

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿՆԱԳԻՐ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01. 1948 г.  
Выходит 3 раза в год

### ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ. Մարտիրոսյան (գլխավոր խմբագիր), Ռ. Աթոյան (գլխ. խմբ. տեղակալ), Տ. Թերզյան (գլխ. խմբ. տեղակալ), Ս. Ղազարյան, Ռ. Մարուխյան, Ն. Մանուկյան, Ֆ. Սարգսյան, Յու. Սարգսյան, Վ. Սարգսյան, Մ. Ստակյան (գլխ. խմբ. տեղակալ), Զ. Ստեփանյան (պատասխանատու քարտուղար), Վ. Խաչատրյան, Տ. Բոչինյան:

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. Мартиросян (главный редактор), Р.В. Атоян (зам. глав. редактора), С.М. Казарян, Г.А. Кочинян, Н.В. Манукян, В.З. Марухян, В.С. Саркисян, Ф.Т. Саркисян, Ю.Л. Саркисян, М.Г. Стакян (зам. глав. редактора), З.К. Степанян (ответственный секретарь), А.А. Терзян (зам. глав. редактора), В.С. Хачатрян.

### EDITORIAL BOARD

R.M. Martirosyan (Editor-in-Chief), R.V. Atoyan (Vice-Editor-in-Chief), S.M. Ghazaryan, V.S. Khachatryan, H.J. Kochinyan, N.V. Manoukyan, V.Z. Maroukhyan, F.T. Sarkissyan, V.S. Sarkissyan, Yu.L. Sarkissyan, M.G. Stakyan (Vice-Editor-in-Chief), Z.K. Stepanyan (Secretary-in-Chief), H.A. Terzyan (Vice-Editor-in-Chief).

---

**ՀԱՆՂԵՍԸ ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ Է ԱՍԵՐԻԿԱՅԻ ՀԱՅ ԿՐԹԱԿԱՆ  
ՀԻՄՆԱՐԿՈՒԹՅԱՆ ՆՎԻՐԱՏՎՈՒԹՅԱՄԲ ՀԻՄՆԱԴՐՎԱԾ  
ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՅԻՆ ՀՐԱՏԱՐԱԿՉԱԿԱՆ ԿԵՆՏՐՈՆՈՒՄ**

**THE JOURNAL IS PUBLISHED IN THE COMPUTER PUBLISHING  
CENTER ESTABLISHED BY THE DONATION OF THE ARMENIAN  
EDUCATIONAL FOUNDATION (USA)**

---

Հրատ. խմբագիր՝ ԺԱՆՆԱ ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ  
Համակարգչային շարվածքը եւ ձեւավորումը՝  
ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ



© Издательство ГИУА  
Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2001

М. Г. СТАКЯН, Н. А. ГАЛЕЧЯН

## КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ ВАЛОВ

С целью диагностирования причин усталостного разрушения произведены массовые измерения микротвердостей на диаметральной сечении изломов образцов из стали 45 с концентраторами напряжений, подвергнутых усталостному разрушению при разных уровнях циклических перенапряжений. Результаты эксперимента обработаны методами корреляционного и регрессионного анализа. Выявлены функции изменения микротвердостей по глубине и диаметральному сечению излома от характеристик сопротивления усталости, что позволило построить номограмму и с ее помощью произвести количественную оценку влияния повреждающих факторов и тем самым воссоздать предысторию усталостного разрушения.

**Ключевые слова:** микротвердость, усталостное разрушение, диагностирование, номограмма.

В [1-3] для исследования процесса усталостного разрушения валов изучено рассеяние микротвердостей HV в поверхностных слоях изломов образцов с концентраторами напряжений из стали 45 при разных уровнях перенапряжений ( $n=12$ , по 3 образца на уровнях:  $\sigma_i=180, 220, 260$  и  $300$  МПа) в зонах вязкого и хрупкого разрушений (изготовлено 12 микрошлифов и произведено 3890 измерений HV от поверхности излома до глубины 0,9...1,2 мм). Однако для диагностирования самого процесса необходимо иметь достоверные данные о существующих связях между параметрами периодического нагружения и значениями микротвердостей по зонам разрушения. В [2] показано, что поверхность HV –  $d_x$  –  $h$  ( $d_x$  – размер диаметрального сечения излома,  $h$  – расстояние от поверхности излома) не только отражает качественные изменения, происходящие в тонком поверхностном слое излома, но и может стать основой для разработки новой методики по диагностике причин усталостного разрушения.

С целью выявления связи  $F(HV, d_x, h)=0$  результаты массовых измерений HV обработаны согласно программе [4], в которой уравнение семейства квантильных линий регрессии, удовлетворяющих разноразной вероятности неразрушения, в общем виде записано как

$$y_x = (\bar{y} + z_p s_{y/x}) + (\bar{x} - x) r s_y / s_x = a_y + b_{y/x} x, \quad (1)$$

а мера индивидуального рассеяния вокруг медианной линии регрессии:

$$s_{y/x} = s_y \sqrt{(1 - r^2)(n - 1)/(n - 2)}, \quad (2)$$

где  $y_x$  – HV;  $x$  – параметр исследуемого фактора;  $a_y = (\bar{y} + z_p s_{y/x}) - \bar{x} b_{y/x}$ ,  $b_{y/x} = r s_y / s_x$  – параметр и коэффициент линии регрессии (1);  $z_p$  – квантиль нормального распределения, а остальные величины общеизвестны.

Для установления оптимальной формы связи  $HV=f_1(h)$ , которая заранее неизвестна, согласно [4] необходимо сделать выбор альтернативных вариантов линеаризующих функций, обеспечивающих максимальное значение выборочного коэффициента корреляции  $r_{\max}$ , и независимо от  $r_{\max} > 0,5$  из пакета функций выбрать связь, которая была бы удобной для оценки исследуемых расчетных величин в целесообразной и доступной новой координатной системе (u, v). Для разных уровней перенапряжений  $\sigma_1$  составлены 10 вариантов альтернативных линеаризующих функций и соответствующие им значения  $r_{\max}$  (табл. 1), согласно которым связь  $HV = f_1(h)$  образцов в оптимальной форме можно представить в виде функции  $HV = a + b_{HV/h} h^{-n}$  ( $n = 1...3$ , рис.1).

Таблица 1

Линеаризующие преобразования для связи  $HV=f_1(h)$  ( $\sigma_1=300$  МПа,  $N_1=0,53 \cdot 10^5$ )

N	U = f(v)	Значения $r_{\max}$ по рядам измерений HV						
		1.03	1.05	1.07	1.09	1.10	1.19	1.26
1	$y-1/x^n, n=1$	0,9638	0,9813	0,9918	0,9942	0,9712	0,9906	0,9984
2	$\lg(y)-1/x^n, n=2$	0,9470	0,9474	0,9869	0,9892	0,9481	0,9827	0,9927
3	$1/y^n-\lg(x), n=1$	0,8492	0,9524	0,9363	0,9455	0,9599	0,9427	0,9358
4	$1/y-1/x$	0,9186	0,9001	0,9641	0,9696	0,9193	0,9694	0,9850
5	$\lg(y)-\lg(x+g), g=0,2$	0,9102	0,9578	0,9548	0,9506	0,9601	0,9671	0,9182
6	$\lg(y+g)-\lg(x), g=0$	0,8506	0,9370	0,9081	0,9007	0,9412	0,9289	0,8387
7	$y^n-\lg(x), n=3$	0,8384	0,8571	0,8538	0,8485	0,9163	0,9091	0,7804
8	$1/y^n-x, n=1$	0,6553	0,8840	0,7802	0,7593	0,8311	0,7857	0,7779
9	$1/y-1/\exp(x)$	0,7000	0,8181	0,7497	0,7064	0,7751	0,7629	0,6784
10	$1/y-\exp(x)$	0,5785	0,6683	0,6111	0,5730	0,6539	0,6684	0,5729

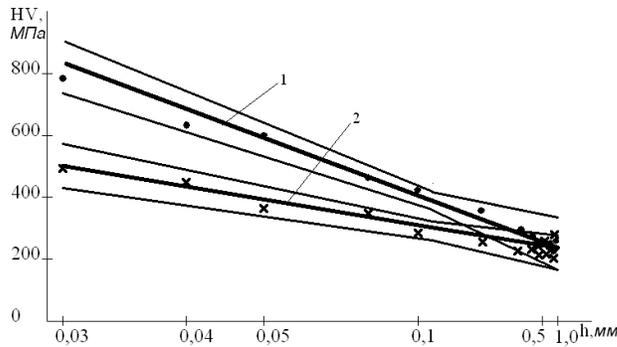


Рис. 1. Медианные линии регрессии  $HV=f_1(h)$  и их 90%-ые доверительные границы в системе координат (y-1/x) по зонам вязкого (1) и хрупкого (2) разрушений ( $\sigma_1=300$  МПа,  $N_1=0,53 \cdot 10^5$ )

Изменение HV по глубине носит гиперболический характер и имеет высокий градиент, в связи с чем на расстоянии 0,5...0,8 мм практически устанавливается исходное состояние, что подтверждается также металлографическими исследованиями фазовых составляющих микроструктуры [1].

Расчеты свидетельствуют, что в (1) параметр  $a_y$  учитывает уровень, а коэффициент  $b_{y/x}$  – градиент упрочняющих процессов. Значения

этих величин претерпевают изменения в зонах вязкого и хрупкого разрушений, а также при переходе к низким уровням  $\sigma_i$  и поэтому могут стать надежными характеристиками для диагностики причин усталостного разрушения.

В диаметральной сечении образцов по оси  $d_x$  изменение микротвердостей носит сложный характер (рис.2). Максимальные значения функции  $HV = f_2(d_x)$  соответствуют крайним участкам зоны вязкого разрушения, а минимальные - центру зоны хрупкого разрушения. Здесь также с удалением от поверхности излома кривые  $HV=f_2(d_x)$  становятся пологими, и на расстоянии  $h=0,5...0,8$  мм:

$$HV = f_2(d_x) = \text{const} = HV_0. \quad (3)$$

При снижении значений  $\sigma_i$ , в связи с нецентральной расположением зоны долома и увеличением эксцентриситета  $e$ , функции  $HV = f_2(d_x)$  становятся асимметричными с некоторым разрывом значений  $HV$  в средней части зоны долома, а значения  $HV_{\text{max}}$  и  $HV_{\text{min}}$  падают (рис.2). Для унификации расчетов значения  $HV$  по диаметральным рядам разделены на две группы – от крайней точки большей зоны вязкого разрушения до середины зоны хрупкого разрушения, и оттуда – до крайней точки меньшей зоны вязкого разрушения (участки  $A_1, A_2, A_3$  и  $B_1, B_2, B_3$  на рис. 2 и табл. 2).

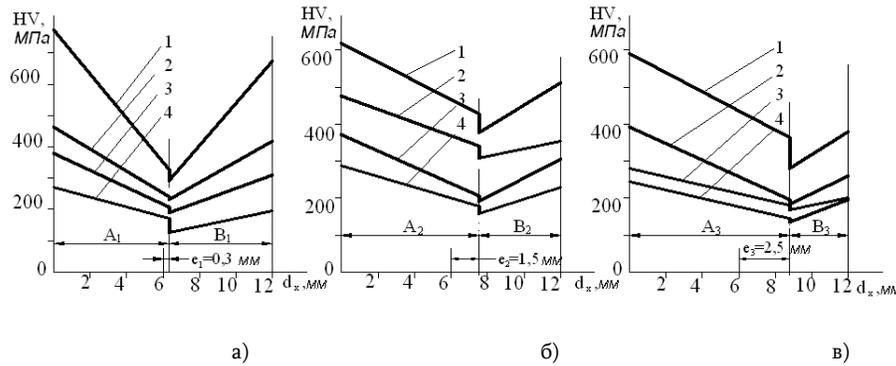


Рис.2. Медианные линии регрессии  $HV=f_2(d_x)$  для образцов: а -  $\sigma_1=300$  МПа,  $N_1=0,53 \cdot 10^5$ ; б -  $\sigma_2=260$  МПа,  $N_6=0,55 \cdot 10^6$ ; в -  $\sigma_4=180$  МПа,  $N_{10}=0,66 \cdot 10^5$ .

Графики 1-4 соответствуют диаметральным линиям на микрошлифе, отстоящим от поверхности излома на: 1 - 0,01 мм, 2 - 0,05 мм, 3 - 0,1 мм и 4 - 0,5 мм

Выяснилось, что наиболее приемлемой формой связи  $HV = f_2(d_x)$  является функция  $HV = a + b_{HV/dx} d_x$  ( $IrI = 0,9455...0,9930$ , табл.2).

Общий вид усталостного излома, вариация расположения зон усталостных разрушений и геометрических параметров, а также упрочнение микрообъемов поверхностных слоев излома из-за микропластических деформаций [2, 3], чьи количественные оценки реализованы по результатам массовых измерений  $HV$ , свидетельствуют о наличии многопараметрических связей между исследуемыми величинами.

Линеаризующие преобразования для связи  $HV = f_2(d_x)$ 

№	u=f(v)	Значения $ \Gamma_{\max} $ для образцов, испытанных при:					
		$\sigma_1=300 \text{ МПа}$ $N_1=0,53 \cdot 10^5$		$\sigma_2=260 \text{ МПа}$ $N_6=0,55 \cdot 10^5$		$\sigma_4=180 \text{ МПа}$ $N_{10}=0,66 \cdot 10^5$	
		A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>
1	y-x	0,9930	0,9697	0,9939	0,9867	0,9722	0,9455
2	y-1/x	0,9928	0,9640	0,9883	0,9796	0,9583	0,9329
3	lgy-x	0,9923	0,9627	0,9741	0,9454	0,9107	0,9092
4	1/y-1/x	0,9810	0,9613	0,9710	0,9440	0,9055	0,8908
5	1/y-e <sup>x</sup>	0,9865	0,9174	0,9580	0,9235	0,8578	0,8790

Основным фактором, влияющим на вид излома, является уровень циклических перенапряжений  $\sigma_i$ , возникающих в опасном сечении. Таким образом, становится важным комплексное изучение видов изломов, являющихся результатом процессов трещинообразования и развития, что позволит выявить многопараметрические связи между циклическими перенапряжениями и долговечностью, геометрическими параметрами и механическими свойствами валов:

$$F(\sigma_i, v_{\sigma_i}, N_i, HV_{\max}, HV'_{\max}, HV_{\min}, HV_o, \sigma_B, \sigma_T, \sigma_R, d, e, \delta_A, b_{y/x}, HB, HRC, z_p, \dots) = 0, \quad (4)$$

где  $\sigma_i$ ,  $N_i$ ,  $v_{\sigma_i}$  - циклические перенапряжения, долговечности и коэффициент вариации  $\sigma_i$ ;  $HV_{\max}$ ,  $HV'_{\max}$ ,  $HV_{\min}$ ,  $HV_o$ ,  $b_{y/x} = \tan \alpha$  - экстремальные и исходные значения микротвердостей, а также их градиент (рис. 3);  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_R$ ,  $HB$ ,  $HRC$  - механические свойства материала и поверхностного слоя излома;  $d$ ,  $e$  - диаметр образца и эксцентриситет зон разрушения;  $\delta_A = A_\delta / A_o$  - относительный коэффициент площади долома ( $A_\delta$ ,  $A_o$  - площади долома и опасного сечения образца).

Подобная комплексная оценка позволяет, кроме традиционно используемого во фрактографии метода визуального исследования излома, который реализует только качественные оценки, перейти на количественную оценку и решить следующую задачу - выявить по внешнему виду усталостного излома путем измерений геометрических параметров зон разрушения и микротвердостей поверхностных слоев предысторию усталостного разрушения и значения действующих перенапряжений, которые и стали причиной этого разрушения. Предлагаемые оценки являются основой для разработки обоснованного метода диагностирования усталостного разрушения, что является важной задачей для экспертной оценки аварий и происшествий в разных сферах производства и транспорте, вышедших из строя инженерных сооружений, технологического оборудования, механизмов и машин, а также дорожно-транспортных средств различного назначения.

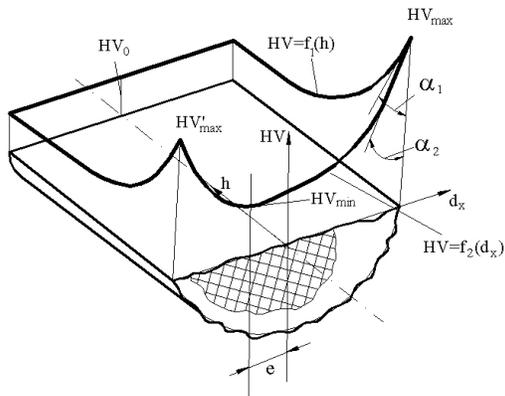


Рис.3. Расчетно-графическая схема

С использованием принципов системного анализа составлена расчетно-графическая схема многопараметрических связей

(рис. 3), что позволяет их представить в виде системы линейных регрессионных уравнений, аргументом которых является  $\sigma$ , а параметром - квантиль  $z_p$ :

$$\begin{cases} HV_{\max} = f_1(\sigma), & HV'_{\max} = f_2(\sigma), & HV_{\min} = f_3(\sigma), \\ b_{y/x_1} = f_4(\sigma), & b_{y/x_2} = f_5(\sigma), \\ e = f_6(\sigma), & \hat{\sigma}_A = f_7(\sigma), \\ \sigma = \varphi_1(N_i), & \sigma = \varphi_2(v_{\sigma_i}). \end{cases} \quad (5)$$

Каждое уравнение системы (5) фактически является математической моделью, характеризующей отдельное явление процесса усталостного разрушения, а сама система в целом позволяет путем различных процедур (визуальной, метрологической, металлографической, расчетной) реализовать обоснованное и комплексное диагностирование усталостного разрушения [3].

Статистические расчеты согласно [4] свидетельствуют (табл. 3), что в координатной системе  $(y,x)$  (кроме связи  $\sigma_i - N$ , которая представлена в системе  $\sigma_i - \lg N$ ) значения выборочного коэффициента корреляции достаточно высокие:  $|r| = 0,8124...0,9780$  при минимальных значениях меры индивидуального рассеяния  $s_{y/x}$  ( $s_{x/y}$ ), что значительно повышает достоверность расчетов.

Для проверки достоверности полученных результатов и соответствия действительных и расчетных значений  $\sigma_i$ , полученных с помощью медианных линий регрессии системы (5), для каждого испытанного образца рассчитано по 7 значений, а для каждого уровня перенапряжений - 21 значение  $\sigma_i$ . Предварительная статистическая обработка данных свидетельствует о минимальном расхождении действительных и медианных расчетных значений  $\sigma_i$  (до 4,6%), а величины коэффициентов вариации  $v_{\sigma_i}$  позволяют судить о нормальности распределения расчетных значений  $\sigma_i$  (табл.4).

Таблица 3

Регрессионные связи	r	S <sub>y/x</sub> , S <sub>x/y</sub> *	B <sub>y/x</sub> , B <sub>x/y</sub> *	Значения A <sub>y</sub> , A <sub>x</sub> * при P =				
				0,5	0,9	0,95	0,99	0,999
HV <sub>max</sub> - σ	0,9112	0,2100	0,9400	432,00	430,63	430,55	430,42	430,25
HV' <sub>max</sub> - σ	0,8260	0,5800	1,7480	65,35	64,02	63,77	63,41	62,96
HV <sub>min</sub> - σ	0,9450	0,1200	0,7280	88,82	88,06	88,02	87,95	87,57
b <sub>y/x1</sub> - σ	-0,8270	0,2711	-0,5216	16,84	8,86	7,847	6,03	3,96
b <sub>y/x2</sub> - σ	0,8124	0,1690	0,0030	-0,23	-0,55	-0,61	-0,72	-0,85
e - σ	-0,8850	0,0500	-0,1800	56,50	57,05	56,87	56,52	56,16
σ <sub>A</sub> - σ	0,9780	0,0130	0,0010	-0,16	-0,11	-0,11	-0,11	-0,12
σ - lgN*	-0,9260	18,5004	-109,3587	869,3554	869,1281	869,0765	868,9912	869,9213

Примечание: \*) величины относятся к связи σ -lgN

Действительные значения σ <sub>i</sub> , МПа	Расчетные значения σ <sub>i</sub> согласно (5)			Проверка «нулевой» гипотезы по критериям согласия		
	$\bar{\sigma}_i$ , МПа	s <sub>σ</sub> , МПа	v <sub>σ<sub>i</sub></sub>	λ	w	χ <sup>2</sup>
180	181,28	31,76	0,175	0,625	0,950	2,051
220	230,06	28,75	0,125	0,420	0,984	1,439
260	263,79	26,21	0,100	0,625	0,972	1,149
300	308,26	18,39	0,060	0,326	0,993	0,367

Примечание: при n=21, α=0,05 и k=2: λ<sub>α</sub> = 1,04, w<sub>α</sub> = 0,908, χ<sub>α</sub><sup>2</sup> = 5,99

Таблица 4

Комплексная проверка «нулевой» гипотезы нормальности распределения расчетных выборок σ<sub>i</sub> проведена согласно критериям Колмогорова-Смирнова - λ, Шапиро-Уилка - w и приближенному критерию Пирсона - χ<sup>2</sup> [5]:

$$\lambda = \max[D_n^+, D_n^-] [\sqrt{n} - 0,01 + 0,85/\sqrt{n}] \leq \lambda_{\alpha} \quad (6)$$

$$w = b^2/s^2 \geq w_{\alpha}, \chi^2 = (s_k/s_{sk})^2 + (E_k/s_{ek})^2 \leq \chi_{\alpha}^2.$$

Расчетные проверки по критериям согласия (6) свидетельствуют, что выборки σ<sub>i</sub> на уровне значимости (=0,05 не противоречат нормальному закону распределения (табл.4). Это подтверждается также графической проверкой, построением медианной эмпирической линии распределения σ<sub>i</sub>:

$$\hat{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i + z_p s_{\sigma_i} = \bar{\sigma}_i (1 + z_p v_{\sigma_i}) \quad (7)$$

и ее доверительных границ в вероятностных координатах (рис.4), что позволяет в уточненных расчетах использовать значения σ<sub>i</sub> с доверительной вероятностью:

$$\bar{\sigma}_i - s_{\sigma_i} \cdot t_{\alpha,k} / \sqrt{n} < \sigma_i < \bar{\sigma}_i + s_{\sigma_i} \cdot t_{\alpha,k} / \sqrt{n}, \quad (8)$$

где t<sub>(k)</sub> – квантиль распределения Стьюдента при заданном уровне α и k = n-1.

Анализ данных табл.4 указывает на наличие еще одной связи между  $\sigma_i$  и коэффициентом вариации  $v_{\sigma_i}$ . Статистическая обработка свидетельствует о наличии тесной линейной корреляционной связи между рассмотренными величинами ( $|r|=0,9924$ ), которая выражается через

$$\bar{\sigma}_{i_v} = A_v + B_{\sigma/v} v_{\sigma_i} = 362,45 - 1064,75 v_{\sigma_i} \quad (9)$$

и может быть введена в систему (5).

