 \left(\frac{h}{R_0} \right) = \frac{2I(l)}{Qv^2}. \quad (6)$$

Для вывода дифференциального уравнения движения жидкости в каналах с криволинейным очертанием профиля дна в общем случае продифференцируем выражение полного напора (4) по пути. После некоторых преобразований получим:

$$\frac{dH}{dl} = \frac{dz}{dl} + \cos \varphi \frac{dh}{dl} - h \sin \varphi \frac{d\varphi}{dl} - \frac{2Q^2}{gA^3} \left(\frac{\partial A}{\partial l} + \frac{\partial A}{\partial h} \frac{dh}{dl} \right) \pm \frac{I'(l)}{gQ}, \quad (7)$$

где $\frac{dH}{dl} = -I_f$ — гидравлический уклон; $\frac{dz}{dl} = -I_0$ — геометрический уклон;

$$\begin{aligned} I'(l) = & \int_0^h [u(y, l) b(y, l)] \left[\int_y^h \frac{u^2(t, l)}{R_0 + t} dt \right] dy + \\ & + \int_0^h \left[u(y, l) b(y, l) \int_y^h \frac{2u(t, l)}{R_0 + t} u(t, l) dt \right] dy + \\ & + \int_0^h \left[u(y, l) b(y, l) \frac{u^2(h, l)}{R_0 + h} \cdot \frac{dh}{dl} \right] dy. \end{aligned} \quad (8)$$

№	Закон изменения скоростей	$\Phi_1\left(\frac{h}{R_0}\right)$
I	$u = \frac{Q}{A}$	$\ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)$
II	$u = \omega(R_0 + r)$, $\omega = \text{const}$, ω — угловая скорость вращения частиц живого сече- ния вокруг центра кри- визны	$\frac{\frac{h}{R_0}}{1 + \frac{h}{2R_0}}$
III	$u(R_0 + r) = \text{const}$	$\frac{\frac{h}{R_0}\left(1 + \frac{h}{2R_0}\right)}{\ln^2\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)\left(\frac{R_0}{h} + 1\right)^2}$

$$\Phi_3^{\text{III}}\left(\frac{h}{R_0}\right) = \frac{1}{2 \ln^2\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)} \left[\frac{1 + \frac{R_0}{h} \left[1 + 2 \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right) \right]}{\left(\frac{R_0}{h} + 1\right)^3} - \frac{1 + 2 \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)}{\left(\frac{R_0}{h} + 1\right)^2} \right]$$

Таблица

$\Phi_2\left(\frac{h}{R_0}\right)$	$\Phi_3\left(\frac{h}{R_0}\right)$
$2\left[1 - \frac{R_0}{h} \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)\right]$	$2 - 3\frac{R_0}{h} \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right) - \frac{1}{1 + \frac{h}{R_0}}$
$\frac{1}{\frac{R_0}{h} + 0,5}$	$\frac{\frac{\rho_0}{2h} + 0,5}{\left(\frac{R_0}{h} + 0,5\right)^2}$
$\frac{\frac{h^2}{R_0^2} - \frac{1 + 2 \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)}{\left(\frac{R_0}{h} + 1\right)^2}}{2 \ln^3\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)}$	значение функции приводится ниже

$$\left. \frac{1}{2} + \frac{3}{2} \cdot \frac{h^3}{R_0^3 \left(1 + \frac{h}{R_0}\right) \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)} - \frac{1,5 \frac{h}{R_0} \left[1 + 2 \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)\right]}{\left(1 + \frac{h}{R_0}\right) \left(\frac{R_0}{h} + 1\right)^2 \ln\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)} \right\}$$

Отметим, что в общем случае из (9) выделить dh/dl невозможно, т. к. dh/dl содержится и в других производных h в (10).