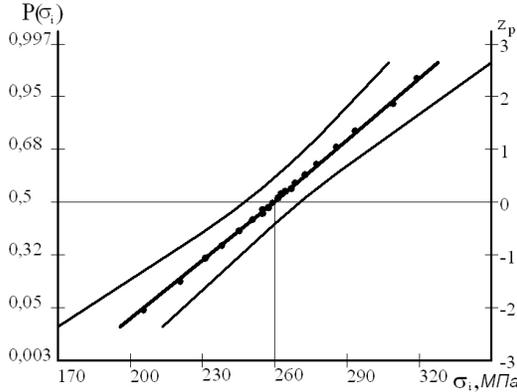


Рис. 4. Медианная линия эмпирической функции (7) и ее 90%-ые доверительные границы при  $\sigma_i = 260$  МПа

В производственных условиях при ускоренном анализе и экспертной оценке разрушений техногенного характера и дорожно-транспортных происшествий, а также на начальном этапе исследований наиболее простым и доступным является графический метод решения системы (5) путем построения номограмм, который может быть реализован непосредственными измерениями на месте происшествий, не требует наличия необходимого программного обеспечения и выполнения сложных статистических расчетов.

Анализ и учет требований номографии [6] позволили сгруппировать и представить систему линейных уравнений (5) в виде

$$\begin{cases} HV_{\max} = A_{y1} + B_{y/x1} \sigma, & HV'_{\max} = A_{y2} + B_{y/x2} \sigma, & HV_{\min} = A_3 + B_3 HV_{\max}, \\ b_{y/x1} = A_{y4} + B_{y/x4} \sigma, & b_{y/x2} = A_{y5} + B_{y/x5} \sigma, \\ e = A_{y6} + B_{y/x6} \sigma, & \partial_{\Lambda} = A_{y7} + B_{y/x7} \sigma, \\ \sigma = A_{x1} + B_{x/y1} \lg N, & \sigma = A_v + B_{\sigma/v} v_{\sigma_i}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $A_3 = (A_{y1} - A_{y3} / B_{y/x3})$ ,  $B_3 = B_{y/x1} / B_{y/x3}$ ,

и построить номограмму (рис.5) для определения вероятных значений циклических перенапряжений  $\sigma_i$ , ставших причиной усталостного разрушения, а также долговечностей  $N_i$ . Сравнительно низкие значения дисперсий расчетных величин предопределили узкие интервалы расположения квантильных линий уравнений (10), что также повышает точность расчетов по номограмме.

Используя результаты фрактографического анализа, метрологические и металлографические измерения поверхности излома и подповерхностных слоев, путем построений на номограмме определяют значения  $\sigma_i$ , рассчитывают среднее значение  $\bar{\sigma}_i$ , по нему -  $\bar{N}_i$  и  $v_{\sigma_i}$ , а затем с помощью  $v_{\sigma_i}$  и (7) - значения  $\hat{\sigma}_i$ , соответствующие заданной вероятности неразрушения. На рис. 5 представлены графические процедуры и построение эмпирической дифференциальной функции нормального распределения  $\sigma_i$  для уровня перенапряжений  $\sigma_i = 260$  МПа.

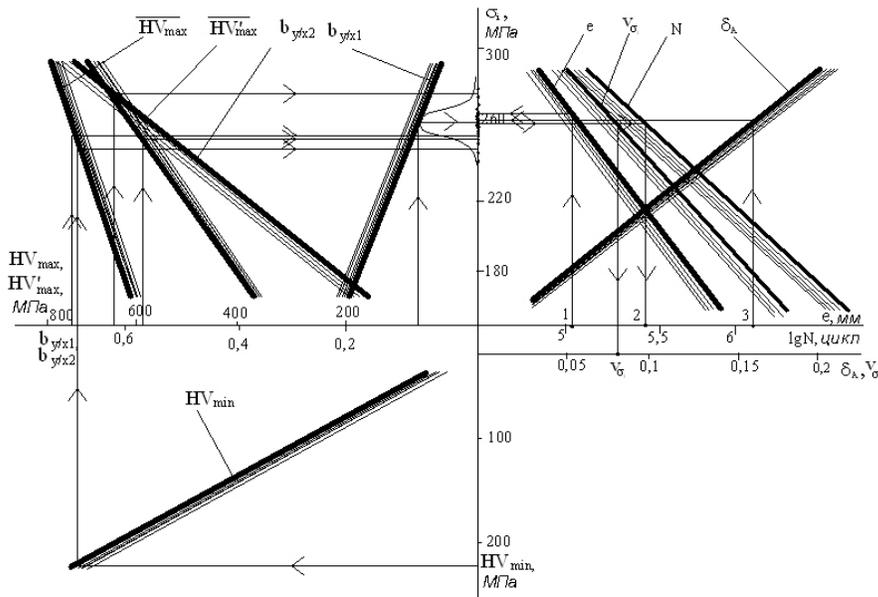


Рис.5. Номограмма  $\sigma_i - HV_{max} - HV'_{max} - HV_{min} - b_{y/x1} - b_{y/x2} - e - \delta_A - \lg N - v_{\sigma_i} - z_p$

Применение номограммы позволяет решить следующие задачи:

- а) по экспертной оценке значений  $\sigma_i$  не только выявить недопустимый уровень перенапряжений, но и рассчитать вероятность неразрушения и действительный срок службы машины (механизма);
- б) выявить истинные причины усталостного разрушения (конструкторские недоработки, нарушения технологических процессов, недопустимые режимы и условия эксплуатации, степень воздействия каждого из повреждающих факторов) и выдвинуть предложения по их устранению;
- в) дать обоснованное заключение и выявить степень ответственности обслуживающего персонала в причинах аварии или происшествия;
- г) решить обратную задачу - для обеспечения гарантированного срока службы определить безопасный уровень действующих перенапряжений  $\sigma_i$  с учетом заданной вероятности неразрушения.

Предложенная номограмма обладает определенной универсальностью, т.к. в ней использованы результаты испытаний на усталость и измерений микротвердостей образцов из стали 45, являющейся

основным материалом из класса среднеуглеродистых конструкционных сталей, который широко применяется при изготовлении валов и тяжело нагруженных деталей передаточных механизмов различного назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стакян М.Г., Исаханян Н.С., Галечян Н.А.** Использование метода микротвердости для оценки режимов современных упрочняющих технологий деталей машин и процессов трещинообразования // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 1996.- Т. 49, № 3.-С. 3-8.
2. **Галечян Н.А.** Оценка процесса усталостного разрушения валов методом измерения микротвердости // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.-2000.-Т.53, № 1. - С. 281-286.
3. **Стакян М.Г., Галечян Н.А.** Метод диагностики усталостных разрушений валов // Сб. мат. год. науч. конф. ГИУА. – Ереван, 2000. – Т.1. – С. 212-213 (на арм. яз.).
4. **Стакян М.Г., Оганесян Л.Г.** Комплексная программа для корреляционного и регрессионного анализа результатов механических испытаний // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - № 11. - С. 47 - 53.
5. **Стакян М.Г., Демирханян А.Р.** Модифицированный метод проверки нормальности распределения результатов механических испытаний // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.-2000.-Т.53, № 3. – С. 271-280.
6. **Хованский Г.С.** Основы номографии. – М.: Наука, 1976. – 352 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 02. 03. 2001.

**Մ. Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ , Ն. Ա. ԴԱԼԵՉՅԱՆ**  
**ԼԻՄԵՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾՍՅՒՆ ԿՈՏՐՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՍՏԱԼԻՐ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ԵՎ**  
**ԱՐՍՏԱՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Հոգնածային քայքայման պատճառների արատաորոշման նպատակով գերլարումների տարբեր մակարդակներով փուլային բեռնվածության ենթարկված լարումների կուտակիչով պողպատ 45 մակնիշի փորձանմուշների կոտրվածքների տրամագծային հատույթների վրա իրականացվել են միկրոկարծրության համալիր չափումներ: Փորձի արդյունքները մշակված են հարաբերակցային և հետընթացային վերլուծության մեթոդներով, բացահայտված են միկրոկարծրության ֆունկցիաները հոգնածային դիմադրության բնութագրերից՝ կոտրվածքի խորությամբ և տրամագծային հատույթով, ինչը հնարավորություն է ընձեռել կառուցել նոմոգրամներ, դրանց միջոցով կատարել վնասվածքային գործոնների ազդեցության քանակական գնահատականը և վերականգնել հոգնածային քայքայման նախապատմությունը:

**M. G. STAKYAN, N. A. GHALECHYAN**  
**COMPLEX RESEARCH AND DIAGNOSING OF THE FATIGUE**  
**FRACTURED SHAFTS**

To diagnose the reasons of fatigue failure, the complex microhardness measurements were performed on diametrical specimen fracture section of steel 45 with concentrators, priority tested at high, medium and low cyclic superstresses subjected to fatigue failure. The experimental results are processed by the method of correlation and regression analysis. Microhardness distribution functions of depth and diametrical fracture section are revealed. This allows to design the nomogram and give the quantitative evaluation of the failure factor influence, thereby recreating the prehistory of fatigue failure process.

*М.А. ГРИГОРЯН***НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРАВКИ**

Установлен закон разновысотности выступов режущих поверхностей алмазного ролика и шлифовального круга. Получены формулы для определения: количества режущих выступов на разных уровнях профиля инструмента; количества вероятных контактирующих зерен; критической разрушающей силы выступа. Показаны преимущества и эффективность применения алмазных роликов с ориентированными алмазными зёрнами.

**Ключевые слова:** микрогеометрия, разновысотность, количество контактов, разрушение.

Практика мирового производства подтвердила неоспоримые преимущества алмазных правящих роликов (АР), отличающихся высокой производительностью по сравнению с другими правящими инструментами. Однако состояние вопросов, связанных с использованием АР в промышленности, позволяет утверждать, что комплексные исследования и разработка научных основ повышения производительности правки шлифовальных кругов (ШК), а также новых высокоэффективных инструментов и методов правки – неотложная задача научно-технического прогресса, для решения которой необходимы соответствующие подходы.

**Рельеф контактирующих поверхностей.** При правке происходит динамическое взаимодействие рельефов композиционных шероховатых поверхностей двух неоднородных материалов АР и ШК, отличающихся следующими основными особенностями: контактирование происходит в условиях высоких давлений и температур; контактирующие тела являются композиционными с разными физико-механическими свойствами; микрогеометрии взаимодействующих поверхностей изменяются в процессе контактирования; контактирующие выступы перемещаются относительно друг друга с высокими скоростями и подвергаются динамическим и тепловым воздействиям; в зоне контакта возможны косые поперечные и продольные соударения режущих выступов зерен; контактирующие выступы подвергаются упругим деформациям, а зёрна перемещаются в связующих материалах.

На основании экспериментальных данных с учетом токопроводности металлической связки АР и метода повторного профилографирования поверхности ШК и разделения общей профилограммы на профилограммы отдельных компонентов установлено (табл.), что высотные параметры профиля зерен больше, чем связок; инструмент с большими зёрнистостями имеет большие высотные параметры.

Высотные параметры микрогеометрии компонентов инструментов

Характеристика инструмента	Профи- лограмма	До работы			После работы		
		H, мкм	R <sub>z</sub> , мкм	R <sub>a</sub> , мкм	H, мкм	R <sub>z</sub> , мкм	R <sub>a</sub> , мкм
АС15 250/200 М1 100%	Общая	23	11,5	2,3	120	100	24
	Алмаза	23	11,5	2,3	120	100	24
	Связки	8	6	1,6	80	50	15
АС15 315/250 М1 100%	Общая	24	12,2	2,4	125	104	25
	Алмаза	24	12,2	2,4	125	104	25
	Связки	12	10	1,7	85	68	15
АС15 400/315 М1 100%	Общая	26	13,3	2,6	128	106	26,5
	Алмаза	26	13,3	2,6	128	106	26,5
	Связки	14	11	1,8	90	70	18
24А40 СМ17К5	Общая	340	283	70,8	303	257	64
	Зерна	340	283	70,8	303	257	64
	Связки	110	90	20	200	150	35
24А25 СМ17К5	Общая	250	208	52	220	183	45
	Зерна	250	208	52	220	183	45
	Связки	150	110	28	145	110	25
24А16 СМ17К5	Общая	180	150	38	160	133	33
	Зерна	180	150	38	160	133	33
	Связки	130	110	28	110	80	20
Л020СТ1К5 100%	Общая	90	75	18	80	66	16
	Зерна	90	75	18	80	66	16
	Связки	60	55	15	50	40	10
Л016СТ1К5 100%	Общая	80	67	16	75	62	15
	Зерна	80	67	16	75	62	15
	Связки	50	40	10	45	36	8
Л012СТ1К5 100%	Общая	70	58	15	60	50	12
	Зерна	70	58	15	60	50	12
	Связки	45	35	10	40	30	10

Количество контактирующих зерен. Информация о количестве участвующих в процессе резания зерен при абразивной обработке остро необходима [1].

Проведенный нами анализ профилограмм режущей поверхности АР и ШК с построением и проверкой полигонов разновысотности режущих выступов по асимметричности, островершинности и критерию согласия  $\chi^2$  позволил получить информацию о бета-распределении разновысотности режущих выступов и выражение для определения количества  $n$  режущих выступов на уровне  $Y$  сечения профиля инструмента:

$$n = [n_c \Gamma(\alpha + \beta) M / \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta) (\alpha + m)] (Y / H)^{\alpha + m},$$

где  $n_c$  - число всех режущих выступов на поверхности инструмента;  $\alpha$ ,  $\beta$  - параметры бета-распределения;  $\Gamma$  - гамма-функция;  $H$  - высота профиля;

$$M = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m (\beta - 1)! / (\beta - 1 - m)! m!$$

Для алмазного ролика и эльборового круга  $n_c$  зависит от концентрации зерен и объема единичного зерна  $n_c = 0,018(K/V_3)^{2/3}$ , а для электрокорундового круга – от номера структуры инструмента  $n_c = 0,27(31 - N)^{2/3} / V_3^{2/3}$ , где  $K$  – концентрация зерен в инструменте;  $V_3$  – объем единичного зерна,  $N$  – номер структуры инструмента.

При взаимодействии рельефов АР и ШК после радиальной подачи  $S_p$  ролика вероятное количество  $n_y$  контактов выступов определяется следующим образом:

$$n_y = n_{\min} A_p A_k H_p H_k M_p M_k B(S'_p / H_{\min})^{\alpha_p + \alpha_k + m_p + m_k - 2}, \quad (1)$$

где  $n_{\min}$  – количество выступов на той из контактирующих поверхностей, которая имеет меньшее число выступов;  $H_{\min}$  – минимальная высота профиля из двух контактирующих рельефов;  $S'_p$  – сближение профилей;

$$B = (\alpha_p - 1)! (\alpha_k - 1)! m_p! m_k! / (\alpha_p + \alpha_k - 2)! (m_p + m_k)!$$

Разделив профилограммы поверхностей АР и ШК на профилограммы “зерен” и “связки”, представляется возможным определить из общего количества количество контактов алмазных и электрокорундовых зерен:

$$n_A = n_y - n'_{\min} A_M A_K H_M H_K M_p M'_K B'(S'_p / H_M)^{\alpha_p + \alpha'_k + m_p + m'_k - 2},$$

$$n_{\text{э}} = n_y - n''_{\min} A_p A_{Kc} H_p H_{Kc} M'_p M_K B'(S'_p / H_{Kc})^{\alpha'_p + \alpha_k + m'_p + m_k - 2}.$$

Здесь  $n_A$  – количество контактов алмазных зерен АР;  $n_{\text{э}}$  – количество контактов абразивных зерен ШК;  $n'_{\min}$ ,  $n''_{\min}$  – соответственно минимальное количество выступов контактирующих поверхностей: ШК и металлической связки АР, керамической связки ШК и АР; индексы “М”, “Кс”, “Р”, “К” соответственно относятся к металлическим и керамическим связкам, к АР и ШК.

Выполненные по зависимости (1) расчеты количества вероятных контактов показали (рис.1), что с увеличением радиальной подачи  $S_p$  ролика и уменьшением зернистости алмаза количество  $n_y$  увеличивается.

Сравнение экспериментальных данных количества контактирующих выступов, определенных при использовании метода отпечатков прижатием непосредственно на станке ролика через фольгу на поверхность ШК, с теоретическими данными показало их хорошее совпадение (отклонение в пределах 8...10%).

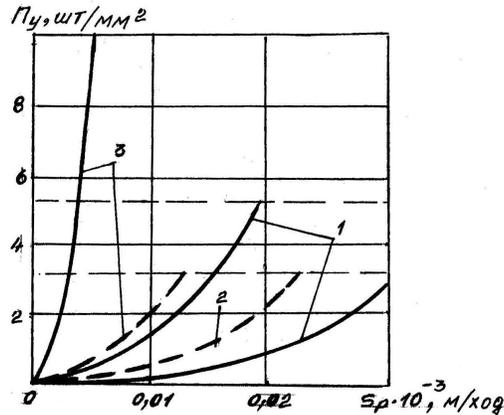


Рис. 1. Зависимость вероятных контактов  $n_y$  от радиальной подачи  $S_p$  ролика при правке алмазным роликом: - АС15 250/200; ---АС 15 500/400; 1-24А40СТ17К5; 2-24А25СТ17К5; 3-Л016СТ1К5 (штриховые горизонтальные линии - предельные значения контактов)

**Разрушение контактирующих зерен.** Для аналитического исследования процесса разрушения алмазных зерен была принята механическая модель разрушения и следующие допущения: нагрузки, действующие на контактирующие выступы, прилагаются в их вершинах; контактирующие выступы деформируются только упруго; влияние контактной температуры на механизм разрушения не учитывается. Кроме того, геометрическая форма каждого алмазного зерна является случайной величиной, поверхность его шероховатая; аппроксимация контурных форм большого количества зерен дает возможность представить зерно в виде эллипсоида. Для измерения размеров зернового состава в отходе использовали микроскоп УММ. Износ алмаза в ролике изучался путем последовательного фотографирования единичных зерен на микроскопе МИМ-8, а размерный износ алмазных зерен определяли на микроскопе МИН-9 путем фокусировки на неподвижную поверхность (в качестве базы измерений принималось дно лунки, нанесенное вблизи зерна) и на вершину зерна. При этом установлено наличие лунок от разрушенных и выпавших из связок алмазных зерен: количество разрушенных зерен в 4...9 раз больше, чем выпавших зерен. Исследование отходов правки показало, что износ алмазного слоя ролика состоит из износа и вырывания алмазных зерен и абразивного истирания металлической связки. Размеры алмазных зерен в отходе составляют 0,4...0,5 от среднего размера зерна в инструменте: большинство алмазов разрушается из-за скалывания отдельных их частей (80...90%). Таким образом, можно утверждать, что основным видом износа алмазных зерен правящего ролика за счет микровыкрашивания и микросколов является их хрупкое разрушение и выпадение из связки.



Рис.2. Схема контактирования алмазного ролика с шлифовальным кругом :

1 - зерно алмазное, 2 - зерно абразивное

Каждое алмазное зерно, внедряясь в ШК, работает на длине  $L$  дуги контакта в течение времени  $\tau$  контакта ( $\tau=L/V_p$ ) и выходит из ШК. После удара алмазного зерна и разрушения I абразивного зерна алмазное зерно некоторое время движется без контактирования (рис.2). Затем оно ударно встречается со II абразивным зерном и разрушает его, потом разрушает III зерно и так далее до выхода из зоны контакта. Эти повторяющиеся микроудары приводят к увеличению длины существующей в алмажном зерне трещины до критической величины, в результате чего, когда коэффициент интенсивности напряжения достигает своего критического значения, происходит разрушение зерна.

Хрупкое разрушение выступа алмазного зерна можно объяснить процессом зарождения и развития трещин в нем. Если на выступе существует трещина, то напряжение  $\sigma$  у конца трещины, находящейся на расстоянии  $X$  от ее вершины, можно определить с помощью критического коэффициента  $K_{Ic}$  интенсивности напряжения [2]  $\sigma = K_{Ic} / \sqrt{2\pi X}$ .

Для исследования условий хрупкого разрушения рассмотрим каждый контактирующий режущий выступ как консольную балку переменного сечения, заделанную одним концом в тело зерна, а общее зерно прикрепленным к связке. Если ударная сила  $P$  на алмазное зерно действует наклонно под углом  $\alpha$  к оси выступа (большая ось зерна эллипсоида) зерна со скоростью  $V_y$  удара (рис.3), то, используя метод сечений, условие равновесия будет

$$\int_{Z_2}^{Z_1} \sigma_H m dz - \int_{Z_1}^{Z_1+a} \frac{K_1 m dz}{\sqrt{2\pi(Z-Z_1)}} - \int_{Z_2-b}^{Z_2} \frac{K_{11} m dz}{\sqrt{2\pi(Z_2-Z)}} = 0, \quad (2)$$

где  $\sigma_H$  – нормальные напряжения в сечении выступа;  $a, b$  – расстояние от вершины трещины до места, где напряжение имеет нормальное значение;  $Z_1, Z_2$  – расстояние от нейтральной оси до верхнего и нижнего концов трещин;  $m$  – эквивалентная толщина выступа.

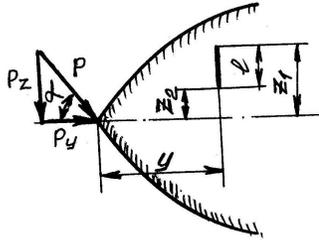


Рис.3. Схема косого соударения силой P на выступ алмазного зерна

На основании (2) и из условия нахождения конца трещины у ближайшего к свободной поверхности выступа и равенства критерия  $K_1$  разрушения и критического коэффициента  $K_{1c}$  интенсивности напряжения определяем критическую силу  $P_{zk}$ , под влиянием которой будет происходить разрушение выступа:

$$|P_{zk}| = \frac{\pi \lambda_1 c d \sqrt{E \gamma}}{K_d \sqrt{\ell_t} \left[ \left( \frac{2y(Z_1 + Z_2)}{c^2} - \frac{P_y}{P_z} \right) \right] \left[ \left( \frac{4yZ_1}{c^2} - \frac{P_y}{P_z} \right) \right]}, \quad (3)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент ( $\lambda_1=0,798$ );  $\gamma = K \lambda r_0 / 6\mu$ ,  $H/M$  ( $K = E / 3(1 - 2\nu)$ ,  $H/M^2$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $r_0$  – расстояние атомов, м;  $\lambda$ ,  $\mu$  – коэффициенты для кубического кристаллографического строения,  $\lambda=1$ ,  $\mu=6$ );  $\ell_t$  – длина трещины, м.

На основании расчетов по формуле (3) при правке шлифовальных кругов 24A12CM17K5 и ЛО12СМ1К5 алмазным роликом АС15 250/200 М1 (для алмаза  $E = 90 \cdot 10^{10}$   $H/M^2$ ;  $\nu = 0,42$ ;  $r_0 = 1,54 \cdot 10^{-10}$  м;  $K = 18,75 \cdot 10^{11}$   $H/M^2$ ;  $\gamma = 8$   $H/M$ ;  $K_{1c} = 37,9 \cdot 10^5$   $H/M^{3/2}$ ; для эльбора  $E = 72 \cdot 10^{10}$ ;  $\nu = 0,427$ ;  $r_0 = 1,56 \cdot 10^{-10}$ ;  $K = 16,1 \cdot 10^{11}$ ;  $\gamma = 7,1$ ;  $K_{1c} = 31,9 \cdot 10^5$ ; для электрокорунда  $E = 35 \cdot 10^9$ ;  $\nu = 0,42$ ;  $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-10}$ ;  $K = 7,3 \cdot 10^{11}$ ;  $\gamma = 0,8$ ;  $K_{1c} = 7,4 \cdot 10^5$ ) определены критические разрушающие силы в зависимости от расстояния  $y$  трещины от вершин режущего выступа и длины  $\ell$ . Так, при длине трещины  $\ell = 1$  мкм с увеличением  $y$  от 3...10 мкм разрушающая сила  $P_{zk}$  уменьшается от 0,8...0,012 Н (для алмазного зерна), 0,6...0,006 Н (для эльборового зерна) и 0,02...0,001 Н (для электрокорундового зерна).

При поперечном соударении силой  $P_z$  на выступ алмазного зерна критическую разрушающую силу можно определить следующим образом:

$$|P_{zk}| = K_{1c} J / (K_d y \sqrt{\pi \ell (Z_1 + Z_2) / 2}),$$

где  $J$  – момент инерции ( $J = dc^3/4$ ).

При продольном соударении силой  $P$  на алмазное зерно (рис.4) начальная трещина сдвига наклоняется под определенным углом (. Если трещина распространяется по направлению силы  $P$ , то сила, разрушающая выступ по отрывному  $P_{1k}$  и по сдвигу  $P_{11k}$ , будет

$$|P_{IK}| = \sqrt{\pi l_2} FK_{IC} / 2K_d l_1 h_1; |P_{IIK}| = \sqrt{\pi l_2} qFK_{IC} / 2K_d l_1 h_2,$$

где  $2l_1$  – длина наклонной трещины;  $2l_2$  – длина прямолинейной трещины;  $h_1, h_2$  – параметры, зависящие от угла наклона трещины и от коэффициента трения;  $q=K_{IIc}/K_{Ic}$ .

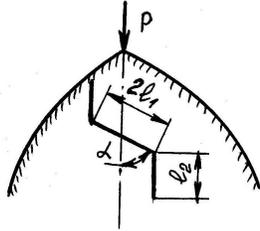


Рис.4. Схема продольного соударения силой P на выступ алмазного зерна

Экспериментальные исследования в условиях микрорезания с использованием специальной державки с разными углами  $\beta$  наклона большой оси зерна к нормали поверхности ШК показали, что при  $\beta = 0$  (поперечном соударении на алмазное зерно) линейный износ алмаза получается в 1,5 раза больше, чем при  $\beta=45^\circ$  (косом соударении), т.е. при  $\beta=0$  алмаз разрушается быстрее и легче, что и вытекает из полученных теоретических формул. Принимая связки AP и ШК однородными, аналогичным образом определяется критическая разрушающая сила их выступов.

Износ алмазных зерен ролика можно уменьшить с помощью их ориентации. Установлено, что за счет увеличения прочности алмазных зерен при увеличении угла между осью алмазного зерна и нормалью ролика хрупкое разрушение зерен можно уменьшить в 1,4 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников А.Н. Теплофизика резания. -М.: Машиностроение, 1969. - 288 с.
2. Брок Д. Основы механики разрушения.- М.: Высшая школа, 1980. - 396 с.

Ассоциация по природному камню РА. Материал поступил в редакцию 19.06.2000.

#### Մ.Ա. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

#### ՈՒՂՂՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՀՊՄԱՆ ՄԻ ՇԱՐՔ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Հիմնավորվել են պիմաստե գրտնակի և հղկաքարի կտրող մակերևույթների ելունների տարաբարձրությունների բաշխվածության օրինաչափությունները: Ստացվել են կտրող ելունների քանակի, նրանց հավանական հպումների քանակի, ելունների քայքայման սահմանային ուժերի որոշման բանաձևեր: Հիմնավորվել են կողմնորոշված պիմաստե հատիկներով գրտնակների առավելություններն ու շահավետությունը:

#### M.A. GRIGORYAN

#### SOME DRESSING PROCESS PECULIARITIES OF GRINDING WHEELS

A diverse altitude law of a diamond roller and grinding wheel cutting surface bulges is established. Formulas are obtained for determination of: the amount of cutting bulges on different levels of the tool profile, the amount of probable contacting grains; contact spot area; critical breaking force of the bulge. Advantages and effectiveness of using diamond rollers with oriented diamond grains are shown.

А.С. ПЕТРОСЯН

**МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ЭКСТРУЗИЕЙ**

В соответствии с теорией пластичности пористых тел осуществлена обработка результатов испытаний пористых композиционных материалов на одноосное сжатие. Построены диаграммы деформирования, на основе которых получено аналитическое решение задачи уплотнения пористого композиционного материала, армированного нитевидными волокнами. Располагая результатами испытаний пористых материалов, можно с большой точностью оценить механические свойства аналогичного компактного материала.

**Ключевые слова:** теория пластичности, одноосное сжатие, композиции, диаграммы деформирования, металлические волокна.

Как известно [1, 2], выбор окончательной деформационной обработки композиционных материалов зависит не только от массы и геометрических размеров получаемых изделий из них, но и от механических свойств пористых заготовок, подвергаемых экструзии, а следовательно, от напряженно-деформированного состояния в процессе уплотнения.

В основу теории пластичности пористых сред положено условие, что пористая среда представляет собой структурно-некомпактное изотропное тело, включающее пустоты сферической формы [1]. В практике порошковой металлургии такое определение характерно для спеченных материалов с пористой структурой. В этой связи для анализа напряженно-деформированного состояния пористых материалов при сжатии используем теорию пластичности пористых тел, которая базируется на следующих зависимостях [3]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\beta^{n+0,5}} \left( \frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} + 9\alpha^m \sigma_0^2 \right)^{1/2},$$

$$d\bar{\varepsilon}_{\text{экв}} = \beta^{2n-0,5} \left( \frac{2}{3} de_{ij} de_{ij} + \frac{d\varepsilon_0^2}{\alpha^m} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3d\bar{\varepsilon}_{\text{экв}}}{2\sigma_{\text{экв}}\beta^{3n}} \left[ \sigma_{ij} - (1 - 2\alpha^m)\delta_{ij}\sigma_0 \right],$$

$$dv = \frac{9\alpha^m(1-v)d\bar{\varepsilon}_{\text{экв}}\sigma_0}{\beta^{3n}\sigma_{\text{экв}}},$$

где  $\sigma_{\text{экв}}$  - эквивалентное напряжение;  $d\bar{\varepsilon}_{\text{экв}}$  - эквивалентное приращение пластической деформации;  $de_{ij}$ ,  $d\varepsilon_{ij}$ ,  $S_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  - соответственно компоненты девиаторов и тензоров приращений пластических деформаций и напряжений;  $\sigma_0(\delta_{ij}\sigma_{ij})/3$  - среднее напряжение;  $d\varepsilon_0 = (\delta_{ij}d\varepsilon_{ij})/3$  - приращение

средней деформации;  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера;  $m, n$  - параметры относительной пористости  $v$ ;  $\alpha, \beta$  - функции пористости, определяемые [1]:

$$\alpha = 1/4 \left[ \frac{3(1-v^{1/3})}{(3-2v^{1/4}) \ln v} \right]^2, \quad \beta = \left[ \frac{3(1-v^{1/3})}{3-2v^{1/4}} \right]^2. \quad (2)$$

Определение параметров ( $m, n$ ) и построение диаграммы деформирования [2] производится по результатам испытаний пористых цилиндрических образцов на одноосное сжатие (рис. 1). В этом случае главные напряжения:  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\sigma$ , где  $\sigma = P/F$  - осевое напряжение (давление прессования);  $P, F$  - соответственно текущая сжимающая сила и площадь поперечного сечения заготовки.

Следовательно, в случае одноосного напряженного состояния зависимости (1) примут вид

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \frac{\sqrt{1 + \alpha^m}}{\beta^{n+0,5}} \sigma, \quad (3)$$

$$d\bar{\varepsilon}_{\text{эКВ}} = \frac{\beta^{2n-0,5}}{\sqrt{1 + \alpha^m}} d\varepsilon, \quad (4)$$

$$dv = -\frac{3\alpha^m(1-v)}{1 + \alpha^m} d\varepsilon, \quad (5)$$

где  $d\varepsilon$  - приращение осевой пластической деформации;  $\varepsilon = \ln(h_0/h)$  - осевая пластическая деформация;  $h_0, h$  - соответственно начальная и текущая высоты заготовок.

С использованием теории пластичности пористых тел обработаны результаты испытаний на одноосное сжатие и построены диаграммы деформирования ( $\sigma_{\text{эКВ}} - \int d\bar{\varepsilon}_{\text{эКВ}}$ ), на основе которых получены приближенные решения процессов уплотнения пористых композиционных материалов в жестких матрицах.

Этим путем можно решать аналогичные технологические задачи, связанные с обработкой пористых материалов давлением, применяемые в практике порошковой металлургии.

Принятая методика получения пористых заготовок из армированных композиционных материалов заключалась в следующем. Шихту из смеси металлического порошка-матрицы и произвольно ориентированных дискретных волокон подвергали статическому прессованию, а затем спеканию в среде водорода. Таким образом, при температурах  $900^\circ\text{C}$  (<Cu - Mo>) и  $1100^\circ\text{C}$  (<Fe - сталь 55>, <Fe - Mo>) и продолжительности  $\tau = 1,5$  ч получали спеченные пористые цилиндрические заготовки с  $h_0/d_0 = 1,4$  ( $d_0 = 10,2$  мм), которые испытывали на одноосное сжатие. По результатам испытаний построены диаграммы сжатия (рис. 1-4).

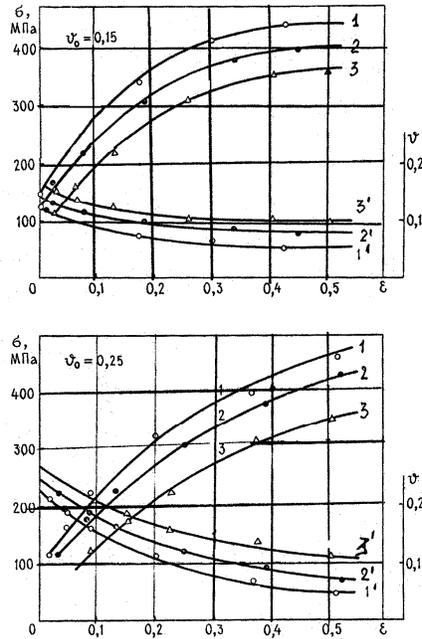


Рис. 1. Диаграммы сжатия и изменения пористости для цилиндрических заготовок из композиции <Cu – Mo> при различных соотношениях  $l/d$  :  
 1 – 80; 2 – 40; 3 – 120; 1, 2, 3 – в координатах  $(\sigma - \epsilon)$ ;  
 1', 2', 3' – в координатах  $(\nu - \epsilon)$

Из (5) видно, что на изменение пористости оказывает влияние только коэффициент  $m$ . Следовательно, экспериментально определяя кривую изменения пористости  $(\nu - \epsilon)$ , по формуле (5) можно найти значения  $m$ . Для этого, зная начальную относительную пористость материала  $\nu_0$  и приращение осевой пластической деформации  $d\epsilon$ , а также задавая значения  $m$  ( $0,05 \leq m \leq 1,5$ ) с шагом 0,05, по (5) строим семейство кривых  $(\nu - \epsilon)$ . Взятый диапазон значений  $m$  обосновывается данными [1], где  $m = 1$ . Параметр пористости  $m$  находим из условия совпадения кривых  $(\nu - \epsilon)$ , построенных (вычисленных) по (5), с соответствующими экспериментальными кривыми (рис. 1-4). Результаты обработки опытных данных на ЭВМ показали, что для всех исследуемых композиций  $m = 0,75$  [4].

Параметр  $n$  определяли по методике [2]. Сущность ее заключается в следующем. Используя истинную диаграмму сжатия  $(\sigma - \epsilon)$  заготовок с различной начальной пористостью и найденный параметр  $m = 0,75$ , а также задаваясь значениями  $n$  ( $0,05 \leq n \leq 1,0$ ) с шагом 0,05, по формулам (3) и (4) вычисляли  $\sigma_{\text{экв}}$  и  $\int d\bar{\epsilon}_{\text{экв}}$  и строили семейство кривых  $(\sigma_{\text{экв}} - \int d\bar{\epsilon}_{\text{экв}})$ . Диаграмме деформирования материала соответствует

такое значение параметра  $n$ , при котором кривые деформирования заготовок с различной начальной пористостью совпадут друг с другом, т.е. в этом случае диаграмма деформирования не будет зависеть от пористости материала. Для композиции <Cu - Mo> получено  $n = 0,85$ , а для <Fe - Mo> и <Fe - сталь 55>  $n = 0,5$  и  $0,7$ .

Диаграммы сжатия в координатах  $(\sigma - \varepsilon)$ , построенные по результатам испытаний пористых заготовок из исследуемых композиций, приведены на рис. 4 (кривые 1, 2). Как и следовало ожидать, для всех композиций кривые  $(\sigma - \varepsilon)$  с меньшей исходной пористостью (кривая 1) располагаются выше кривых с большей исходной пористостью (кривая 2). С уменьшением пористости заготовок кривые сжатия располагаются ближе к предельному уровню и стремятся к диаграмме деформирования (рис. 4, кривая 3) компактного материала, т.е. когда пористость стремится к нулю.

На рис. 1 и 4 показаны осредненные диаграммы сжатия (кривые 1, 2, 3) и обобщенные диаграммы деформирования для композиций <Cu - Mo> (рис. 2, 3), которые в пределе стремятся к кривым 4 и 5, отвечающим состоянию материала с нулевой пористостью. Это подтверждает пригодность теории пластичности пористых тел применительно к композиционным материалам, а также правильность поставленных нами экспериментов.

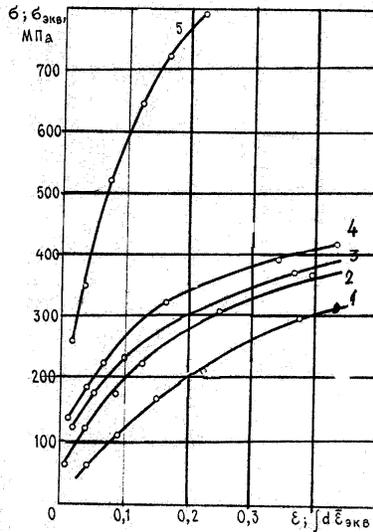


Рис.2. Обобщенная диаграмма деформирования пористых цилиндрических заготовок из композиции <Cu - Mo>:

1, 2, 3, 4 - в координатах  $(\sigma - \varepsilon)$ ; 5 - в координатах  $(\sigma_{\text{экв}} - \int d\varepsilon_{\text{экв}})$ .

1 - ( $\nu_0 = 0,25$ ); 2 - ( $\nu_0 = 0,19$ ); 3 - ( $\nu_0 = 0,16$ ); 4 - ( $\nu_0 = 0,14$ )

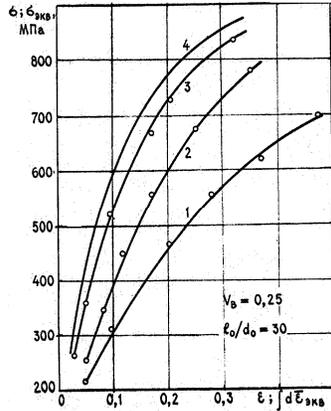


Рис.3. Диаграммы сжатия и деформирования композиционного материала (<Cu – Mo>), экструдированного при различных степенях обжата:  $\lambda = 1,5$  (1),  $3,0$  (2),  $6,0$  (3);  $n = 6$  (1),  $3$  (2),  $0\%$  (3);  $t_s = 840 \dots 860^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 60^\circ$ ,  $\nu_B = 0,25$ ,  $l_0/d_0 = 30$ . 1, 2, 3 - в к оординатах  $(\sigma - \varepsilon)$ ; 4 - в координатах  $(\sigma_{\text{экв}} - \int d\varepsilon_{\text{экв}})$

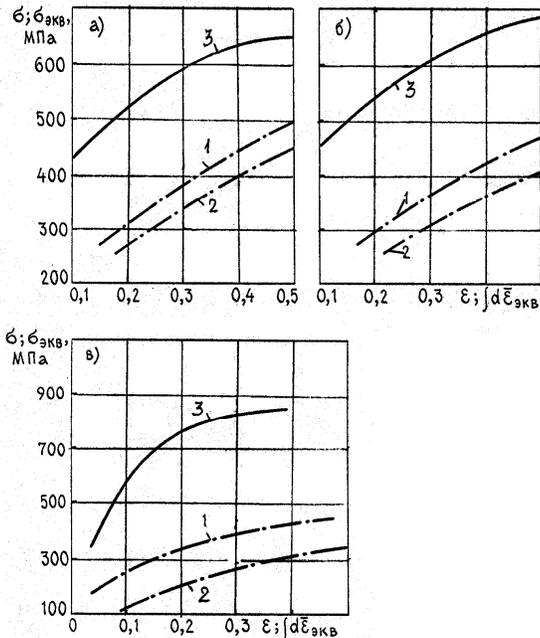


Рис.4. Диаграммы сжатия и деформирования композиционных материалов при различных исходных пористостях:

а - <Fe – сталь 55>,  $\nu_B = 20$  об.%; б - <Fe - Mo>,  $\nu_B = 20$  об.%;  
 в - <Cu - Mo>,  $\nu_B = 25$  об.%;  
 во: (а) 1 - 0,17; 2 - 0,22; (б) 1 - 0,2; 2 - 0,25;  
 (в) 1 - 0,15, 2 - 0,25

Таким образом, экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния пористых тел при сжатии (рис. 1-4) показывают, что, располагая этими данными, а также результатами предварительных испытаний пористых материалов, можно с большой точностью оценить механические свойства аналогичного компактного материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грин Р.Дж.** Теория пластичности пористых тел // В сб. Механика. – 1973. – <sup>1</sup> 4. – С. 109 - 120.
2. **Копьев И.М., Овчинский А.С.** Разрушение металлов, армированных волокнами. – М.: Наука, 1977. – 240 с.
3. **Петросян Г.Л., Петросян Х. Л., Погосян М. З.** Методы построения диаграмм деформирования пористого материала испытанием плоских образцов // Порошковая металлургия. – 1979. – <sup>1</sup>11. – С. 69 – 74.
4. **Манукян Н.В., Петросян Г.Л., Минасян Б.Ц., Петросян А.С.** Исследование напряженно-деформированного состояния пористых композиционных материалов при сжатии // Порошковая металлургия. – 1982. – <sup>1</sup> 1. – С. 84 – 88.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 05.03.2001.

Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԷՔՍՏՐՈՒԶԻԱՅՈՎ ԱՄՐԱՑՎԱԾ ԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱՆ

Ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության տեսության համաձայն կատարվել են ծակոտկեն կոմպոզիցիոն նյութերի միաառանցք սեղման փորձարկումներ: Կառուցվել են դեֆորմացիայի դիագրամներ, որոնց հիման վրա ստացվել է թելանման մետաղալարերով ամրանալորված ծակոտկեն կոմպոզիցիոն նյութերի ամրացման խնդրի վերլուծական լուծումը: Հիմքում ունենալով ծակոտկեն նյութերի փորձարկումների արդյունքները, մեծ ճշգրտությամբ կարելի է գնահատել համանման կոմպակտ նյութերի մեխանիկական հատկությունները:

**H.S. PETROSSYAN**

### **EXTRUDED COMPOSITE BODY DEFORMATION MECHANICS**

In conformity with porous body plasticity theory, porous composites are tested in single-axis compression and test results are analysed. With the help of deformation diagrams, an analytical solution is found for the consolidation problem of metal-fibre reinforced porous composites. The porous material test results can make a basis for precise mechanical property evaluation of similar compact material.

Հ.Ա. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԼԵԳԻՐՈՂ ՏԱՐԴԵՐԻ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՊՂՆՁԻ  
ՀԱՄԱԶՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ

ՀԵՂՈՒԿԱՀՈՍՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ

Ուսումնասիրվել են սակավալեգիրված պղնձի համաձուլվածքների հեղուկահոսունության վրա լեգիրող տարրերի առանձին և համատեղ ազդեցությունները: Կատարված հետազոտությունների հիման վրա ընտրվել է օպտիմալ ֆիզիկա-մեխանիկական և ձուլման հատկություններով օժտված պղնձի համաձուլվածք:

**Առանցքային բառեր:** հեղուկահոսունություն, լեգիրող տարր, դենդրիտ, ձուլվածք:

Ձուլվածքի որակն առաջին հերթին գնահատվում է նրա երկրաչափական չափերի ճշտությամբ, իսկ բարձր ֆիզիկա-մեխանիկական հատկություններով օժտված ձուլվածքների ստացումը պայմանավորված է համաձուլվածքի քիմիական բաղադրությամբ: Բարդ ձևավոր ձուլվածքների ստացման համար անհրաժեշտ է, որ մետաղական հալույթն ամբողջությամբ լրացնի ձուլաձևի խոռոչը և ճիշտ վերարտադրի նրա ներքին ուրվագծերը:

Ձուլաձևի խոռոչում հալույթի հոսքը միշտ ուղեկցվում է նրա սառեցումով: Լիկվիդուսի ջերմաստիճանից ցածր ջերմաստիճաններում հալույթում առաջանում են բյուրեղներ, որոնց աճի դեպքում հոսքի արագությունը նվազում է, իսկ այնուհետև՝ դադարում: Ձուլաձևի լրացման հնարավորությունը սահմանափակված է ժամանակում, որի ընթացքում հալույթը գտնվում է հեղուկ կամ հեղուկ-պինդ վիճակներում և պահպանում է հոսունությունը: Համաձուլվածքի հոսունությունը բնորոշվում է առաջին հերթին նրա բյուրեղացման առանձնահատկություններով: Բյուրեղացման մեծ միջակայք ունեցող համաձուլվածքները պնդանում են՝ առաջացնելով ճյուղավորված դենդրիտներ, որոնք աճում են սառեցման մակերևույթին ուղղահայաց, այսինքն՝ լցանային ակոսների ընդլայնական կտրվածքով: Այս դեպքում ակոսի կտրվածքը փոքրանում է և հալույթի հոսքը դժվարանում է: Հետևաբար, այսպիսի համաձուլվածքներն ավելի վատ են լրացնում ձուլաձևը, քան մաքուր մետաղները և այն համաձուլվածքները, որոնք բյուրեղանում են հաստատուն ջերմաստիճաններում՝ առաջացնելով կոմպակտ ձևի բյուրեղներ:

Ձուլաձևի լրացումից բացի կարևոր է նաև ձուլվածքի վերարտադրման ճշտությունը, որը կախված է հիմնականում մակերևութային լարվածությունից, որքան այն մեծ է, այնքան դժվար է ապահովել ձուլվածքի ճիշտ ուրվագծերը:

Ձուլաձևի խոռոչում հեղուկ համաձուլվածքի լրացումը բարդ գործընթաց է և բնորոշվում է երեք խմբի գործոններով՝

- ա) համաձուլվածքի հատկությունը,
- բ) ձուլաձևի հատկությունը,
- գ) ձուլաձևի լրացման պայմանները:

Եթե կայունացվեն վերջին երկու խմբերի գործոնները, ապա ձուլածևի լրացվելիությունը ամբողջությամբ կախված կլինի համաձուլվածքի հատկություններից, որոնցից առավել կարևոր է հեղուկահոսունությունը:

Հեղուկահոսունությունը հալված վիճակում մետաղի կամ համաձուլվածքի՝ ձուլվածքային խոռոչը լրացնելու, ձուլվածքի արտաքին ու ներքին ուրվագծերը ճիշտ վերարտադրելու ընդունակությունն է: Լավ հեղուկահոսունությունն ապահովում է բարձր որակի, խիտ կառուցվածքով ձուլվածքների ստացումը, զազային ու կծկվածքային խոռոչների նվազեցումը, ինչպես նաև բոլոր տեսակի ծակոտկենությունների, թերլցումների և այլ արատների առաջացման վտանգի փոքրացումը:

Համաձուլվածքի՝ ձուլածև լրացնելու ընդունակությունը բնորոշվում է նրա շարժունակությամբ: Շարժունակությունը բնորոշ է համաձուլվածքին ոչ միայն այն դեպքում, երբ այն գտնվում է հեղուկ վիճակում, այլև այն ժամանակ, երբ բյուրեղացումը սկսվել է, բայց առաջացած բյուրեղները արգելք չեն հանդիսանում հեղուկի հետագա շարժման համար:

Էլեկտրատեխնիկական արդյունաբերությունում զգալի է անհրաժեշտ ֆիզիկա-մեխանիկական հատկություններով և բարձր էլեկտրահաղորդականությամբ օժտված ձուլվածքների պահանջարկը:

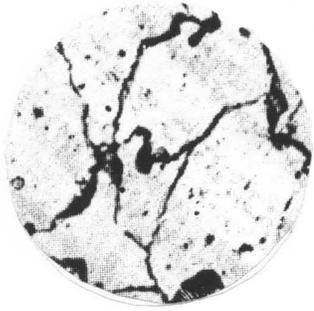
Ինչպես հայտնի է, մաքուր պղինձն օժտված է բարձր էլեկտրա- և ջերմահաղորդականությամբ, սակայն նրանից անհնար է ստանալ որակյալ ձուլվածքներ, քանի որ ունի ցածր հեղուկահոսունություն, բարձր կծկվածք, ցածր ճաքակայունություն և այլն:

Աշխատանքի նպատակն է՝ բարձրացնել պղնձի հիմքով համաձուլվածքների հեղուկահոսունությունը՝ չնչին քանակով լեգիրող տարրերի ներմուծումով:

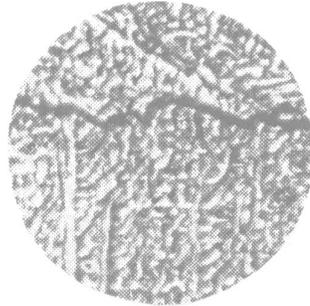
Լեգիրող տարրերի ընտրությունը կատարելիս առաջնորդվել ենք հետևյալ դրույթներով՝

- դրանք պետք է լավ լուծվեն պղնձում,
- լուծման արգասիքները պետք է հեշտ հեռացվեն մթնոլորտ կամ խարամ,
- լեգիրող տարրերի մնացորդները չպետք է ազդեն պղնձի էլեկտրահաղորդականության վրա:
- դրանք պետք է նպաստեն պղնձի ձուլման և մեխանիկական հատկությունների բարձրացմանը:

Պղնձի ձուլման և ֆիզիկա-մեխանիկական հատկությունների լավացման համար նախկին հետազոտություններում որպես լեգիրող տարրեր ընտրել ենք Mg, Cd, Se, Te, Ca և Al՝ մինչև 1,0% պարունակությամբ: Պարզվել է, որ սելենը պղնձի հետ առաջացնում է Cu<sub>2</sub>Se փխրուն քիմիական միացություն, որը տեղաբաշխվում է հատիկի սահմաններում, որի հետևանքով համաձուլվածքի մեխանիկական հատկությունները նվազում են, իսկ այլումինը բացասական ազդեցություն է թողնում պղնձի էլեկտրահաղորդականության վրա և զգալիորեն իջեցնում է համաձուլվածքի ճաքակայունությունը: Վերոհիշյալ արատները պարզ երևում են նկ. 1-ում բերված միկրոկառուցվածքներում: Հետևաբար, Se-ի և Al-ի օգտագործումը սակավալեգիրված պղնձի համաձուլվածքների ստացման համար այնքան էլ նպատակահարմար չէ:



ա) Cu+ 0,25% Se (x 100);



բ) Cu+ 0,4% Al (x 100)

Նկ.1. Պղնձի համաձուլվածքների միկրոկառուցվածքը

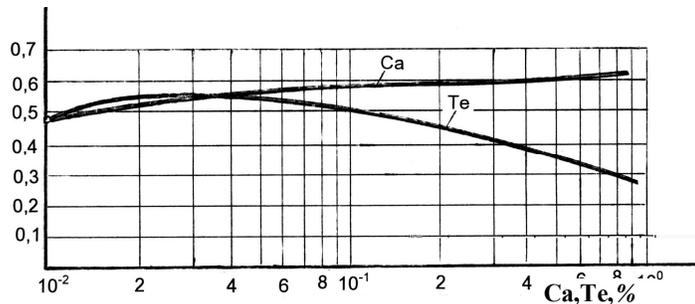
Մաքուր պղնձի տեսակարար էլեկտրական դիմադրությունը 20°C-ում կազմում է 0,017241 Օհմ·մմ<sup>2</sup>/մ, իսկ մինչև 1,0% կադմիումի ներմուծումը մեծացնում է պղնձի էլեկտրական դիմադրությունը ընդամենը 5%-ով, այսինքն՝ պղնձի էլեկտրահաղորդականության վրա, որը կազմում է 58,0·10<sup>-6</sup> 1/Օհմ·մ, այն համարյա չի ազդում:

Մինչև 1,0% լեգիրող տարրեր պարունակող պղնձի համաձուլվածքների հեղուկահոսունությունը որոշել ենք մետաղական պարուրաձև, 0,56 սմ<sup>2</sup> սեղանաձև ընդլայնական կտրվածքով տեխնոլոգիական նմուշի օգնությամբ:

Լեգիրող տարրերը բովախառնուրդի մեջ ենք ներմուծել համապատասխան լիգատուրների ձևով: Հայումը կատարել ենք ինդուկցիոն վառարանում, գրաֆիտե տիգելներում, պաշտպանիչ շերտի տակ: Համաձուլվածքի փորձարկման պայմանները, այդ թվում ձուլաձևի ջերմաստիճանը, մետաղաստատիկ էջքը, լցման ջերմաստիճանը, սառեցման տևողությունը և այլն, պահպանվել են նույնը: Լցումը կատարել ենք T=1180 °C-ում՝ յուրաքանչյուր համաձուլվածքից ստանալով առնվազն երեք նմուշ: Մետաղական ձուլաձևում ստացված ձողիկների երկարությամբ էլ որոշվել է համաձուլվածքի հեղուկահոսունությունը:

Հետազոտության արդյունքներն արտահայտված են «հեղուկահոսունություն – բաղադրություն» դիագրամով (նկ.2):

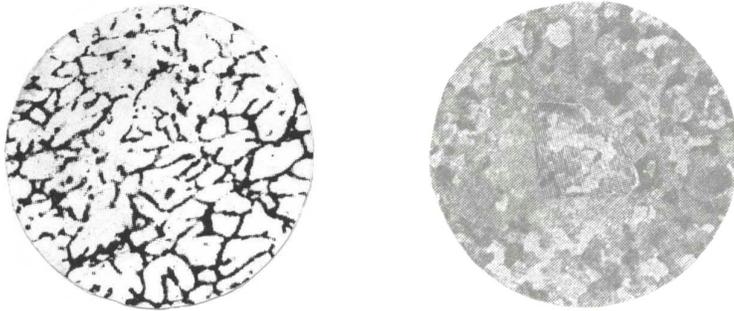
λ, մ



Նկ.2. Հեղուկահոսունության կախվածությունը համաձուլվածքի բաղադրությունից

Դիագրամից երևում է, որ մինչև 0,02% թելուր պարունակող պղնձի համաձուլվածքների հեղուկահոսունությունը կտրուկ աճում է, իսկ այնուհետև մոնոտոն նվազում, ինչը պայմանավորված է բյուրեղացման միջակայքի առկայությամբ:

Կալցիումը դրական ազդեցություն է թողնում պղնձի հեղուկահոսունության վրա: Մինչև 0,85%Ca պարունակող պղնձի համաձուլվածքների համար հեղուկահոսունությունը 0,47 մետրից աճում է մինչև 0,63 մ: Սա բացատրվում է նրանով, որ Cu-Ca համաձուլվածքներում առկա են առանձին մանրահատիկ բյուրեղներ, որոնք հալույթի հետ ազատ տեղաշարժվում են և չեն խանգարում նրա շարժունակությանը, այսինքն նպաստում են հեղուկահոսունության բարձրացմանը (նկ. 3):



ա) Cu + 0,6% Ca (x 100);      բ) Cu + 0,08% Mg + 0,45% Cd (x 100)  
Նկ.3. Նմուշների միկրոկառուցվածքը

Նախկին հետազոտություններից պարզվել է, որ  $T=1180$  (C ջերմաստիճանում լցնելու դեպքում Cu+0,2%Cd Cu+0,15%Mg համաձուլվածքների հեղուկահոսունությունը համապատասխանաբար կազմել է 0,52 և 0,55 մ: Աշխատանքում ուսումնասիրվել է Cd-ի և Mg-ի համատեղ ազդեցությունը պղնձի հեղուկահոսունության վրա: Այս դեպքում ամենաբարձր հեղուկահոսունությամբ օժտված է Cu+0,08%Mg+0,45% Cd համաձուլվածքը ( $\lambda = 0,6$  մ), իսկ Cu+0,4% Mg+0,32%Cd համաձուլվածքի դեպքում հեղուկահոսունությունը, մաքուր պղնձի հեղուկահոսունության հետ համեմատած, փոքրանում է մոտ երեք անգամ: Սա բացատրվում է նրանով, որ որքան փոքր է համաձուլվածքի ջերմունակությունը և որքան մեծ է ջերմահաղորդականությունը, այնքան արագ է այն սառչում և, հետևապես, փոքր է նրա հեղուկահոսունությունը:

Այսպիսով, սակավ լեգիրված պղնձի համաձուլվածքների հեղուկահոսունության բարձրացման համար որպես լեգիրող տարր նպատակահարմար է օգտագործել կալցիումը, համաձուլվածքի զանգվածի 0,1...0,85% -ի չափով:

## ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Чурсин В.М.** Плавка медных сплавов. – М.: Metallurgia, 1982. – 152 с.
2. **Леви Л.И., Кантеник С.К.** Литейные сплавы. – М.: Высшая школа, 1967. – 435 с.
3. **Чуркин Б.С.** Теоретические основы литейных процессов. – Свердловск, 1991. – 200 с.
4. **Гуляев Б.Б.** Литейные процессы. – М.: Машиностроение, 1966. – 416 с.

ՀՊՃՀ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.20.2000.

*Г.А. КАРАПЕТЯН*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Исследовано отдельное и совместное влияние легирующих элементов на жидкотекучесть малолегированных медных сплавов. На основании проведенных исследований выбран медный сплав, обладающий оптимальными физико-механическими и литейными свойствами.

*G.A. KARAPETYAN*

### STUDIES OF DOPING ELEMENT INFLUENCE ON COPPER FLUIDITY

Separate and joint doping element influence on low doping copper alloy fluidity is investigated. Based on studies carried on, a copper alloy having optimum physical-mechanical and foundry properties is chosen.

Г.А. АДИЛХАНИЯН, А.Г. АДИЛХАНИЯН

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ И СКЛОНОВ**

*Описывается новый метод расчета устойчивости грунтовых откосов и склонов, применяемый для произвольных поверхностей сдвига, разнородных грунтовых массивов, активных сил произвольного направления и состава. В основу метода заложена гипотеза о переменности угла наклона сил взаимодействия между фрагментами.*

**Ключевые слова:** *устойчивость откосов, коэффициент запаса, наклонные силы взаимодействия, метод расчета, гипотеза об угле наклона.*

Существующие методы расчета устойчивости грунтовых откосов основаны на модели отвердевшей и расчлененной (фрагментированной, состоящей из нескольких взаимодействующих твердых тел) призмы обрушения.

В заранее выбранной призме обрушения, подлежащей расчету, из-вестны: геометрия призмы и фрагментов, в т.ч. углы наклона подошвы фрагментов; векторы активных сил; расчетные (действительные  $\varphi_p$ ,  $c_p$ ) прочностные параметры грунтов на поверхности сдвига. Неизвестными являются: распределение нормальных напряжений по поверхности сдвига; величина, точка приложения и направление сил взаимодействия между фрагментами; величина мобилизованных на поверхности сдвига сил сопротивления (сил трения и сцепления) сдвигу. Если нормальные напряжения и векторы сил взаимодействия после выдвигания гипотезы относительно одного из их параметров могут быть определены из уравнений равновесия, то мобилизованные на поверхности сдвига силы сопротивления определяются только для случая предельного равновесия всей призмы обрушения, при котором в каждой точке поверхности сдвига наступает состояние, сопротивление сдвигу которого определяется формулой Кулона - Мора:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $\varphi$ ,  $c$  – прочностные параметры грунта, соответствующие предельному состоянию.

Однако рассчитываемая призма обрушения в действительности будет находиться или в состоянии допредельного равновесия, для которого не применима формула (1), или в состоянии движения, для которого не применимы уравнения статики. Разрешимость задачи обеспечивается сопоставлением параметров действительного состояния призмы обрушения с параметрами ее предельного состояния. Для этого применяется схема приведения призмы в предельное состояние, заключающаяся в изменении прочностных параметров грунта до получения предельного состояния призмы обрушения. Коэффициент запаса устойчивости призмы находится как отношение действительных параметров призмы к измененным:

$$k = \varphi_p / \varphi = c_p / c \text{ или } k = \operatorname{tg} \varphi_p / \operatorname{tg} \varphi = c_p / c. \quad (2)$$

Разнообразие методов расчета обусловлено различием гипотез, применяемых разными авторами для разрешения статической неопределенности задачи. Среди методов расчета устойчивости, основанных на вышеуказанной модели, следует выделить те, которые удовлетворяют уравнениям равновесия и граничным условиям предельного равновесия всей призмы обрушения. Таковыми являются методы Моргенштерна-Прайса (1965г.), Спенсера (1967, 1973, 1981гг.), Можевитинова (1970г.). Все три метода строги в отношении соблюдения уравнений равновесия и граничных условий, однако принятые в них допущения обладают определенными недостатками.

Допущение метода Моргенштерна-Прайса хоть и позволяет учесть переменность угла наклона сил взаимодействия, однако это носит характер волевого решения по причине необходимости выбора математической зависимости, который не связан с разнородностью грунта в призме обрушения, формой поверхности сдвига, величиной и направлением активных сил, прочностными параметрами грунта. Недостатками метода являются также необходимость оценки приемлемости вычисленных величин, введение новой функции при неприемлемости результатов и повтор счета. Для перевода задачи в разряд статически определимых в этом методе вводится допущение о зависимости между касательными (S) и нормальными (E) составляющими сил взаимодействия между фрагментами [2] в виде  $S=f(x)E$ . Функция  $f(x)$  принимается в виде или  $f(x)=\operatorname{const}$ , или полусину-соиды, или усеченной полусинусоиды, или трапецеидального распределения и т.д.

Гипотеза о постоянстве угла наклона сил взаимодействия, примененная в методах Спенсера и Можевитинова-Шинтемирова, не выдерживает критики. На угол наклона сил взаимодействия не могут не оказать влияние вектор активных сил, в самом общем случае переменный для разных фрагментов, форма поверхности сдвига, а также прочностные параметры на подошвах фрагментов. Эти зависимости просматриваются из уравнений статики, записанных для каждого фрагмента.

1. Сумма проекций всех сил на направление "n-n", нормальное подошве фрагмента ( $\Sigma F_n=0$ ):

$$\Sigma F_n = N_i - Q_i \cos(\alpha_i + \delta_i) + E_{i-1} \sin(\alpha_i - \beta_{i-1}) + E_i \sin(\alpha_i - \beta_i) = 0. \quad (3)$$

2. Сумма проекций всех сил на подошву фрагмента ( $\Sigma F_\alpha=0$ ):

$$\Sigma F_\alpha = Q_i \sin(\alpha_i + \delta_i) + E_{i-1} \cos(\alpha_i - \beta_{i-1}) - E_i \cos(\alpha_i - \beta_i) - N_i \operatorname{tg} \varphi_i - c_i \Delta s_i = 0. \quad (4)$$

3. Сумма моментов всех сил относительно центра подошвы фрагмента ( $\Sigma M_o=0$ ):

$$\Sigma M_o = Q_i b_i \sin \delta_i + M_{E_{i-1}} - M_{E_i} = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } M_{E_{i-1}} = E_{i-1} a'_{i-1} \cos \beta_{i-1}; \quad M_{E_i} = E_i a_i \cos \beta_i.$$

Здесь  $N_i$  - нормальная составляющая силы реакции на подошве фрагмента;  $Q_i$  - равнодействующая активных сил веса, внешнего воздействия,

фильтрационных, сейсмических сил и т. д.;  $\delta_i$  - угол ее наклона к вертикали;  $b_i$  - высота точки пересечения линии действия активной силы над подошвой;  $E_{i-1}, E_i$  - силы взаимодействия между фрагментами;  $\beta_{i-1}$  и  $\beta_i$  - углы наклона сил взаимодействия к горизонту;  $e_i$  - высота точки приложения сил от поверхности сдвига;  $a'_{i-1}$  и  $a_i$  - отрезок центральной вертикали от поверхности сдвига, отсекаемый линией действия сил взаимодействия;  $\varphi_i$  и  $c_i$  - критические прочностные параметры, в общем случае, переменные по длине поверхности сдвига.

Поверхность сдвига задается, следовательно, ( $i$  являются величинами заданными).

На рисунке представлена система сил, действующих на фрагменты.

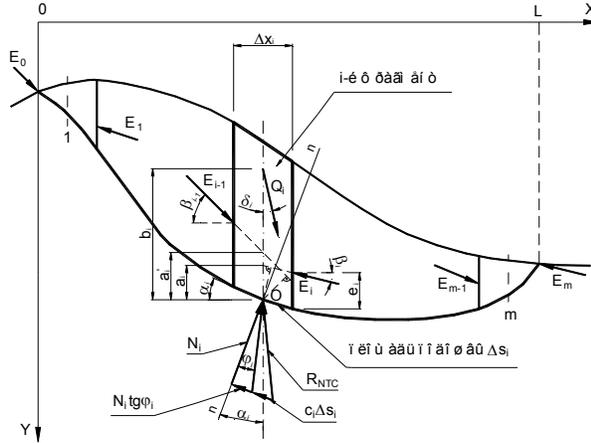


Рис.1. Схема к расчету устойчивости откосов (склонов)

Преобразования приводят к следующим формулам, в том числе рекуррентным:

- нормальная составляющая реакции подошвы:

$$N_i = Q_i \cos(\alpha_i + \delta_i) + E_i \sin(\alpha_i - \beta_i) - E_i \sin(\alpha_i - \beta_{i-1}); \quad (6)$$

- сила взаимодействия на боковой грани фрагмента:

$$E_i = \frac{\Delta T_i \cos \varphi_i + E_{i-1} \cos(\alpha_i - \varphi_i - \beta_{i-1})}{\cos(\alpha_i - \varphi_i - \beta_i)}, \quad (7)$$

где

$$\Delta T_i = \frac{Q_i \sin(\alpha_i + \delta_i - \varphi_i) - c_i \Delta s_i \cos \varphi_i}{\cos \varphi_i};$$

- момент силы взаимодействия относительно центра подошвы фрагмента:

$$M_i = E_i a_i \cos \beta_i = Q_i b_i \sin \delta_i + E_{i-1} a'_{i-1} \cos \beta_{i-1}. \quad (8)$$

Отрезок центральной вертикали от поверхности сдвига, отсекаемый линией действия силы взаимодействия:

$$a_i = \frac{Q_i b_i \sin \delta_i + E_{i-1} a'_{i-1} \cos \beta_{i-1}}{E_i \cos \beta_i}, \quad (9)$$

и геометрические зависимости

$$\begin{aligned} e_i &= a_i + 0,5\Delta x_i (\operatorname{tg}\alpha_i - \operatorname{tg}\beta_i), \\ a'_{i-1} &= a_{i-1} + (y_i - y_{i-1}) - 0,5(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})\operatorname{tg}\beta_{i-1} \end{aligned} \quad (10)$$

определяют положение точек приложения сил взаимодействия.

Каждый фрагмент призмы обрушения должен удовлетворять вышеприведенным уравнениям, что является необходимым, но недостаточным условием предельного равновесия всей призмы обрушения. Эти уравнения могут соблюдаться как в предельном, так и в допредельном состояниях равновесия. Утверждать о наступлении состояния предельного равновесия призмы обрушения можно только в случае совместного соблюдения уравнений равновесия и равенства крайних сил взаимодействия и их моментов относительно центров подошвы концевых фрагментов нулю [1], т.е.

$$\text{при } x=0 - E_0=0, M_0=0 \text{ и при } x=L - E_m=0, M_m=0. \quad (11)$$

Действительно, поскольку силы взаимодействия являются реактивными, то отсутствие необходимости на крайних боковых поверхностях концевых фрагментов в реактивной силе и его моменте относительно центров подошвы концевых фрагментов является критерием наступления состояния предельного равновесия.

Таким образом, общее количество независимых неизвестных величин в расчлененной на  $m$  фрагментов призме обрушения составляет: величин  $N_i - m$ , величин  $E_i - m+1$ , углов наклона  $\beta_i - m-1$ , моментов  $M_i - m+1$ , прочностных параметров на поверхности сдвига  $\varphi_i - "1"$  и  $c_i - "1"$ , т.е. количество неизвестных составляет  $4m+3$ . Использование граничных условий (11) для первого и  $m$ -го фрагментов сокращает число неизвестных до  $4m-1$ . Так как количество уравнений равновесия фрагментов  $3m$ , то количество лишних неизвестных составляет  $m-1$ , что соответствует числу неизвестных углов наклона сил взаимодействия между фрагментами. Таким образом, степень статической неопределенности призмы обрушения равна  $m-1$ .

Разрешить статическую неопределенность может позволить гипотеза об угле наклона сил взаимодействия. Недостатком существующих методов расчета является суть принятых в них гипотез. Постоянство угла наклона позволило упростить выкладки и математически строго решить систему дифференциальных уравнений статики. Методы, учитывающие переменность угла наклона, задают зависимость этого угла функцией одной переменной, а именно, от абсциссы боковой поверхности фрагмента.

Предлагаемая гипотеза задает переменность угла наклона сил взаимодействия функцией, аргументами которой являются расчетные и исходные данные фрагментов, т.е. величины угла наклона диктуются параметрами каждого фрагмента, что более правдоподобно, чем постоянство угла, и нет необходимости выбора математической функции, обеспечивающей приемлемость результатов решения. Суть этой гипотезы отражается в следующей формуле:

$$\beta_i = k_\beta \operatorname{arctg} \left[ \frac{Q_i \cos(\alpha_i + \delta_i)}{\Sigma \Delta T_i} \right], \quad (12)$$

где  $Q_i \cos(\alpha_i + \delta_i)$  - составляющая активных сил по направлению нормали к подошве фрагмента;  $\sum \Delta T_i$  - сумма дефицитов несущей способности всех фрагментов до рассматриваемого (от 1 до  $i$ -го) без учета сил взаимодействия;  $k_\beta$  - неизвестный коэффициент пропорциональности.