Определяя гидравлический уклон по формуле Шези

$$I_f = \frac{Q^2}{A^2 C^2 R}, \quad (9)$$

где A — площадь живого сечения; C — коэффициент Шези, определяемый по формуле: $C = R^{2/3}/n$; n — коэффициент шероховатости; y — показатель Павловского; R — гидравлический радиус, дифференциальное уравнение движения жидкости в призматических каналах прямоугольного поперечного сечения с криволинейным очертанием профиля дна можно записать в удобном для интегрирования на ЭВМ виде:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{\left(1 + h \frac{d\varphi}{dl}\right) \sin \varphi - \frac{q^2 n^2}{h^2} \left(\frac{1}{h} + \frac{2}{b}\right)^{1+2y}}{\cos \varphi - \frac{q^2}{gh^3} \left[\alpha \pm \Phi_3\left(\frac{h}{R_0}\right) \right]}, \quad (10)$$

где $q = \frac{Q}{b}$ — удельный расход.

В общем виде выделение функции $\Phi_3\left(\frac{h}{R_0}\right)$ не представляется возможным, а для частных случаев изменения скоростей ее значения приводятся в таблице. Все три безразмерные функции $\Phi_1\left(\frac{h}{R_0}\right)$, $\Phi_2\left(\frac{h}{R_0}\right)$ и $\Phi_3\left(\frac{h}{R_0}\right)$ зависят только от отношения h/R_0 .

Решая уравнение (10) на ЭВМ, получаем функцию $h = h(l)$, т. е. кривую свободной поверхности, имея которую, а также законы $u = u(y, l)$, $b = b(y, l)$, можем построить эпюры скоростей и давления.

При заданной форме русла легко определить $b = b(y, l)$, а что касается зависимости $u = u(y, l)$, то получить ее теоретически пока не представляется возможным. В практических целях можно получить цифровые решения приближенным численным интегрированием, на ЭВМ для частных случаев из общего дифференциального уравнения (8), либо дифференцированием выражения полного напора (4).

ЕрПИ им. К. Маркса

27. XI. 1985

ЛИТЕРАТУРА

- Токмаджян В. О., Мартirosян Р. Г. Распределение давления на участках канала с криволинейным очертанием профиля дна // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. — 1987. — Т. XI, № 2. — с. 34—39.

М. А. КУЧУРЯН

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА
ПРОЦЕСС ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ В
ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ФОТОЭЛЕМЕНТЕ

В работе [1] описано устройство и принцип действия гетеродинного приемника СВЧ-модулированного оптического излучения. В этом устройстве высокочастотный фотоэлемент Ф28 сочетается с объемным резонатором, электрическое поле которого управляет электронным потоком фотоэлемента. Если частота модуляции интенсивности оптического потока близка к частоте управляющего напряжения, то в фототоке возникает составляющая разностной частоты и осуществляется гетеродинный прием. Там же приведены зависимости амплитуды и фазы сигнала разностной частоты от величины управляющего чисто синусоидального напряжения гетеродина.

Однако использование чисто синусоидального управляющего напряжения и увеличение его амплитуды недостаточно и нецелесообразно для получения максимального сигнала разностной частоты и увеличения отношения сигнал-шум, что весьма необходимо в случае приема слабых оптических сигналов. При увеличении амплитуды синусоидального напряжения необходимая мощность гетеродина растет в 3—4 раза, одновременно уменьшается скорость нарастания амплитуды сигнала разностной частоты, и наконец, из фотокатода возникает вторичная электронная эмиссия, которая нарушает процесс управления фототоком, поэтому для фотоэлемента Ф28 следует ограничить управляющее напряжение амплитудой не более 30—35 В.

В настоящей работе экспериментально выявлено влияние постоянной составляющей управляющего напряжения на процессы в фотоэлементе при гетеродинировании с целью увеличения амплитуды сигнала разностной частоты.

Исследования проводились согласно схеме, приведенной на рис. 1, где А—анод фотоэлемента, К—катод. На эти электроды одновременно подаются постоянное U_0 и синусоидальное $U_r = U_{rM} \sin(\omega_r t + \varphi)$ напряжения, а на фотокатод поступает немодулированное по интенсивности лазерное излучение F . В фотоэлементе возникает фототок, постоянная составляющая которого I_{a0} измеряется наноамперметром в зависимости от величин U_0 и U_{rM} . Если принять $u_r = 0$, то получается статическая вольтамперная характеристика фотоэлемента, а если $u_r \neq 0$, постоянная составляющая анодного тока I_{a0} уменьшается и при некотором U_0 это уменьшение максимально по сравнению с анодным током I_{a0} в статическом режиме при том же значении U_0 , которое является оптимальным с точки зрения управления фототоком при заданном U_{rM} . Характеристики фотоэлемента приведены на рис. 2.