Возможны также и другие более простые формулы, предполагающие прямую пропорциональность угла наклона сил взаимодействия от суммы угла наклона подошвы фрагмента, угла наклона активных сил и угла внутреннего трения на подошве фрагмента, т.е.

$$\beta_i = k_\beta \left\{ \alpha_i + \delta_i + \arctg \left[ \operatorname{tg} \varphi_i + \frac{c_i \Delta s_i}{Q_i \cos(\alpha_i + \delta_i)} \right] \right\} \text{ или } \beta_i = k_\beta (\alpha_i + \delta_i),$$

или  $\beta_i = k_\beta (\alpha_i + \delta_i + \varphi_i)$ , или  $\beta_i = k_\beta \rho$ , где  $0 < \rho \leq 90$ . (13)

Последняя формула реализует метод  $\beta = \text{const}$ . Наиболее правдоподобной является гипотеза (12).

Во всех вышеприведенных гипотезах содержится один постоянный (для всех  $\beta_i$ ) неизвестный коэффициент  $k_\beta$ , который подлежит определению в процессе решения задачи, т.е.  $m-1$  неизвестных  $\beta_i$  заменяются одним неизвестным  $k_\beta$ , что сокращает общее количество неизвестных задачи  $4m+3$  до  $3m+1$ . Таким образом, степень статической неопределимости задачи с учетом любой из формул (12)-(13) равна 1.

Для получения зависимости  $c=f(\varphi)$  или  $\varphi=f(c)$  один из прочностных параметров переводится в разряд задаваемых, и задача становится полностью статически определимой. Подстановка неизвестных критических прочностных параметров из (2) в вышеприведенные формулы переводит задачу в разряд статически определимых без необходимости получения зависимости  $c=f(\varphi)$  или  $c=f(\operatorname{tg} \varphi)$ , а прямым определением новой неизвестной - коэффициента запаса устойчивости - заменяются две неизвестные прочностные характеристики на одну.

Для определения коэффициента запаса призмы обрушения предварительно задаются величины  $k$  (например 1),  $k_\beta$  (например 0),  $E_0=0$  и  $M_0=0$ . По (2) определяются  $\varphi_i$  и  $c_i$  для каждого фрагмента, используя в случае разнородного строения поверхности сдвига по прочностным параметрам [3]. Далее по (7) вычисляются величины дефицитов  $\Delta T_i$  и сумм дефицитов несущей способности для всех фрагментов, а также определяются величины  $\beta_i$  по одной из формул (12)-(13) с последующим определением  $E_i$  по (7) и  $M_i$  по (8)-(10), если необходимо  $N_i$  по (6).

После этих вычислений определены величины  $E_m$  и  $M_m$  в первом приближении. Если их значения отличаются от нуля на величину меньшую, чем наперед заданная абсолютная погрешность ( $\varepsilon_E$  и  $\varepsilon_M$ ), то результат достигнут: текущие  $k$  и  $k_\beta$  и полученные при них другие параметры призмы обрушения являются решениями задачи. В противном случае, требуется обнуление величин  $E_m$  и  $M_m$  путем попеременного изменения текущих значений  $k$  и  $k_\beta$  и повторного производства вышеописанных вычислений при их новых значениях до достижения величин  $E_m$  и  $M_m$ , удовлетворяющих условиям  $|E_m| \leq \varepsilon_E$  и  $|M_m| \leq \varepsilon_M$ . Указанную процедуру поиска окончательных значений  $k$  и  $k_\beta$  можно производить,

например, с использованием метода хорд в комбинации с шаговым поиском участка корня функций  $E_m(k)$  и  $M_m(k_\beta)$ .

В качестве примера (рис.2) произведен расчет сухого однородного откоса высотой 60 м, крутизной 1:3 с горизонтальными поверхностями гребня и подошвы откоса. Удельный вес грунтового массива принят равным  $18,64 \text{ кН/м}^3$ . Поверхность сдвига принята круглоцилиндрической с радиусом 156 м и центром с ординатой, превышающей гребень откоса на 80 м, и приращением абсциссы от бровки гребня на 130 м в сторону откоса.

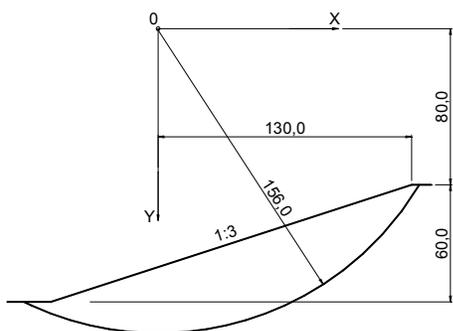


Рис.2. Расчетная схема примера

Для идентификации предлагаемый метод по гипотезе (12) в дальнейшем именуется методом суммарного дефицита несущей способности. Произведено сопоставление с гипотезой  $\beta = \text{const}$  Моргенштерна-Прайса, Спенсера и Можевитинова-Шинтемирова, а также с гипотезой полусинусоиды Моргенштерна-Прайса. Расчеты примера велись по формулам, приведенным в статье. Гипотеза  $\beta = \text{const}$  реализовывалась в виде  $\beta = 45k_\beta$ , а полусинусоида Моргенштерна-Прайса - в виде  $\beta = 45k_\beta \sin(\pi x/L)$ .

Для полноты сопоставления гипотез (методов) расчет устойчивости для одной и той же призмы обрушения произведен при трех значениях действительного угла внутреннего трения (15; 20; 45) с тремя значениями сцепления (0; 9,81; 29,43 кПа) для каждого из углов внутреннего трения. Для большей полноты сопоставления расчеты выполнены для случая действия не только вертикальных активных сил (интенсивность сейсмического воздействия  $0g$ ), но и сил, наклон к вертикали которых соответствует сейсмическим воздействиям интенсивностью 0,2 и 0,4g.

Результаты расчетов сведены в табл.1, в которую добавлены графы с шапкой  $k_{\text{slope}}$ , где приводятся данные той же самой призмы обрушения при тех же прочностных параметрах и тех же сейсмических воздействиях, что и для сопоставления гипотез, рассчитанных компьютерной программой SLOPE/W (GEO-SLOPE, Калгари, Канада) по тем же методам.

Для выяснения расхождения результатов по упомянутым трем методам выполнен расчет величины относительного отклонения результатов в процентах по отношению к методом суммарного дефицита несущей способности. Максимальные величины относительного отклонения результатов меньше 1%, что является практическим совпадением. Результаты расчета по программе SLOPE/W разнятся от результатов по методу суммарного дефицита несущей способности в третьем знаке после десятичной запятой, что соответствует величине относительного отклонения в пределах от 0 до 1,038%, что также является практическим совпадением, несмотря на несхожесть критериев

наступления предельного состояния программы SLOPE/W и предлагаемого метода.

Для полноты сопоставления выполнен расчет этой же призмы обрушения при одних и тех же исходных данных по методу отвердевшего монолитного отсека обрушения Тейлора-Како. Результаты также практически совпадают (табл.2).

Таблица 1

При значе- ниях		$\beta = k_{\beta} \arctg [Q \cos(\alpha + \delta) / \Sigma \Delta T]$		
		a=0g	a=0,2g	a=0,4g
$\Phi_d$	$C_d$	$k_1$	$k_1$	$k_1$
1	2	3	4	5
15	0	1,030	0,619	0,439
	9,81	1,113	0,669	0,474
	29,4	1,279	0,770	0,548
20	0	1,400	0,840	0,599
	9,81	1,483	0,891	0,635
	29,4	1,648	0,992	0,706
45	0	3,846	2,309	1,647
	9,81	3,929	2,360	1,683
	29,4	4,094	2,461	1,753

Продолжение таблицы 1

При значе- ниях		$\beta = 45k_{\beta}$					
		a=0g		a=0,2g		a=0,4g	
$\Phi_d$	$C_d$	$k_{slope}$	$k_2$	$k_{slope}$	$k_2$	$k_{slope}$	$k_2$
1	2	6	7	8	9	10	11
15	0	1,033	1,030	0,620	0,619	0,444	0,443
	9,81	1,115	1,113	0,671	0,670	0,479	0,479
	29,4	1,281	1,279	0,772	0,772	0,551	0,550
20	0	1,403	1,400	0,843	0,841	0,603	0,602
	9,81	1,485	1,483	0,893	0,892	0,638	0,637
	29,4	1,651	1,648	0,994	0,994	0,709	0,709
45	0	3,853	3,846	2,315	2,312	1,657	1,653
	9,81	3,936	3,929	2,366	2,362	1,692	1,689
	29,4	4,101	4,094	2,467	2,464	1,762	1,760

Продолжение таблицы 1

При значениях		$\beta=45k_{\beta}\sin(\pi x/L)$					
		a=0g		a=0,2g		a=0,4g	
Фд	Сд	$k_{slope}$	$k_3$	$k_{slope}$	$k_3$	$k_{slope}$	$k_3$
1	2	12	13	14	15	16	17
15	0	1,033	1,031	0,620	0,619	0,442	0,441
	9,81	1,116	1,114	0,671	0,670	0,477	0,477
	29,4	1,281	1,279	0,772	0,771	0,549	0,549
20	0	1,403	1,400	0,842	0,841	0,600	0,599
	9,81	1,486	1,483	0,893	0,892	0,636	0,635
	29,4	1,651	1,649	0,994	0,993	0,707	0,706
45	0	3,855	3,848	2,315	2,311	1,649	1,647
	9,81	3,938	3,931	2,365	2,361	1,685	1,682
	29,4	4,103	4,096	2,466	2,463	1,756	1,753

Таблица 2

Интенсивность сейсмическ. воздействия	0g	0,2g	0,4g
Метод Тейлора-Како	1,3995	0,8409	0,6002
Предлагаемый метод	1,3998	0,8405	0,5995
Величина относительного отклонения, %	0,021	0,048	0,117

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Можевитинов А.Л., Шинтемиров М.** Общий метод расчета устойчивости откосов земляных сооружений // Изв. ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. -1970. - Т. 92. - С.11-22.
2. **Хуан Я.Х.** Устойчивость земляных откосов. -М.: Стройиздат, 1988.-240 с.
3. **Чугаев Р.Р.** Земляные гидротехнические сооружения. -М.: Энергия, 1967.- 460 с.

ЗАО "АРМГИДРОЭНЕРГОПРОЕКТ". Материал поступил в редакцию 15.02.2000.

**ՀԱ. ԱՂԻԼԽԱՆՅԱՆ, Ա.Հ. ԱՂԻԼԽԱՆՅԱՆ  
ԳՐՈՒՆՏԱՅԻՆ ՇԵՊԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈՂՆԵՐ**

Նկարագրվում է գրունտային շեպերի և լանջերի կայունության հաշվարկի նոր մեթոդ, որը կիրառելի է կամայական ձևի սահքի մակերևույթի, անհամասեռ կառուցվածքի գրունտային զանգվածի, կամայական ուղղվածության և կազմի ակտիվ ու ժահամակարգի համար: Մեթոդի հիմքում դրված է փոխազդեցության ուժերի թեքման անկյան փոփոխականության վարկածը:

**H.A. ADILKHANYAN, A.H. ADILKHANYAN**

GROUND SLOPE STABILITY CALCULATION METHOD

A method of ground slope and side slope stability calculation applicable for arbitrary sliding surface, for nonhomogeneous soils, for arbitrary direction and composition of active forces is described. The method is based on the hypothesis about angle slope variability of interaction between fragments.

Г.А. БУРНАЧЯН, А.Г. СТЕПАНЯН

### ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГАЭС С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ ВЕРХНЕГО БАССЕЙНА

Предлагается метод выбора оптимальных режимов работы ГАЭС суточного цикла регулирования с переменным напором. Результаты исследований показали необходимость учета колебаний напора при оптимизации режимов работы ГАЭС, поскольку в этом случае более обоснованно может быть определен расход топлива по системе.

**Ключевые слова:** энергосистема, график нагрузки, циклы заряда и разряда, бьеф, режимы.

Целью настоящей работы является выбор режима работы ГАЭС суточного цикла регулирования с учетом изменения уровня воды верхнего бассейна. Данный вопрос является существенным для ГАЭС "чистого типа" с напорами порядка 150...200 м, когда колебания уровня воды верхнего бассейна значительны (10...15 м). Если изменение напора на ГАЭС более 5%, то его влияние на экономичность работы ГАЭС требует соответствующего учета при выборе ее оптимальных режимов.

Учет изменения напора на ГАЭС может быть реализован лишь при наличии заранее для определенных значений напора построенных энергетических характеристик - расходной характеристики и характеристики относительного прироста.

**Постановка задачи.** Выбор оптимального суточного режима работы ГАЭС с переменным напором в тепловой энергосистеме, состоящей из конденсационных станций, исходя из критерия минимума расхода условного топлива, сводится к обычной вариационной задаче на безусловный экстремум [1, 2], где отыскивается минимум некоторого функционала

$$J = \int_{t_0}^{t_k} \left( \sum_{i=1}^m B_i + \lambda_t \varphi_t \right) dt \quad (1)$$

с граничными условиями

$$V_r^\pm(t_0) = 0, \quad V_r^\pm(t_k) = V_r^3, \quad (2)$$

где

$$\varphi_t = \sum_{i=1}^m P_{Ti} \pm P_r(V_r, V_r') - P_c - \Delta P = 0, \quad (3)$$

$$V_r' = \frac{dV_r}{dt} = Q_r. \quad (4)$$

Здесь  $B_i$  - часовой расход условного топлива на  $i$ -й станции;  $\lambda_t$  - переменный по времени множитель;  $P_{Ti}$  - нагрузка  $i$ -й конденсационной станции ( $i=1,2,\dots,m$ );  $P_r$  - нагрузка ГАЭС (знак “плюс” соответствует циклу разряда, а “минус” - заряда);  $P_c, \Delta P$  - соответственно нагрузка энергосистемы и потери в линиях энергопередач;  $V_r^3$  - используемый в течение цикла регулирования ( $t_k - t_0$ ) объем воды на ГАЭС.

Кривые, реализующие экстремум функционала (1), как известно, должны удовлетворять дифференциальным уравнениям Эйлера-Лагранжа, которые применительно к рассматриваемой задаче с учетом циклов заряда и разряда могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_i}{\partial P_{Ti}} + \lambda_t \left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right) - \frac{d}{dt} \frac{\partial B_i}{\partial P_{Ti}} &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ \lambda_t \left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right) \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} - \frac{d}{dt} \left[ \lambda_t \left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right) \frac{\partial P_T}{\partial Q_T} \right] &= 0, \\ -\lambda_t \left( 1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right) \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} - \frac{d}{dt} \left[ \lambda_t \left( 1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right) \frac{\partial P_H}{\partial Q_H} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая последний член первого равенства системы уравнений (5) равным нулю, т.е. пренебрегая переходными процессами на тепловых станциях, определим величину  $\lambda_t$ :

$$\lambda_t = - \frac{b_i}{1 - \partial \Delta P / \partial P_{Ti}},$$

где  $b_i = \partial B_i / \partial P_{Ti}$  - относительный прирост расхода топлива на  $i$ -й тепловой станции.

Подставив выражение  $\lambda_t$  в (2) и (3), получим

$$\begin{aligned} - \frac{b_i \left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right)}{\left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} + \frac{d}{dt} \left[ \frac{b_i \left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T} \right)}{\left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_T}{\partial Q_T} \right] &= 0, \\ - \frac{b_i \left( 1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right)}{\left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} - \frac{d}{dt} \left[ \frac{b_i \left( 1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H} \right)}{\left( 1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}} \right)} \frac{\partial P_H}{\partial Q_H} \right] &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначив отношения

$$\left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}\right) / \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}\right) \quad \text{и} \quad \left(1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H}\right) / \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}\right)$$

через  $\sigma_T$  и  $\sigma_H$ , а также проинтегрировав (6), получим

$$\begin{aligned} -\int \sigma_T b_i \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} + \sigma_T b_i \frac{\partial P_T}{\partial Q_T} &= C_T, \\ \int \sigma_H b_i \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} + \sigma_H b_i \frac{\partial P_H}{\partial Q_H} &= C_H. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая, что  $\frac{\partial P_T}{\partial Q_T} = q_T$ ,  $\frac{\partial P_H}{\partial Q_H} = q_H$  - соответственно относительные приросты

ГАЭС в турбинном и насосном циклах, а  $b_i/q_T = \lambda_T(t)$  и  $b_i/q_H = \lambda_H(t)$ , систему (7) можно записать в следующем виде:

$$\sigma_T \lambda_T(t) - \Delta \lambda_T(t) = C_T, \quad \sigma_H \lambda_H(t) + \Delta \lambda_H(t) = C_H, \quad (8)$$

где

$$\Delta \lambda_T(t) = \int b_i \frac{\partial P_T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_T} dt, \quad \Delta \lambda_H(t) = \int b_i \frac{\partial P_H}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial V_H} dt.$$

Из (8) видно, что значения  $\lambda_T$  и  $\lambda_H$  в течение цикла заряда и разряда при изменении напора являются переменными и меняются в каждый момент времени. Если взамен членов, стоящих под знаком интеграла, подставить их размерности, то получим, что величина  $\Delta \lambda_H$  выражается в тоннах у.т. на  $1\text{ м}^3$  поднятой воды, т.е. характеризует меру дополнительного расхода топлива, получаемого в результате наполнения верхнего водохранилища. Таким образом, если величина  $(\lambda_H + \Delta \lambda_H)$  в целом представляет собой меру перерасхода топлива при подаче  $1\text{ м}^3$  воды ГАЭС, то  $(\lambda_T - \Delta \lambda_T)$ , наоборот, выражает меру эффективности использования воды на ГАЭС в турбинном цикле с учетом последствий в период сработки водохранилища.

Из выражения (8) после некоторых преобразований получим условие оптимального режима работы ГАЭС в энергосистеме:

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}} = (C_T + \Delta \lambda_T) \frac{q_T}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}} = (C_H - \Delta \lambda_H) \frac{q_H}{1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H}}, \quad (9)$$

где

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_{Ti}}} = (C_T + \Delta \lambda_T) \frac{q_T}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}} - \quad \text{для цикла разряда,}$$

$$\frac{b_i}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_T}} = (C_H - \Delta \lambda_H) \frac{Q_H}{1 + \frac{\partial \Delta P}{\partial P_H}} \quad - \text{ для цикла заряда.}$$

**Алгоритм задачи.** Для решения поставленной задачи необходима следующая исходная информация:

1. Графики нагрузки энергосистемы.
2. Энергетические характеристики тепловых станций: расходная характеристика и характеристика относительных приростов.
3. Энергетические характеристики ГАЭС в турбинном цикле (рис.1).
4. Объем воды, используемой на ГАЭС ( $2,3(10^6 \text{ м}^3)$ ).
5. Кривая связи уровня и объема воды верхнего водохранилища ГАЭС и зависимость  $dH/dV$  от  $V$  (рис.2).

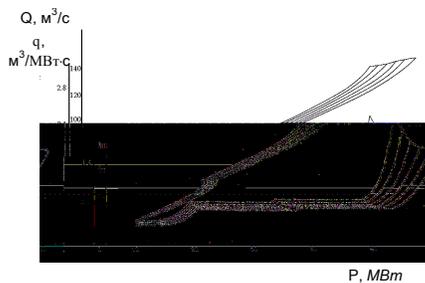


Рис.1

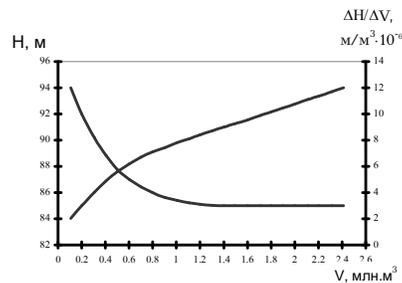


Рис.2

При решении задачи приняты следующие допущения:

1. Уровень нижнего бьефа остается неизменным.
2. Относительные приросты потерь в сетях приняты равными нулю, что справедливо для концентрированной энергосистемы.

Водоохранилище ГАЭС к моменту работы в турбинном режиме должно быть заполнено до наибольшего допустимого уровня  $H = 94 \text{ м}$ .

Используя формулу  $\mathcal{E} = \eta_T \cdot H_T \cdot V / 367$ , методом вливания энергии определим область работы ГАЭС в турбинном режиме ( $t \dots t + \tau$ ). Принимая за начальный момент времени  $t$ , определим область изменения  $\lambda_t$  при максимальном значении напора:

$$b_{\min} / q_{\max} \leq \lambda_t < b_{\max} / q_{\min} .$$

Из этой области выбирается произвольное значение  $\lambda_t$ , при котором производится оптимальное распределение нагрузки для данного часа и находятся  $b$ ,  $q$ ,  $Q$ ,  $P_T$ ,  $P_G$ .

Имея расход воды ГАЭС в  $t$ -м часе, определим изменение объема воды в водохранилище по следующей зависимости:

$$\Delta V = \Delta t (Q_{\text{пр.}} - Q),$$

где  $Q_{пр.}$  - приток воды к водохранилищу ( $Q_{пр.} = 0$ );  $Q$  - расход воды через турбины ГАЭС;

$\Delta t = 3600$  с. (Знак “минус” означает сработку водохранилища).

Следовательно, объем воды в водохранилище к началу следующего часа составит  $V_{t+1} = V_t - \Delta V$ , а напор -  $H_{t+1}$  по зависимости  $H=f(V)$ .

Для этого часа, имея величину напора, нагрузку и  $\lambda$ , производится новое распределение нагрузки и находятся  $q$ ,  $b$ ,  $Q$ ,  $P_T$ ,  $P_T$  для  $t+1$ , а также  $\Delta\lambda_{t+1}$  по формуле

$$\Delta\lambda_{t+1} = \Delta\tau dH/dV bQ10^{-2}.$$

Следовательно, к моменту времени  $t+1$  величина  $\lambda_{t+1}$  составит

$$\lambda_{t+1} = \lambda_t - \Delta\lambda_{t+1}.$$

Расчет в такой последовательности производится до полного опорожнения водохранилища. Затем методом вливания энергии в провал графика нагрузки определяется режим заряда ГАЭС с тем, чтобы к началу цикла заряда водохранилище было бы заполнено, т.е. в обоих циклах работы должно выполняться условие (2). Если эти условия нарушаются, то определяется новое значение  $\lambda_t$ , и весь расчет в вышеизложенной последовательности повторяется. Окончательные результаты расчетов в обоих циклах работы ГАЭС приведены в таблице, где столбцы 1,9,10 показывают часы и соответствующие им режимы работы гидроаккумулирующей станции с тепловыми станциями системы.

Таблица

Цикл разряда или турбинный режим									
Часы	$P_c, MВт$	$\lambda(\tau)$	$\Delta\lambda(\tau)$	$C$	$Q, м^3/с$	$\Delta V 10^3, м^3$	$H, м$	$P_T, MВт$	$P_T, MВт$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	665	0,243	—	0,243	125	450	94	568	97
18	700	0,2467	0,0044	0,2423	123	442,8	92,7	606	94
19	742	0,148	—	0,148	149	536,4	91,3	635	107
20	725	0,2485	0,0052	0,2433	121	436,5	89,7	635	90
21	690	0,2487	0,0055	0,2432	85	306	87,9	628	62
22	625	0,2478	0,0044	0,2434	38	136,8	85,3	597	28
Цикл заряда или насосный режим									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	490	—	—	—	51	283,6	85,9	490	55
2	455	—	—	—	73	262,8	88	455	80
3	425	—	—	—	82	295,2	89,2	425	95
4	400	—	—	—	85	306	90,2	400	100
5	400	—	—	—	85	306	91,2	400	100
6	430	—	—	—	81	291,6	92,1	430	95
7	520	—	—	—	21	75,6	92,3	520	25
12	505	—	—	—	26	93,6	92,5	505	35
13	475	—	—	—	58	208,8	93,2	475	70
14	475	—	—	—	63	226,8	93,7	475	75
15	535	—	—	—	9	32,4	93,8	535	15
24	520	—	—	—	15	54	94	520	20

Для обоснования целесообразности учета влияния колебаний напора по сравнению с принятым на практике расчетным напором определим  $H_h$  для цикла заряда по зависимости

$$H_h = \left( \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta t_i \sqrt{H_{oi}}}{\sum_{i=1}^n Q_i \Delta t_i} \right)^2$$

и для этого случая по методике [1] найдем оптимальный режим работы ГАЭС при тех же принятых исходных данных. Условный расход топлива по системе в случае переменного напора получился (от общего расхода топлива по системе) на 1,0% меньше, чем при  $H_h = 90$ , 1м, что подтверждает целесообразность расчетов с учетом колебаний напора с целью правильного обоснования величины расхода топлива по системе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурначян Г.А.** Топливный эффект ГАЭС при оптимальном режиме работы. – М.: Наука, 1968. –С. 123-130.
2. **Бурначян Г.А.** Оптимизация режимов работы сложных энергосистем с ГАЭС // Изв. АН АрмССР. –1971.– С. 28-33.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.03.2001.

**Հ.Ա. ԲՈՒՆԱԶՅԱՆ, Ա.Գ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ**

**ՀԱԷԿ-Ի ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՌԵՃԻՄՆԵՐԻ ԸՆԴՈՒԹՅՈՒՆԸ՝ ՎԵՐԻՆ**

**ԱՎԱԶԱՆԻ ՏՍՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ**

Առաջարկված է փոփոխական էջքով ՀԱԷԿ-ի օրական կարգավորման օպտիմալ աշխատանքային ռեժիմների ընտրությունը: Հետազոտության արդյունքները ցույց են տվել, որ անհրաժեշտ է հաշվի առնել էջքի տատանումները ՀԱԷԿ-ի աշխատանքային ռեժիմների լավարկման դեպքում, ինչն ավելի կհիմնավորի համակարգի վառելիքի ծախսի դրոշումը:

**H.A.BOURNACHYAN, A.G.STEPANYAN**

### OPTIMUM WORKING REGIME OF HAEP IN VIEW OF UPPER RESERVOIR WATER-LEVEL FLUCTUATION

A methodic of optimum working regime selection of HAEP for a daily regulation with variable head is proposed. The result of investigation revealed the necessity of talking into account the head fluctuation in case of HAEP working regime optimization as in this case the consumption of the fuel according to the sistem can be justified.

В.С. САФАРЯН

**РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ  
НЕТРАДИЦИОННОЙ ФОРМЕ ЗАДАНИЯ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Рассматривается задача расчета установившихся режимов электрических систем при нарушении традиционной формы задания исходной узловой информации. Выведены условия, при соблюдении которых можно осуществить расчет установившихся режимов при нетрадиционной форме задания узловой информации.

**Ключевые слова:** аннулирующая переменная, обращенная форма, доминирующая переменная, полная и независимая информация.

Известно, что при определении установившихся режимов (УР) электрических систем (ЭС) на основе решения уравнений состояний сети часть узловых режимных параметров (УРП) считается заданной. Узловая исходная информация задается в следующей форме:

- а) в узлах типа  $P, Q$  заданными являются активная и реактивная мощности, искомыми - модуль и фаза напряжения;
- б) в узлах типа  $P, U$  заданными являются активная мощность и модуль напряжения, искомыми - реактивная мощность и фаза напряжения;
- в) в узлах типа  $U, \psi$  заданными являются модуль и фаза напряжения, искомыми - активная и реактивная мощности.

Вышеприведенную структуру задания узловой исходной информации назовем стандартной или традиционной, согласно которой из четырех УРП ( $P, Q, U, ()$ ) для каждого узла два считаются искомыми, а остальные два - заданными.

Все известные алгоритмы и программы расчета УР ЭС ориентированы на традиционную форму задания исходной информации [1, 2], которая предъявляет жесткие требования к составу независимой исходной информации. Следует отметить, что при воспроизведении состояния ЭС на основании информации, получаемой по каналам связи, порой невозможно всю полученную информацию включить в состав узловой информации, так как при этом может нарушиться традиционная форма задания исходной информации. Так, например, если в сетевом узле ( $P=0, Q=0$ ) измеряется модуль напряжения, то из  $P, Q, U$  можно использовать либо  $P, U$ , либо  $P, Q$ , т.е. один из известных параметров невозможно включить в состав исходной информации. В этой связи весьма актуальной является разработка алгоритмов и программ расчета УР ЭС, использующих любую форму задания исходной информации.

Поскольку число действительных уравнений УР ЭС, составленных методом узловых потенциалов, равно  $2n$  ( $n$  - число узлов ЭС), то из  $4n$  УРП  $2n$  являются искомыми, а остальные  $2n$  - заданными.

Отметим, что не всякий вектор из  $2n$  УРП может служить вектором узловой исходной информации.

Обозначим через  $G(i)$  - множество узлов, инцидентных  $i$  - му узлу;  $M(i)$  - окрестность узла  $i$ ;  $M(i) = G(i) \cup i$ ;  $h_i$  - число заданных УРП в узле  $i$ ;  $d_i = 4 - h_i$  - число искомых УРП в узле  $i$ .

Комплексное уравнение для узла  $i$

$$f_i = \hat{S}_i - \hat{U}_i \sum_{j \in M(i)} Y_{ij} \dot{U}_j = 0 \quad (1)$$

расчлняется на два действительных уравнения:

$$\begin{cases} f_i' = P_i - \operatorname{Re}(\hat{U}_i \sum_{j \in M(i)} Y_{ij} \dot{U}_j) = 0, & i = \overline{1, n}, \\ f_i'' = -Q_i - \operatorname{Im}(\hat{U}_i \sum_{j \in M(i)} Y_{ij} \dot{U}_j) = 0, & i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (2)$$

УРП узла  $i$  назовем доминирующими для функции  $f_i(f_i', f_i'')$ .

Обозначим через  $X_i'$  и  $X_i''$  - множества искомых УРП, содержащихся соответственно в функциях  $f_i'$  и  $f_i''$ . Каждой функции  $f_i'$  и  $f_i''$  припишем по одной переменной  $x_i' \in X_i'$ ,  $x_i'' \in X_i''$  и примем, что уравнение  $f_i' = 0$  ( $f_i'' = 0$ ) дает информацию относительно переменной  $x_i'$  ( $x_i''$ ), которая является аннулирующей для функций  $f_i'$  ( $f_i''$ ). Система (2) имеет решение при условиях, если каждое уравнение системы (1) дает информацию и каждая переменная является аннулирующей только для одной функции. Вектор узловой исходной информации, который удовлетворяет последнему условию, назовем корректным.

Любой корректный вектор узловой исходной информации является полным и независимым. Свойство полноты вектора узловой исходной информации означает, что он содержит  $n$  комплексных или  $2n$  действительных компонентов. Свойство независимости вектора узловой исходной информации означает, что его любой компонент не может быть выражен через остальные, используя уравнения УР.

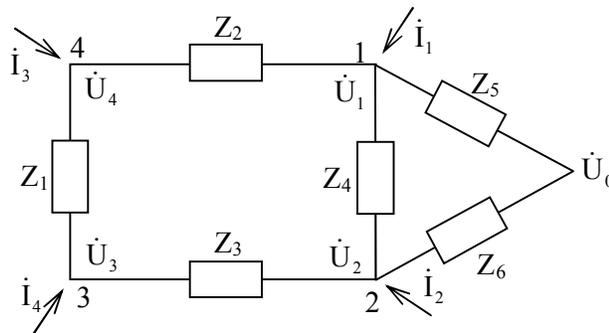


Рис. 1

Покажем, что свойство корректности вектора исходной узловой информации является инвариантным по отношению к выбору формы записи уравнений УР. Поскольку при записи уравнений УР в обращенной форме каждая переменная может быть выбрана аннулирующей для любого уравнения, то может сложиться неверное впечатление, что любой вектор из  $2n$  УРП может служить вектором узловой исходной информации. Покажем, что если вектор узловой исходной информации является некорректным при записи уравнений УР в необращенной форме, то он является некорректным и при записи уравнений УР в любой форме. Обсудим этот вопрос на примере рис. 1.

Без ущерба для общности рассмотрим линейную (линеаризованную) систему уравнений УР в обращенной и необращенной формах. Сначала рассмотрим структуру вектора узловой исходной информации. В базисном узле (0) задано напряжение  $\dot{U}_0$ , в узле номер 1- комплексные напряжение  $(\dot{U}_1)$  и узловой ток  $(\dot{I}_1)$ , в узлах с номерами 2, 3 - комплексные напряжения  $(\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3)$ . Число заданных узловых режимных комплексных параметров равно пяти, т.е. обеспечено свойство полноты вектора узловой исходной информации. Нетрудно заметить, что нарушено свойство независимости вектора узловой исходной информации, поскольку уравнение

$$Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 + Y_{13}\dot{U}_3 + Y_{10}\dot{U}_0 = \dot{I}_1 \quad (3)$$

содержит только переменные из вектора узловой исходной информации. Таким образом, вектор узловой исходной информации является некорректным. Покажем, что задача расчета УР в обращенной форме с некорректным вектором исходной информации также является некорректной.

Рассмотрим уравнение УР для схемы рис. 1 в обращенной форме:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_0 + Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2 + Z_{13}\dot{I}_3 + Z_{14}\dot{I}_4, \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_0 + Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 + Z_{23}\dot{I}_3 + Z_{24}\dot{I}_4, \\ \dot{U}_3 = \dot{U}_0 + Z_{31}\dot{I}_1 + Z_{32}\dot{I}_2 + Z_{33}\dot{I}_3 + Z_{34}\dot{I}_4, \\ \dot{U}_4 = \dot{U}_0 + Z_{41}\dot{I}_1 + Z_{42}\dot{I}_2 + Z_{43}\dot{I}_3 + Z_{44}\dot{I}_4. \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку  $\dot{U}_0$ ,  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_2$ ,  $\dot{U}_3$  и  $\dot{I}_1$  заданы, то искомые  $\dot{I}_2$ ,  $\dot{I}_3$  и  $\dot{I}_4$  можно определить, решая совместно первые три уравнения системы уравнений (4):

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 - \dot{U}_0 - Z_{11}\dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 - \dot{U}_0 - Z_{21}\dot{I}_1 \\ \dot{U}_3 - \dot{U}_0 - Z_{31}\dot{I}_1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Система (5) не имеет решение, поскольку

$$\Delta_{41} = \begin{vmatrix} Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

где  $\Delta_{41}$  - минор элемента  $Z_{41}$  матрицы узловых сопротивлений.

Равенство (6) следует из очевидного соотношения

$$Y_{41} = -\frac{\Delta_{41}}{\det(Z)} = 0. \quad (7)$$

Отметим, что в общем случае разложение искомых по функциям неоднозначно, и от структуры искомых и способа их разложения существенным образом зависит сходимость итерационного процесса решения системы нелинейных уравнений (1).

Перечислим некоторые особенности задания аннулирующих переменных. При записи уравнений УР в виде небаланса комплексной мощности в необращенной форме (1) величины  $P_i$  и  $Q_i$  могут быть аннулирующими только для функций  $f_i$ , а переменные  $U_i'$  и  $U_i''$  - для функций узлов множества  $M(i)$ . При записи уравнений в обращенной форме нет никаких ограничений в выборе аннулирующих переменных, если вектор узловой исходной информации является корректным. Желательно, чтобы аннулирующая переменная являлась также и доминирующей.

**Пример расчета.** Для схемы, приведенной на рис. 2, определим искомые УРП (исходная информация задана в нестандартной форме).

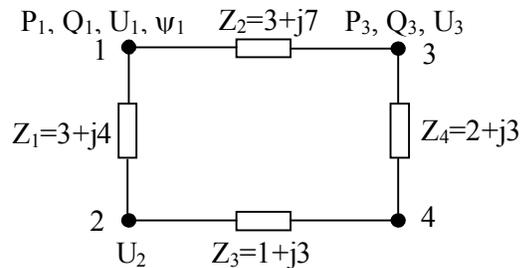


Рис. 2

Для схемы рис. 2 имеем:  $h_1=4$ ,  $h_2=1$ ,  $h_3=3$ ,  $h_4=0$ . Ниже приведены два варианта разложения, а также результаты расчета УР:

$$\begin{aligned} f_1'(\Psi_2) &= 0, & f_1'(\Psi_3) &= 0, \\ f_1''(\Psi_3) &= 0, & f_1''(\Psi_2) &= 0, \\ f_2'(P_2) &= 0, & f_2'(P_2) &= 0, \\ f_2''(Q_2) &= 0, & f_2''(Q_2) &= 0, \\ f_3'(U_4) &= 0, & f_3'(\Psi_4) &= 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_3''(\Psi_4) &= 0, & f_3''(U_4) &= 0, \\
 f_4'(P_4) &= 0, & f_4'(Q_4) &= 0, \\
 f_4''(Q_4) &= 0, & f_4''(P_4) &= 0.
 \end{aligned}$$

Таблица

Исходные параметры							
P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	U <sub>1</sub>	ψ <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	Q <sub>3</sub>	U <sub>3</sub>
91,7	32,6	112,5	0	110,7	-80,3	-30,5	110,2
Искомые параметры							
P <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>	ψ <sub>2</sub>	ψ <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	Q <sub>4</sub>	U <sub>4</sub>	ψ <sub>4</sub>
-60,4	-30,2	-0,73	-1,1	50,4	30,6	111,3	-0,66

Для решения задачи с одной и той же точностью при первом варианте разложения потребовалось 7 итераций, при втором варианте - 11, а при стандартной форме задания исходной информации - 6 итераций. Результаты расчета УР приведены в таблице (мощности заданы в МВт и МВАр, напряжения - в кВ, углы - в градусах, сопротивления - в Ом).

Таким образом, для повышения оперативности и точности воспроизведения УР электрических систем на основе информации, получаемой по телеканалам связи, необходимо использовать модели расчета УР, оперирующие с любой формой задания исходной информации. Задача расчета УР электрической системы является корректной, если вектор исходной узловой информации является полным и независимым. Свойство корректности вектора исходной узловой информации является инвариантным по отношению к выбору формы записи уравнений установившегося режима.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Идельчик В.И** Расчеты установившихся режимов электрических систем. - М.: Энергия, 1977. - 190 с.
2. **Жуков Л.А., Стратан И.П.** Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. - М.: Энергия, 1979. - 415 с.

ЗАО "Институт энергетики" РА. Материал поступил в редакцию 29.03.2000.

## Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ

### ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՆԱԽՆԱԿԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՈՉ ԱՎԱՆՂԱԿԱՆ ՏՐՄԱՆ ԴԵՂՔՈՒՄ

Դիտարկվում է էլեկտրական համակարգի հաստատված ռեժիմի հաշվարկը, երբ խախտված է հանգուցային պարամետրերի նախնական տվյալների տրման ավանդական տեսքը: Նախնական ինֆորմացիայի ոչ ավանդական տրման դեպքում ստացված են այն պայմանները, որոնց բավարարման դեպքում հնարավոր է իրագործել հաստատված ռեժիմի հաշվարկը:

## V. S. SAFARYAN

### **STEADY-STATE CONDITION CALCULATION OF ELECTRICAL SYSTEM IN NON-TRADITIONAL FORM OF INITIAL INFORMATION TASK**

Steady-state condition calculation problem in violation of traditional form for initial knot information is considered. Conditions are deduced and by observing them the steady-state calculation is possible to realize by non-traditional form of knot information task.

Н. П. БАДАЛЯН

## ПОСТРОЕНИЕ Y-Z, P-Q МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЭС И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОМ МИНИМИЗАЦИИ

Рассматриваются решения систем нелинейных алгебраических уравнений, вытекающие из Y-Z, P-Q математической модели установившегося режима ЭЭС методом минимизации с применением неособенных квадратных матриц Гессе.

**Ключевые слова:** метод, функция, матрица, узел, режим, уравнение, параметр, формула.

В настоящее время одним из перспективных направлений расчета установившихся режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) является применение Y-Z математических моделей при различной форме задания исходной информации относительно стационарных узлов [1-8]. При этом важное значение имеет выбор математического аппарата для их реализации.

В данной статье рассматривается реализация Y-Z, P-Q математической модели установившегося режима ЭЭС при сочетании методов декомпозиции и минимизации.

После удаления определенного количества ветвей исследуемую ЭЭС можно представить как совокупность радиально связанных подсистем. При этом соответствующая Y-Z математическая модель принимает вид

$$\begin{bmatrix} U_{m_1} \\ \dots \\ \dot{I}_{k_1} \\ \dots \\ U_{m_N} \\ \dots \\ \dot{I}_{k_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_B \\ \dot{I}_B \\ \dots \\ \dot{U}_B \\ \dot{I}_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{m_1, n_1} & \dot{A}_{m_1, \ell_1} \\ \dots & \dots \\ \dot{B}_{k_1, n_1} & Y_{k_1, \ell_1} \\ \dots & \dots \\ Z_{m_N, n_N} & \dot{A}_{m_N, \ell_N} \\ \dots & \dots \\ \dot{B}_{k_N, n_N} & Y_{k_N, \ell_N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{n_1} \\ \dot{U}_{\ell_1} \\ \dots \\ \dot{I}_{n_N} \\ \dot{U}_{\ell_N} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где индексы  $m(n)$  относятся к стационарным, а  $k(\ell)$  - к нагрузочным узлам:

$$m, n = m_1(n_1); m_2(n_2); \dots; m_N(n_N), \quad (2)$$

$$k, \ell = k_1(\ell_1); k_2(\ell_2); \dots; k_N(\ell_N). \quad (3)$$

На основании (1) можно установить выражения векторов активных и реактивных мощностей отдельных подсистем в виде

$$P_{m_1} = P_{\dot{A}m_1} + f_{pm_1}(I'_{n_1}, I''_{n_1}), \quad (4)$$

$$Q_{m_1} = Q_{\dot{A}m_1} + f_{qm_1}(I'_{n_1}, I''_{n_1}), \quad (5)$$

$$P_{m_2} = P_{\dot{A}m_2} + f_{pm_2}(I'_{n_2}, I''_{n_2}), \quad (6)$$

$$Q_{m_2} = Q_{\dot{A}m_2} + f_{qm_2}(I'_{n_2}, I''_{n_2}), \quad (7)$$

$$\dots\dots\dots P_{m_N} = P_{\dot{A}m_N} + f_{pm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}). \quad (8)$$

$$Q_{m_N} = Q_{\dot{A}m_N} + f_{qm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}). \quad (9)$$

В (4) - (9) были приняты следующие обозначения:

$$\begin{cases} f_{pm}(I'_{n_i}, I''_{n_i}) = \sum_{n_i} [R_{m,n_i}(I'_{m_i} I'_{n_i} + I''_{m_i} I''_{n_i}) + X_{m,n_i}(I''_{m_i} I'_{n_i} - I'_{m_i} I''_{n_i})], \\ f_{qm}(I'_{n_i}, I''_{n_i}) = \sum_{n_i} [X_{m,n_i}(I'_{m_i} I'_{n_i} + I''_{m_i} I''_{n_i}) - R_{m,n_i}(I''_{m_i} I'_{n_i} - I'_{m_i} I''_{n_i})], \end{cases} \quad (10)$$

где  $i=1, 2, \dots, N$ .

Векторы активных и реактивных мощностей нагрузочных узлов отдельных подсистем определяются в виде

$$P_{k_1} = P_{\dot{A}k_1} + f_{pk_1}(U'_{\ell}, U''_{\ell}), \quad (11)$$

$$Q_{k_1} = Q_{\dot{A}k_1} + f_{qk_1}(U'_{\ell}, U''_{\ell}), \quad (12)$$

$$P_{k_2} = P_{\dot{A}k_2} + f_{pk_2}(U'_{\ell}, U''_{\ell}), \quad (13)$$

$$Q_{k_2} = Q_{\dot{A}k_2} + f_{qk_2}(U'_{\ell}, U''_{\ell}), \quad (14)$$

$$\dots\dots\dots P_{k_N} = P_{\dot{A}k_N} + f_{pk_N}(U'_{\ell}, U''_{\ell}), \quad (15)$$

$$Q_{k_N} = Q_{\dot{A}k_N} + f_{qk_N}(U'_{\ell}, U''_{\ell}). \quad (16)$$

В выражениях (11)–(16) были приняты обозначения:

$$\begin{cases} f_{pk}(U'_{\ell_i}, U''_{\ell_i}) = \sum_{\ell_i} [R_{k,\ell_i}(U'_{k_i} U'_{\ell_i} + U''_{k_i} U''_{\ell_i}) + X_{k,\ell_i}(U''_{k_i} U'_{\ell_i} - U'_{k_i} U''_{\ell_i})], \\ f_{qk}(U'_{\ell_i}, U''_{\ell_i}) = \sum_{\ell_i} [X_{k,\ell_i}(U'_{k_i} U'_{\ell_i} + U''_{k_i} U''_{\ell_i}) - R_{k,\ell_i}(U''_{k_i} U'_{\ell_i} - U'_{k_i} U''_{\ell_i})], \end{cases} \quad (17)$$

где  $i=1, 2, \dots, N$ .

Выражения (4)–(9) являются функциями составляющих комплексных токов станционных узлов, а (11)–(16) зависят от составляющих комплексных напряжений нагрузочных узлов.

При этом, применяя соответствующие обозначения:

$$F_{pm_i}(I'_{n_i}, I''_{n_i}) = 0, \quad (18)$$

$$F_{qm_i}(I'_{n_i}, I''_{n_i}) = 0, \quad (19)$$

$$F_{pk_i}(U'_{\ell_i}, U''_{\ell_i}) = 0, \quad (20)$$

$$F_{qk_i}(U'_{\ell_i}, U''_{\ell_i}) = 0, \quad (21)$$

где  $i=1, 2, \dots, N$ , математическая модель (1) получит вид

$F_{pm_i}(I'_{n_i}, I''_{n_i}) = 0 ;$ $F_{qm_i}(I'_{n_i}, I''_{n_i}) = 0 ;$	$F_{pk_i}(U'_{\ell_i}, U''_{\ell_i}) = 0 ;$ $F_{qk_i}(U'_{\ell_i}, U''_{\ell_i}) = 0 ;$
...	(22)
$F_{pm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}) = 0 ;$ $F_{qm_N}(I'_{n_N}, I''_{n_N}) = 0 ;$	$F_{pk_N}(U'_{\ell_N}, U''_{\ell_N}) = 0 ;$ $F_{qk_N}(U'_{\ell_N}, U''_{\ell_N}) = 0 .$

Примем также обозначения:

$$\begin{aligned} I_i &= (I'_i, I''_i), \\ U_i &= (U'_i, U''_i). \end{aligned} \quad (23)$$

Тогда математическая модель установившегося режима ЭЭС получит следующий компактный вид:

$F_1(I_1) = 0 ;$ $F_1(U_1) = 0 ;$	$F_2(I_2) = 0 ;$ $F_2(U_2) = 0 ;$
...	(24)
$F_N(I_N) = 0 ;$ $F_N(U_N) = 0$	

Системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима, вытекающие из математической модели (24), решаются методом минимизации.