Уменьшение $I_{\text{н}}$ происходит потому, что в некоторую часть периода напряжения u_r фотоэлектроны не попадают на анод и происходит модуляция фототока. Для подтверждения полученного результата на фотоземлет подавалось также излучение, модулированное частотой

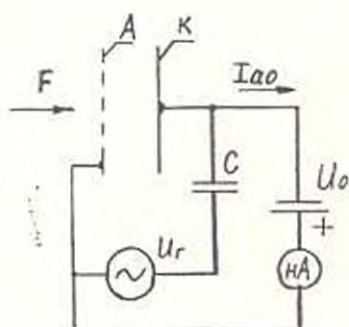


Рис. 1. Схема включения фотоземлет

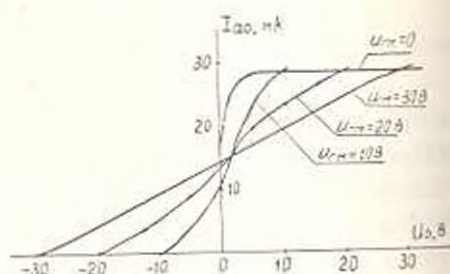


Рис. 2. Характеристики фотоземлет.

500 МГц, при частоте гетеродина 500.005 МГц, что соответствовало выделению разностной частоты 5 кГц. Указанные сверхвысокие частоты генерировались специально сконструированными кварцевыми генераторами, причем, вследствие перестройки частоты гетеродина имелась возможность выделить разностную частоту в диапазоне 2—15 кГц. Из рис. 3 следует, что при заданном $U_{\text{ГМ}}$ существует такое значение U_0 , при котором амплитуда разностной частоты максимальна, следовательно, максимальна и отношение сигнал-шум.

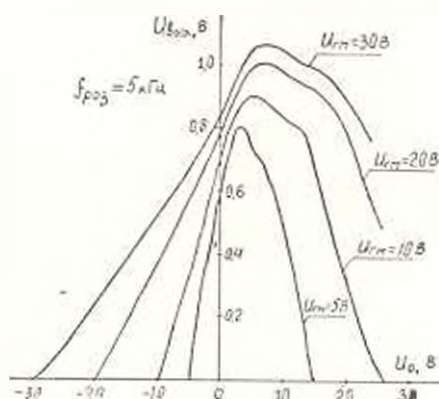


Рис. 3. Характеристики фотоземлет с усилителем разностной частоты.

Влияние постоянного напряжения U_0 на модуляцию фототока и, следовательно, на процесс гетеродинирования в фотоприемнике объясняется пролетными явлениями на СВЧ. При ограниченном $U_{\text{ГМ}}$ под дополнительным влиянием U_0 увеличивается длительность положительной части периода управляющего напряжения, что приводит к постепенному выравниванию количества электронов полетевших и не полетевших на анод за период. При отрицательном значении U_0 , приблизительно равном $U_{\text{ГМ}}$, гетеродинирование вовсе не происходит.

Представляет интерес также оценить влияние U_0 на фазу сигнала разностной частоты. Как показали эксперименты, при изменении U_0 на 30% от оптимального значения фаза сигнала разностной частоты изменялась менее 0,5 градусов, при этом световое пятно диаметром ~ 3 мм находилось в центре фотокатода. Такая высокая стабильность фазы достигается следующим образом. При увеличении U_0 сгусток электронов, эммитируемых из фотокатода и в дальнейшем долетевших до анода, почти одинаково расширяется по обе стороны от его центра и, наоборот, одинаково сжимается при уменьшении U_0 . Изменение фазы сигнала разностной частоты обусловлено перемещением центра сгустка электронов на временной оси.

Полученные результаты можно обобщить также на фотоэлектронные умножители с управляющей прикатодной сеткой в режиме гетеродинамирования.

ЕрПИ им. К. Маркса

30. I. 1986

Л И Т Е Р А Т У Р А

Гулгазарян К. А., Кучурян М. А. Высокочастотный фотоэлемент в режиме гетеродинамирования // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН—1983—I XXXVI, № 1—с. 40—44.

ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

Մ. Գ. Ստակյան, Ն. Ս. Իսախանյան, Ա. Ի. Բարխսեկյան: Հոգնածային փորձարկում-
ների օպտիմիզացման հարցերը 3

ՀԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱՆՔՆԵՐ

Ո. Հ. Խաչատրյան, Գ. Կ. Մարտիկյան: Երկրաչարժականությունը խնդիրներում ալի-
թային տեսության օգտագործման զործնական մեթոդ 15

Տա. Ա. Գրսպարյան, Ա. Վ. Ուսակյան, Ո. Ա. Մարգարյան: Առանցական կապերի
վրա զրկած ներքին պանելով ջածր հաճախականությունը ուղեծանոցային ձայնա-
կանիի աւիանիան հաճախությունների որոշումը 19

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

Է. Ա. Էրմեյան: Էլեկտրական համակարգի կառուցումը հեծրի հաշվան մի մե-
թոդը մասին 24

ՉԱՓՅՎԱԿԱՆ ՏՆՆԵՐԱՆ

Վ. Թ. Վարդանյան, Վ. Վ. Վարդանյան, Ն. Վ. Վարդանյան: Հաճախականային էլեկ-
տրոնիկայի ալիգոտեղոնանսային ձեծման հայտնի 32

ՏՆՆԵՐԱԿԱՆ ԿԻՔՆՈՆՏՏԻՆԱ

Ա. Ա. Մուրդյան: Բազմադասարան համատեղելի տմրդացման և տեղաբաշխման ալ-
գորիթմ 33

ՀԻՔՐՈՏՆԵՆԻԿԱ

Ս. Ա. Անսեյան, Վ. Ո. Սարգսյան: Բնաշողային ջրերի և ձակառկեն լուծույթները որակի
կանխորոշումը թունաոնմեկատերի և պարարտանյութերի օդաազորման դեպքում 37

ԳԻՏԱԿԱՆ ՆՈՔԵՐ

Ր. Ղ. Հարությունով, Թ. Ա. Նուրաջյան: Վինիլալեդատի ալիտվության էլեկտրաբաժնե-
րի հալանահանության բաշխման արենքի սահմանումը 41

Վ. Հ. Թոմսոյան, Թ. Գ. Մարտիրոսյան: Զրի անհաղաարարալի շարժումը հատակի կո-
րագիծ կարճածր ունեցող սրանցքներում 44

Ո. Հ. Փոստյան: Հաստատուն էլեկտրական զույտի ազոնցությունը հետերոգենացման պրո-
ցեսի վրա բարձր հաճախահան ֆոտոէլեմենտում 50

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М. Г. Стакян, И. С. Исаханян, А. И. Борисенко. Вопросы оптимизации испытаний на усталость	3
---	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

С. О. Хачатрян, Г. К. Мартикян. Практический метод применения волновой теории в задачах сейсмостойкости	15
Ю. А. Гаспарян, А. В. Аршакиан, С. А. Маркарян. Определение собственных частот широкополосного резонансного звукопоглотителя с внутренней панелью на упругих связях	19

ЭНЕРГЕТИКА

Э. А. Этмекчян. Об одном методе расчета установившегося режима электрической системы	24
--	----

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В. Р. Варданян, В. В. Варданян, Н. В. Варданян. Дифференциальный пьезорезонансный датчик давления с частотным выходом	28
---	----

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

А. А. Мурадян. Современный многовариантный алгоритм компоновки и размещения	32
---	----

ГИДРОТЕХНИКА

С. А. Анонян, В. С. Саркисян. Прогноз качества поровых растворов и грунтовых вод при применении ядохимикатов и удобрений	37
--	----

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Б. Г. Арутюнов, Т. А. Налчаджян. Определение закона распределения вероятностей выходного параметра активности полилацетата	41
В. О. Токмаджян, Р. Г. Мартиросян. Неравномерное движение воды в каналах с криволинейным очертанием профиля дна	43
М. А. Кучурян. Влияние постоянного электрического поля на процесс гетеродинамизации в высокочастотном фотоэлементе	47