Согласно теории решения нелинейных векторных уравнений методом минимизации, требуется построение минимизируемых квадратных функций для отдельных подсистем:

$$F(I_i) = \sum_i \left[ F_{pm_i}^2(I_i) + F_{qm_i}^2(I_i) \right], \quad (25)$$

$$F(U_i) = \sum_i \left[ F_{pk_i}^2(U_i) + F_{qk_i}^2(U_i) \right]. \quad (26)$$

При  $i=1,2,\dots,N$  получаются соответствующие вспомогательные функции для первой, второй и последней подсистем.

Для решения поставленной задачи необходимо функции (25) и (26) разложить в ряд Тейлора:

$$F(I_i) = F(I_i^0) + \left. \frac{\partial F(I_i)}{\partial I} \right|_{I_i^0} \Delta I_i + \frac{1}{2} \Delta I_i^2 \left. \frac{\partial^2 F(I_i)}{\partial I_i^2} \right|_{I_i^0} \Delta I_i + F_B(I_i), \quad (27)$$

где  $F_B(I_i)$  представляет сумму членов ряда Тейлора, имеющих частные производные выше второго порядка. Если пренебречь  $F_B(I_i)$ , то ряд Тейлора (27) принимает вид

$$F(I_i) = F(I_i^0) + \left. \frac{\partial F(I_i)}{\partial I_i} \right|_{I_i^0} \Delta I_i + \frac{1}{2} \Delta I_i^2 \left. \frac{\partial^2 F(I_i)}{\partial I_i^2} \right|_{I_i^0} \Delta I_i. \quad (28)$$

Условие минимума полученной функции (28) имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial \Delta I_i} \left[ F(I_i^0) + \left. \frac{\partial F(I_i)}{\partial I_i} \right|_{I_i^0} \Delta I_i + \frac{1}{2} \Delta I_i^T \left. \frac{\partial^2 F(I_i)}{\partial I_i^2} \right|_{I_i^0} \Delta I_i \right] = 0, \quad (29)$$

где T – знак транспонирования.

Поскольку

$$\frac{\partial}{\partial \Delta I_i} \left[ F(I_i^0) \right] = 0, \quad (30)$$

то выражение (29) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial \Delta I_i} \left[ \left. \frac{\partial F(I_i)}{\partial I_i} \right|_{I_i^0} \Delta I_i + \frac{1}{2} \Delta I_i^T \left. \frac{\partial^2 F(I_i)}{\partial I_i^2} \right|_{I_i^0} \Delta I_i \right] = 0. \quad (31)$$

Из (31) следует

$$\frac{\partial F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}_i} + \frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}_i^2} \Delta \mathbf{I}_i = 0 \quad (32)$$

или

$$\frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}_i^2} \Delta \mathbf{I}_i = -\frac{\partial F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}_i} . \quad (33)$$

Введем следующие обозначения:

$$\left[ \frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}_i^2} \right] = [\mathbf{H}(\mathbf{I}_i)] . \quad (34)$$

Выражение (34) является неособенной квадратной матрицей Гессе

$$\left[ \frac{\partial F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}_i} \right] = [\mathbf{G}(\mathbf{I}_i)] , \quad (35)$$

которая является столбцевой матрицей градиента.

В результате матричное выражение (33) принимает вид

$$[\mathbf{H}(\mathbf{I}_i)] \times [\Delta \mathbf{I}] = -[\mathbf{G}(\mathbf{I}_i)] , \quad (36)$$

откуда

$$[\Delta \mathbf{I}] = [\mathbf{H}(\mathbf{I}_i)] \times [\mathbf{G}(\mathbf{I}_i)] . \quad (37)$$

Рассматривая (37) как исправление искомой величины, можно написать следующее рекуррентное выражение:

$$[\mathbf{I}]^{И+1} = [\mathbf{I}]^И - \left[ \frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}^2} \right]_И^{-1} \times [\mathbf{G}(\mathbf{I}_i)]_И , \quad (38)$$

которое в развернутой и окончательной форме принимает вид

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{i,k} \\ \dots \\ \mathbf{I}''_{i,k} \end{bmatrix}^{И+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{i,k} \\ \dots \\ \mathbf{I}''_{i,k} \end{bmatrix}^И - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}'_{i,k} \partial \mathbf{I}'_{i,\ell}} & \vdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}'_{i,k} \partial \mathbf{I}''_{i,\ell}} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}''_{i,k} \partial \mathbf{I}'_{i,\ell}} & \vdots & \frac{\partial^2 F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}''_{i,k} \partial \mathbf{I}''_{i,\ell}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}'_{i,\ell}} \\ \dots \\ \frac{\partial F(\mathbf{I}_i)}{\partial \mathbf{I}''_{i,\ell}} \end{bmatrix} . \quad (39)$$

Поступая аналогичным образом относительно вспомогательной функции (26), в результате соответствующего преобразования установим следующее рекуррентное выражение:

$$\begin{bmatrix} U'_{\ell_i} \\ \dots \\ U''_{\ell_i} \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} U'_{\ell_i} \\ \dots \\ U''_{\ell_i} \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F(U_i)}{\partial U'_{k_i} \partial U'_{\ell_i}} & \dots & \frac{\partial^2 F(U_i)}{\partial U'_{k_i} \partial U''_{\ell_i}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 F(U_i)}{\partial U''_{k_i} \partial U'_{\ell_i}} & \dots & \frac{\partial^2 F(U_i)}{\partial U''_{k_i} \partial U''_{\ell_i}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial F(U_i)}{\partial U'_{k_i}} \\ \dots \\ \frac{\partial F(U_i)}{\partial U''_{k_i}} \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Выражение (39) позволяет определить численные значения составляющих комплексных токов отдельных подсистем, в то время как (40) - численные значения составляющих комплексных напряжений нагрузочных узлов.

Частные производные первого порядка, входящие в рекуррентные выражения (39) и (40), определяются в виде

$$\frac{\partial F(I_i)}{\partial I'_{m_i}} = 2 \sum_{n_i=1}^{\Gamma_i} \left( F_{p n_i} \frac{\partial F_{p n_i}}{\partial I'_{m_i}} + F_{q n_i} \frac{\partial F_{q n_i}}{\partial I'_{m_i}} \right), \quad (41)$$

$$\frac{\partial F(I_i)}{\partial I''_{m_i}} = 2 \sum_{n_i=1}^{\Gamma_i} \left( F_{p n_i} \frac{\partial F_{p n_i}}{\partial I''_{m_i}} + F_{q n_i} \frac{\partial F_{q n_i}}{\partial I''_{m_i}} \right),$$

$$\frac{\partial F(U_i)}{\partial U'_{k_i}} = 2 \sum_{\ell_i=\Gamma_i+1}^{M_i} \left( F_{p \ell_i} \frac{\partial F_{p \ell_i}}{\partial U'_{k_i}} + F_{q \ell_i} \frac{\partial F_{q \ell_i}}{\partial U'_{k_i}} \right), \quad (42)$$

$$\frac{\partial F(U_i)}{\partial U''_{k_i}} = 2 \sum_{\ell_i=\Gamma_i+1}^{M_i} \left( F_{p \ell_i} \frac{\partial F_{p \ell_i}}{\partial U''_{k_i}} + F_{q \ell_i} \frac{\partial F_{q \ell_i}}{\partial U''_{k_i}} \right).$$

На основе (41) нетрудно установить выражения частных производных второго порядка, входящих в квадратную матрицу Гессе рекуррентного выражения (39), а на основе (42) - входящих в рекуррентное выражение (40).

Имея аналитические выражения частных производных первого и второго порядков, входящих в рекуррентные выражения (39) и (40), можно перейти к описанию сущности вычислительного алгоритма для решения практических задач.

Вычислительный алгоритм состоит из двух взаимосвязанных частей. По первой части алгоритма, итерационный процесс организуется внутри первой подсистемы. Устанавливая численные значения режимных параметров граничных точек, примыкающих ко второй подсистеме,

построением численного уравнения второй подсистемы организуется итерационный процесс внутри нее и т.д. Итерационный процесс считается завершенным, когда численные значения искомых режимных параметров стационарных и нагрузочных узлов принимают желаемые значения.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

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. **Веников В.А., Суханов О.А.** Кибернетические модели электрических систем.– М.: Энергоиздат, 1982. - 328 с.
3. **Хачатрян В.С., Хачатрян С.Ц., Сафарян В.С.** Расчет установившихся режимов электрических систем с применением матрицы Гессе при Z –форме задания состояния сети // Изв. вузов СССР. Энергетика.-1990.- № 1.-С.20-23.
4. **Гераскин О.Т., Селенков Т.Г.** Решение уравнений установившихся режимов больших электроэнергетических систем в Y–диакоптической форме итерационным методом Ньютона-Рафсона на многопроцессорных ЭВМ // Известия вузов СССР. Энергетика. - 1994.- № 9, 10.- С. 13-24.
5. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Решение Y-Z –уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1997.- Т.50, № 2.- С. 96-103.
6. **Гераскин О.Т.** Методы декомпозиции для расчета установившихся режимов больших электроэнергетических систем // Известия РАН. Энергетика. - 1977.- № 6.- С. 11-20.
7. **Хачатрян В.С., Эгмекчян Э.А., Бадалян Н.П.** Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики // Электричество. - 1999.- № 4.-С. 7-12.
8. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П., Хачатрян К. В. Маркарян К. К.** Метод коррекции Y-Z расчетной матрицы ЭЭС // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2001.-Т 54, № 1.-С. 41-46.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 05.09.2001.

**Ն. Պ. ԲԱԴԱԼՅԱՆ  
ԷԼԷԻ-Ի ԿԱՅՈՒՆԱՑՎԱԾ ՌԵՃԻՄԻ «Y-Z, P-Q» ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԻ  
ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ ԵՎ ԻՐԱՑՈՒՄԸ  
ՄԻՆԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ**

Դիտարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ռեժիմի □Y-Z, P-Q□ մաթեմատիկական մոդելից բխող ոչ գծային հանրահաշվական հավասարումների համակարգերի լուծումը մինիմալացման մեթոդով՝ կիրառելով Հեսեի ոչ սովորական քառակուսի մատրիցներ:

**N.P. BADALYAN  
Y-Z, P-Q MATHEMATICAL MODEL CONSTRUCTION OF STEADY STATE ELECTRIC POWER  
STATION AND ITS REALIZATION BY THE METHOD OF MINIMIZATION**

Solution of nonlinear algebraic simultaneous systems following from Y-Z, P-Q mathematical model of steady state electric power station by method of minimization using Hesse's non-singular square matrix is considered.

Ж.Д. ДАВИДЯН

## МАЛЫЕ КОГЕНЕРИРУЮЩИЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Разработана малая тепловая электростанция, комплексно генерирующая электроэнергию 380 В, 50 Гц и тепловую энергию посредством нагретой воды с высоким КПД.

**Ключевые слова:** малая теплоэлектростанция, когенерирующая, водяной теплообменник, газо-водяной теплообменник.

Основными производителями электрической и отчасти тепловой энергии в энергетически развитых странах являются мощные стационарные теплоэлектростанции (ТЭС), которые, однако, обладают рядом серьезных недостатков:

- низкий КПД (не более 50%), высокие эксплуатационные расходы и высокая себестоимость энергии;

- большие потери электрической и тепловой энергии при ее транспортировке до потребителя вследствие сосредоточенности больших мощностей на стационарных ТЭС и рассредоточенности потребителей;

- негибкость управления и неэкономичность в пиковых режимах и режимах набора и сброса нагрузки;

- взаимосвязанность количества вырабатываемой электрической и тепловой энергии, в то время как соотношение их потребления переменное и зависит от времени года и региона;

- высокая концентрированность производства энергии на мощных электростанциях (это относится и к ГЭС), что может вызвать серьезные проблемы при возможных авариях, в том числе природных катаклизмах и военных действиях.

В качестве недостатка могут рассматриваться неизбежная "естественная" монополизация производства энергии крупными электростанциями и вызванные этим социально-экономические проблемы.

В настоящее время несправедливо укоренилось мнение о экономической нецелесообразности малых электростанций вообще и малых ТЭС в особенности. Однако при квалифицированном подходе к проектированию, производству и эксплуатации малых ТЭС эта точка зрения об "ущербности" малых ТЭС легко опровергается. Более того, формируется новая концепция малой энергетики, в том числе малой теплоэлектроэнергетики.

Рассмотрим это на примере разработанных в Армении научно-инженерной фирмой "ЕРАНД" малых ТЭС [1] с учетом опыта их эксплуатации. Указанная малая когенерирующая ТЭС электрической мощностью 16 кВт предназначена для комплексного генерирования электрической и тепловой энергии с целью снабжения отдельных автономных объектов – жилых домов, ферм, тепличных хозяйств, малых производств, удаленных войсковых частей, автономных специальных объектов и т.п. (Термин "когенерирующая" используется в некоторых

источниках и означает "комплексное генерирование" электрической и тепловой энергии). В данном случае генерируется одновременно электрическая энергия стандартных параметров 50 Гц, 380 В и тепловая энергия в виде нагретой воды для использования в системе отопления, а также для бытовых и хозяйственных нужд.

ТЭС выполнена на базе дизель-электроагрегата. Схема малой ТЭС приведена на рис.

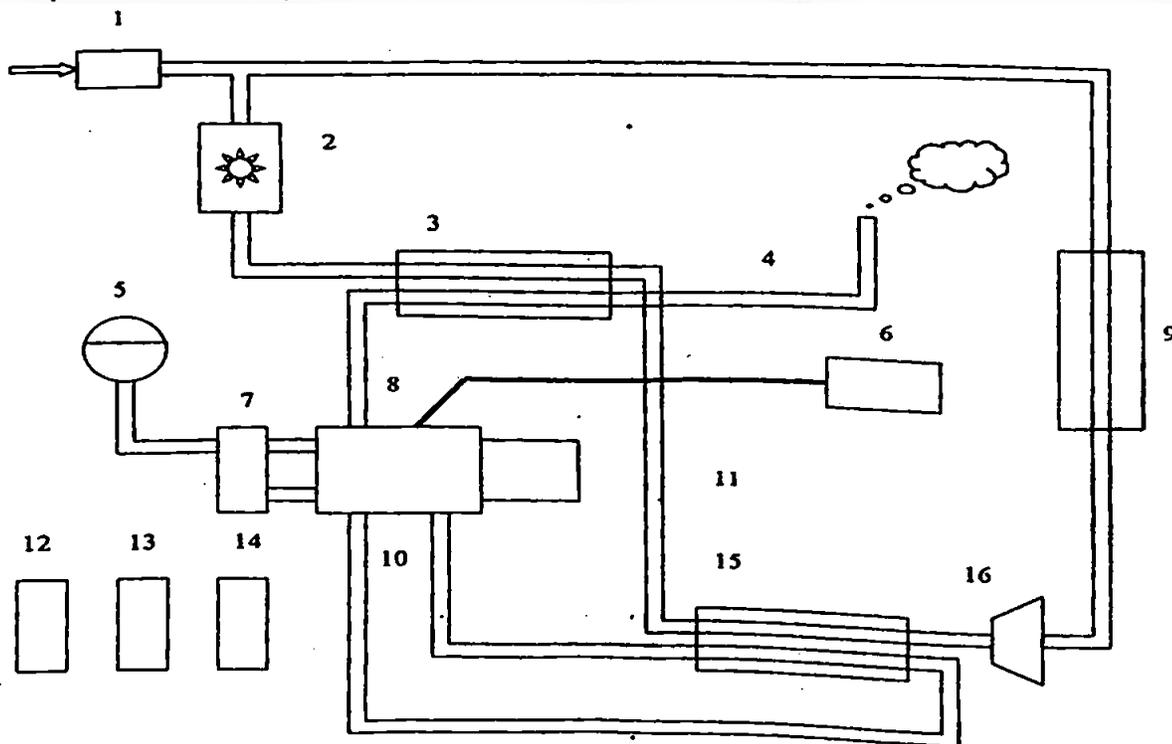


Рис. Структурная схема малой когенирующей электростанции  
 1 - заливочное устройство, 2 - электронагреватель, 3 - газо-водяной теплообменник, 4 - выхлопная труба, 5 - расширитель, 6 - топливный бак, 7 - радиатор, 8 - дизель-генератор, 9 - система отопления, 10 - первый контур, 11 - второй контур, 12, 13, 14 - щиты управления, 15 - водо-водяной теплообменник, 16-насос

Электроэнергия вырабатывается синхронным генератором, приводимым во вращение дизельным двигателем. Станция снабжена устройствами регулирования напряжения и частоты, защиты и индикации, а также управления двигателем.

Тепловая энергия вырабатывается посредством утилизации тепловых потерь - отбора тепла от дизельного двигателя (рубашки цилиндров) и тепла выхлопных газов и нагрева воды (до 75 °С). Создана двухконтурная система отбора тепла. В первом контуре циркулирует нагретая вода системы охлаждения дизельного двигателя. Посредством водо-водяного теплообменника тепло первого контура передается второму контуру. Циркуляция воды в первом контуре обеспечивается водяным насосом двигателя. Циркуляция воды во втором контуре обеспечивается отдельным водяным насосом. В цепь второго контура введен газо-водяной теплообменник, посредством которого тепло

выхлопных газов передается воде второго контура, нагревая ее дополнительно. Газо-водяной теплообменник представляет собой конструкцию "труба в трубе", где во внутренней трубе проходят горячие выхлопные газы, а в пространстве между трубами - вода второго контура. Производительность тепловой энергии в значительной степени зависит от длины газо-водяного теплообменника. В цепь второго контура введен также электронагреватель, посредством которого может производиться дополнительный электроподогрев воды. Электронагреватель питается от электрогенератора ТЭС и используется в случаях недогрузки генератора внешними электропотребителями при дефиците тепловой мощности. Наличие электронагревателя позволяет гибко управлять нагрузкой агрегата и установить оптимальное соотношение генерируемой электрической и тепловой энергии. Указанная схема выработки тепловой энергии повышает КПД и эффективность станции.

В цепь первого контура введен водо-воздушный охладитель (радиатор) дизельного двигателя, который автоматически включается (вводится в цепь) в случаях повышения температуры воды первого контура, что может иметь место при электрической перегрузке или тепловой недогрузке ТЭС. Первый контур замкнут и снабжен расширителем воды.

Система может работать как при замкнутом втором контуре без потребления воды - с отбором тепла в системе отопления, так и при разомкнутом втором контуре - с отбором нагретой воды для бытовых и производственных нужд. Возможно комбинированное использование тепла при разомкнутом втором контуре как в системе отопления, так и при отборе воды. В случае работы по разомкнутой схеме второго контура контур подсоединяется к водопроводной системе через заливочное устройство, которое автоматически пополняет количество воды в контуре и поддерживает необходимый уровень воды в системе.

ТЭС полностью автоматизирована и не требует постоянного контроля и обслуживания. Решен вопрос шумозащиты посредством соответствующей установки агрегата и оборудования помещения. Накоплен определенный положительный опыт эксплуатации ряда образцов указанной ТЭС на некоторых объектах в Армении.

Параметры разработанной ТЭС приведены в таблице.

Масса дизель-электроагрегата 800 кг, габариты 1800x1025x1500.

Технико-экономические характеристики таких малых когенерирующих ТЭС во многом предпочтительнее, чем больших традиционных ТЭС, чему есть следующие объективные обоснования.

Удельная стоимость малых ТЭС составляет величину порядка 500...800 долларов/кВт, в то время как больших стационарных ТЭС - 1500...2500 долларов/кВт. Это объясняется тем, что малые ТЭС изготавливаются в заводских условиях с использованием серийного комплектующего оборудования (двигателя, генератора, низковольтной электроаппаратуры и др.).

Таблица

Параметры номинальные	Газо - водяной теплообменник	
	длиной 1 м	длиной 8 м
Мощность электрическая	16 кВт	16 кВт
Производительность нагретой воды (до 75 °С),	340 л/час	460 л/час
Мощность тепловая	23,7 кВт	32,1 кВт
Мощность тепловая и электрическая	39,7 кВт	48,1 кВт
Расход топлива	4,92 кг/час	4,92 кг/час
Удельный расход топлива на выработку электрической и тепловой энергии	124 г/кВт.час	100,4 г/кВт.час
Коэффициент использования топлива	66%	80%

Себестоимость энергии, вырабатываемой малыми ТЭС, значительно ниже, чем у больших ТЭС, что объясняется следующими обстоятельствами:

- электроэнергия малых ТЭС вырабатывается непосредственно на низком напряжении потребителей (380/230 В), в себестоимость не входит цена преобразования и транспортирования электроэнергии – малые ТЭС устанавливаются в непосредственной близости от потребителей;

- КПД указанной малой ТЭС значительно выше, чем у большой ТЭС, т.к. на малой ТЭС лучше реализована утилизация тепловых потерь;

- для изготовления и эксплуатации малых ТЭС нет необходимости создания вспомогательных объектов и соответствующей инфраструктуры - подстанций, дорог, жилых поселков, хранилищ топлива и др.;
- отсутствуют затраты на природоохранные мероприятия.

Сроки окупаемости малых ТЭС соответственно в несколько раз меньше, чем у больших.

Малые ТЭС обладают рядом преимуществ:

- гибко управляемы, входение в режим и выход из режима занимает несколько минут, соответственно несоизмеримо малы дополнительные потери;

- децентрализованы, соответственно высока их надежность и живучесть в экстремальных ситуациях;

- могут быть предметом персональной частной собственности, когда собственник самостоятельно решает вопросы ее технического обеспечения и эксплуатации, включаясь в процесс энергопроизводства, и быть предметом прибыльного бизнеса.

Электростанции по указанному принципу могут быть выполнены и на сравнительно большие мощности – сотни и тысячи киловатт.

Малые ТЭС являются единственно возможным источником энергии в энергетически неосвоенных регионах (войсковые части, вахтовые производства и т.п.), на автономных объектах (суда, транспортные средства), в качестве аварийных энергоагрегатов.

Однако при всех указанных преимуществах малые ТЭС практически в настоящее время не могут составить реальной конкуренции большим электростанциям на энергетическом рынке, влиять на цены на энергию, быть демополизирующим фактором относительно больших электростанций. Объясняется это относительно небольшим объемом производства энергии малыми электростанциями. Тем не менее малые автономные ТЭС, равно как и малые гидроэлектростанции, могут успешно конкурировать с большими стационарными энергосистемами в пределах локальных объектов и регионов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о целесообразности развития в условиях Армении малой когенерирующей теплоэнергетики, а также производства самих малых когенерирующих ТЭС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ՀՀ Արտոնագիր թիվ 356 «Ջերմաէլեկտրամատակարարման համակարգ», ՄԱԴ<sup>5</sup> F02G 5/04 / Դավիդյան ժ., Դազարյան Ռ., Ումազյան Է., գրանցված 30.07.97.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.06.2000.

**Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ**

### **ՓՈՔԻ ԿՈԳԵՆԵՐԱՑՆՈՂ ՋԵՐՄԱԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐ**

Մշակված են 380Վ, 50՝ց էլեկտրաէներգիայի և տաքացրած ջրի միջոցով մատակարարվող ջերմային էներգիայի համատեղ գեներացնող բարձր ՕԳԳ ունեցող փոքր ջերմաէլեկտրակայաններ:

**J.D. DAVIDYAN**

### **SMALL COGENERATING THERMAL POWER PLANTS**

Small power plants with high efficiency of simultaneously generating electric energy 380 V, 50 Hz and thermal energy by means of heated water is developed.

Г.Л. АРЕШЯН, В.Б. НЕРСИСЯН

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОКАТКИ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛОСЫ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Получены аналитические выражения для ЭДС в измерительных катушках скорости, расположенных на набегающем и сбегающем краях полюсного наконечника. Показано, что разность ЭДС  $E_v$  этих катушек совместно с ЭДС  $E_h$  должна использоваться для измерения в чистом виде скорости прокатки  $V$ . При этом исключается влияние на измеряемую величину толщины прокатки  $h$ .

**Ключевые слова:** магнитное поле, электропроводящая полоса, движение в поле.

**Введение и принцип измерения скорости.** Известные вихретоковые преобразователи (ВТП) применяют для контроля и измерения различных параметров технологических процессов в информационно-измерительных системах. Однако их использование при измерении толщины и скорости прокатки значительно ограничено. Для расширения области применения ВТП осуществим анализ электромагнитного процесса в движущейся со скоростью  $V$  проводящей полосе, расположенной в щелевом зазоре магнитной цепи преобразователя.

Поскольку первичный магнитный поток от МДС токов возбуждения является переменным во времени, то в движущейся проводящей полосе индуцируются два вида ЭДС: трансформаторная и ЭДС движения, а также возникают соответствующие токи и магнитные потоки, которые суммируются с первичным магнитным потоком, ослабляя и деформируя его. Так как в работе рассматриваются линейные уравнения электродинамики, то справедлив принцип суперпозиции при определении влияния токов от трансформаторных ЭДС и токов ЭДС движения. В настоящей работе исследуется реакция токов в полосе, возникающих от ЭДС движения [1].

На рис.1 показаны рабочий зазор магнитной цепи ВТП и закономерность распределения МДС токов полосы по оси направления перемещений. Здесь  $B_0$  - магнитная индукция в зазоре;  $V$  - линейная скорость движения полосы;  $h$  - толщина полосы;  $\delta$  - величина рабочего воздушного зазора ВТП;  $F_z(x)$  - МДС токов в полосе;  $K_1$ ,  $K_2$  - измерительные катушки скорости полосы.

Принимается, что магнитное поле в зазоре плоско-параллельное в аксиальном направлении. Поэтому по всей длине зазора индукция одинакова.

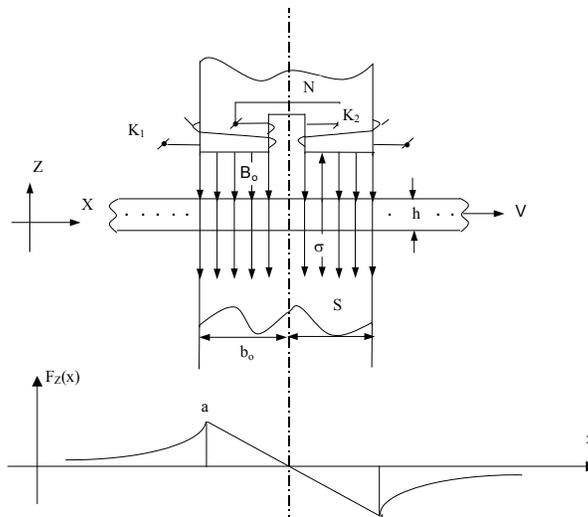


Рис.1

При перемещении полосы в воздушном зазоре со скоростью  $V$  картина направления токов в аксиальном направлении в полосе аналогична картине в обмотке якоря генератора постоянного тока (см.рис.64-7 в [2]). Отличие лишь в том, что вдоль направления движения полосы имеется один полюсный наконечник над ней и один под ней. В результате влияния индуцированных токов в полосе магнитное поле под набегающим краем полюсного наконечника будет ослабляться, а под сбегающим - усиливаться. На рис.2 схематично показана картина линий токов в полосе, если на нее смотреть сверху.

Картина токов учитывает наличие края полосы на расстоянии  $a_0+a_1$  вдоль оси  $Y$ . В направлении отрицательной оси  $Y$  считаем, что размер полосы бесконечно большой (намного больше, чем  $a_0+a_1$ ).

Примем, что магнитное поле возбуждения  $B_0$  в рабочем воздушном пространстве магнитной цепи вдоль оси  $z$  одинаково в пределах всего ее сечения ( $2a_0 \times 2b_0$ ), которое совпадает с геометрией сечения полюсных наконечников. Примем также, что магнитное поле токов  $B_z(x)$  полосы существует практически только в том же сечении  $2a_0 \times 2b_0$  воздушного зазора, имеет только  $z$ -ю составляющую и замыкается через ферромагнитный сердечник полюсных наконечников.

Рассмотрим вначале случай, когда магнитное поле полюсов возбуждения является постоянным  $B_0(x,y,t)=const$ , где  $-b_0 < x < b_0$ ,  $-a_0 < y < a_0$ .

ЭДС движения (по аналогии с ЭДС вращения в электрических машинах) на единицу длины в активной зоне полосы на расстоянии  $x$  от центральной линии  $00$  (рис. 2) будет равна

$$e_v(x) = V l [B_0 + B_z(x)], \quad (1)$$

где  $B_z(x)$  - индукция от токов в полосе.

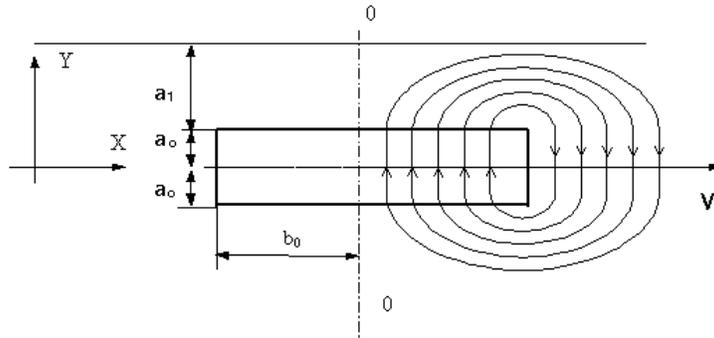


Рис. 2

В первом приближении  $B_z(x)$  можно рассчитать, исходя из токов, которые возникают из-за действия ЭДС движения только от индукции  $B_0$ . Во втором приближении используется формула (1) для расчета токов второго приближения и уточнения  $B_z(x)$  - для расчета в третьем приближении.

Расчет плотностей токов в полосе, возникающих от ЭДС движения, может производиться методом сеточных моделей с учетом геометрии краев полосы размеров полюсных наконечников (здесь не рассматривается). После каждого приближения по токам определяется величина магнитной индукции под полюсными наконечниками. Далее определяются величины магнитных потоков через измерительные катушки скорости  $K_1$  и  $K_2$ , которые охватывают набегающую ( $K_1$ ) и сбегающую ( $K_2$ ) стороны наконечника.

Величина  $\Delta\Phi$  и разница  $\Phi_2 - \Phi_1$  прямо пропорциональна скорости прокатки и  $B_0$  :

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = V B_0 . \quad (2)$$

Задавая с помощью обмотки возбуждения переменное во времени магнитное поле

$$B_0(t) = B_{0m} \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

получаем возможность за счет величины ЭДС в измерительных катушках  $K_1$  и  $K_2$ , включенных встречно, измерить скорость  $V$  движения полосы прокатки.

**Упрощенный аналитический расчет по первому приближению.** Рассмотрим трубку с током на расстоянии  $x$  от центральной оси полюсного наконечника (рис.2) сечением  $hdx$ . Активная длина такой трубки равна  $2a_0$ , и в ней имеется ЭДС :

$$e_y(x) = V 2a_0 B_0 . \quad (4)$$

Полная длина такой трубки будет (рис.3)

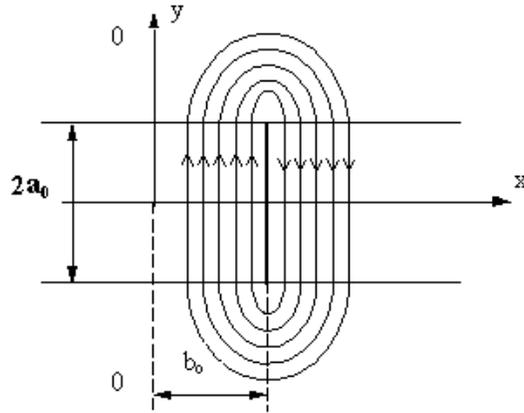


Рис. 3

$$l(x) = 2a_0 + 2\pi r_n + 2a_0, \quad (5)$$

где  $r_n$  - радиус закруглений в лобовых частях,  $r_n = b_0 - x$ . Тогда

$$l(x) = 4a_0 + 2\pi(b_0 - x). \quad (6)$$

Активное сопротивление замкнутой трубки будет

$$R(x) = \rho l(x) / h dx. \quad (7)$$

Элементарный ток в трубке будет равен

$$di(x) = \frac{e_y(x)}{R(x)} = V 2a_0 B_0 \frac{h dx}{\rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (8)$$

На единицу длины вдоль оси x получаем величину линейного тока

$$\tau(x) = \frac{di(x)}{dx} = \frac{V 2a_0 h B_0}{\rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (9)$$

Если не учитывать сопротивление лобовых участков, получим

$$\tau_0 = V h B_0 / \rho 2. \quad (10)$$

График  $\tau(x)$  показан на рис.4а.

МДС от тока  $\tau(x)$  будет равна (график рис.4 б)

$$F_z(x) = \tau(x) x. \quad (11)$$

Так как величина воздушного зазора между поверхностями наконечников (в рабочем зазоре ВТП) полюсов везде одинакова и равна  $\delta$  (рис.1), то индукция в зазоре от токов в полосе будет

$$B_z(x) = \mu_0 \frac{F_z(x)}{\delta} = \mu_0 V \frac{2a_0 B_0 h x}{\delta \rho [4a_0 + 2\pi(b_0 - x)]}. \quad (12)$$

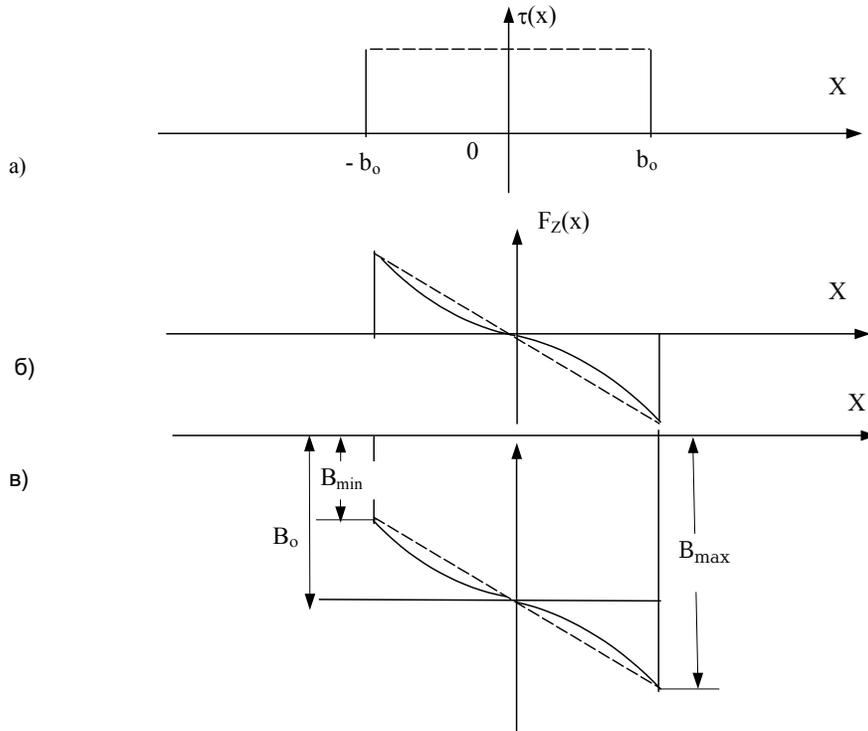


Рис. 4

Полная индукция в зазоре будет (см.рис.4 в)

$$B_{\delta}(x) = B_0 + B_Z(x). \quad (13)$$

Определим магнитный поток через катушку К от токов в полосе:

$$\Delta\Phi = 2a_0 \int_0^{b_0} B_Z(x) dx = \mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{\rho\delta} \int_0^{b_0} \frac{xdx}{4a_0 + 2\pi b_0 - 2\pi x}. \quad (14)$$

Интегрируя, получим

$$\Delta\Phi = -\mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{2\pi\rho\delta} \left[ b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln\left(\frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0}\right) \right]. \quad (15)$$

При питании обмоток возбуждения полюсов переменным током индукция  $B_0$  будет переменной гармонической функцией

$$B_0(t) = B_{0m} \sin(\omega t + \varphi).$$

С учетом этого комплексное действующее значение магнитного потока  $\Delta\dot{\Phi}$  будет

$$\Delta\dot{\Phi} = -\mu_0 V B_0 \frac{(2a_0)^2 h}{2\pi\rho\delta} \left[ b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln\left(\frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0}\right) \right]. \quad (16)$$

Суммарная ЭДС в измерительных катушках  $K_1$  и  $K_2$ , включенных встречно от  $\Delta \dot{\Phi}$  (ЭДС катушек складываются), будет

$$\dot{E}_v = -j\omega 2W_v \Delta \dot{\Phi}, \quad (17)$$

где  $W_v$  - число витков катушек скорости.

Подставляя (16) в (17), получаем окончательно

$$\dot{E}_v = j\omega \mu_0 2W_v Vh \dot{B}_0 \frac{(2a_0)^2}{2\pi r \delta} \left[ b_0 + \frac{2a_0 + \pi b_0}{\pi} \ln \left( \frac{2a_0}{2a_0 + \pi b_0} \right) \right]. \quad (18)$$

Если не учитывать сопротивление лобовых участков ( $2a_0/b_0 \gg 1$ ), формула (18) упрощается и имеет вид [2]

$$\dot{E}_v = -j\omega \mu_0 2W_v Vh \dot{B}_0 \frac{2a_0 b_0^2}{2r\delta\pi}. \quad (19)$$

Из (18) следует, что разница ЭДС в катушках пропорциональна скорости прокатки полосы  $V$  и ее толщине  $h$ .

В работе получено выражение разности ЭДС  $\dot{E}_h$  в измерительных катушках, расположенных на полюсах магнитопроводов ВТП со свободным воздушным зазором и зазором с движущейся полосой, равное

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_h = j\omega W_1 \mu_0 \frac{\pi R_0^2}{a} h \dot{F}_0 \frac{J_2(\beta R_0)}{J_0(\beta R_0)},$$

где  $\dot{F}_0 = W_b \dot{I}_b$  - МДС возбуждения;  $a$  - расстояние между наконечниками;  $R_0$  - эквивалентный радиус наконечников;  $\beta^2 = -j\omega \mu_0 \gamma$  - параметр функций Бесселя;  $W_1$  - витки измерительной катушки на основном магнитопроводе.

$\dot{E}_h$  не зависит в первом приближении от скорости прокатки полосы при условии, что эти измерительные катушки расположены достаточно далеко от полюсных наконечников и в них не проникают магнитные потоки от токов, обусловленных ЭДС движения.

Ввиду того, что выходная ЭДС  $\dot{E}_h$  пропорциональна толщине полосы  $h$ , отношение величины этих ЭДС не зависит от толщины полосы и равно

$$E_h/E_v = AV, \quad (20)$$

где  $A$  - постоянная величина.

По выражению (20) измеряется величина скорости прокатки полосы без влияния толщины прокатки на эту измерительную величину.

**Расчет с учетом второго и других высших приближений.** Примем, что из-за МДС токов в полосе индукция в зазоре имеет вид

$$\Sigma_i = B_0 + B_i(t),$$

где  $B_i(t)$  - индукция  $i$ -го приближения от токов в полосе  $-b_0 \leq X \leq b_0$ .

Без учета влияния токов ( $i=0$ ) имеем  $\Sigma_0 = B_0$ .

ЭДС в активной стороне (длиной  $2a_0$ ) токового витка будет равна (первое приближение)

$$e_1(x) = V2a_0 \Sigma_0 = V2a_0 B_0. \quad (21)$$

Проводимость витка (длиной  $2a_0 + l + 2a_0$ ) равна

$$d\sigma(x) = \frac{hdx}{k\rho 2a_0 2}. \quad (22)$$

Для  $X > 0$  имеем  $k > 1$ , где  $k$  - коэффициент учета возрастания сопротивления из-за лобовых участков.

Обозначим

$$\rho' = k\rho. \quad (23)$$

Ток в витке будет

$$di_1(x) = e_1(x)d\sigma(x) = V2a_0 B_0 \frac{hdx}{\rho' 4a_0} = V \frac{hdx}{2\rho'} B_0. \quad (24)$$

Линейная плотность тока равна

$$\tau_1(x) = \frac{di_1(x)}{dx} = V \frac{hB_0}{2\rho'}. \quad (25)$$

МДС от токов на расстоянии  $X$  от осевой линии равна

$$F_1(x) = \int_0^x di_1(x) = \int_0^x \tau_1(x) dx = \frac{VhB_0}{2\rho'} x. \quad (26)$$

Индукция от этих токов в точке  $X$  будет

$$B_1(x) = \mu_0 \frac{F_1(x)}{\delta} = \mu_0 V \frac{hb_0}{2\rho'\delta} x. \quad (27)$$

Индукция в зазоре будет

$$\Sigma_1(x) = B_0 + B_1(x) = B_0 + \mu_0 V \frac{hb_0}{2\rho'\delta} x. \quad (28)$$

Обозначим

$$\alpha = \mu_0 V \frac{b_0 h}{2\rho'\delta}. \quad (29)$$

Тогда

$$\Sigma_1(x) = B_0 + \alpha B_0 \frac{x}{b_0} = B_0 \left( 1 + \alpha \frac{x}{b_0} \right). \quad (30)$$

Под правой частью наконечника ( $0 \leq X \leq b_0$ ) индукция возрастает. Под левой частью индукция меньше, чем  $B_0$ .

Второе приближение получим, если используем выражение (30) вместо (21):

$$e_2(x) = V2a_0 \Sigma_1(x) = V2a_0 B_0 \left( 1 + \alpha \frac{x}{b_0} \right). \quad (31)$$

Ток в витке будет

$$\begin{aligned}
d_{i_2}(x) &= e_2(x)d\sigma(x) = V2a_0B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0}\right)\frac{hdx}{4\rho'a_0} = \\
&= V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0}\right)dx.
\end{aligned} \tag{32}$$

МДС от токов второго приближения:

$$F_2(x) = \int_0^x di_2(x) = V\frac{hB_0}{2\rho'}\int_0^x\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0}\right)dx = V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0}\right). \tag{33}$$

Индукция от такой МДС:

$$B_2(x) = \mu_0\frac{F_2(x)}{\delta} = \mu_0V\frac{hb_0}{2\rho'\delta}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0}\right). \tag{34}$$

Индукция в зазоре:

$$\begin{aligned}
\Sigma_2(x) &= B_0 + B_2(x) = B_0 + \mu_0V\frac{hb_0}{2\rho'\delta}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0}\right) = \\
&= B_0\left(1 + \mu_0V\frac{b_0h}{2\rho'\delta}\frac{x}{b_0} + \mu_0V\frac{b_0h}{2\rho'\delta}\frac{\alpha x^2}{2b_0}\right).
\end{aligned} \tag{35}$$

С учетом (29) получаем

$$\Sigma_2(x) = B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right). \tag{36}$$

ЭДС третьего приближения будет

$$e_3(x) = V2a_0\Sigma_2(x) = V2a_0B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right). \tag{37}$$

Ток от этой ЭДС будет

$$\begin{aligned}
d_{i_3}(x) &= e_3(x)d\sigma(x) = V2a_0B_0\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right)\frac{hdx}{4\rho'a_0} = \\
&= V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right)dx.
\end{aligned} \tag{38}$$

МДС третьего приближения будет

$$\begin{aligned}
F_3(x) &= \int_0^x di_3(x) = V\frac{hB_0}{2\rho'}\int_0^x\left(1 + \alpha\frac{x}{b_0} + \frac{\alpha^2 x^2}{2b_0^2}\right)dx = \\
&= V\frac{hB_0}{2\rho'}\left(x + \frac{\alpha x^2}{2b_0} + \frac{\alpha^2 x^3}{3!b_0^2}\right)
\end{aligned} \tag{39}$$

или

$$F_3(x) = V \frac{b_0 h B_0}{2\rho'} \left( \frac{x}{b_0} + \frac{\alpha x^2}{2 b_0^2} + \frac{\alpha^2 x^3}{3! b_0^3} \right). \quad (40)$$

Индукция

$$B_3(x) = \mu_0 \frac{F_3(x)}{\delta} = \mu_0 V \frac{B_0 h b_0}{2\rho' \delta} \left( \frac{x}{b_0} + \frac{\alpha x^2}{2 b_0^2} + \frac{\alpha^2 x^3}{3! b_0^3} \right).$$

С учетом (29) имеем

$$B_3(x) = B_0 \left[ \alpha \left( \frac{x}{b_0} \right) + \frac{\alpha^2}{2!} \left( \frac{x}{b_0} \right)^2 + \frac{\alpha^3}{3!} \left( \frac{x}{b_0} \right)^3 \right]. \quad (41)$$

Тогда суммарная индукция будет

$$\Sigma_3(x) = B_0 + B_3(x) = B_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{x}{b_0} \right) + \frac{\alpha^2}{2!} \left( \frac{x}{b_0} \right)^2 + \frac{\alpha^3}{3!} \left( \frac{x}{b_0} \right)^3 \right]. \quad (42)$$

Обозначив

$$\eta = \alpha x / b_0, \quad (43)$$

получим

$$\Sigma_3(x) = B_0 \left( 1 + \eta + \frac{1}{2!} \eta^2 + \frac{1}{3!} \eta^3 \right). \quad (44)$$

При большом числе приближений получим

$$\Sigma_\infty(x) = B_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\eta^k}{k!} = B_0 e^\eta = B_0 e^{\alpha \frac{x}{b_0}}. \quad (45)$$

Ряд сходится для любого значения  $\eta$ .

Если  $\alpha=0,1$ , то  $\Sigma_\infty(X=1)=1,1051708B_0$ ,  $\Delta=0,105$ ;

$$\Sigma_\infty(X=-1)=0,9048374B_0, \Delta=-0,095.$$

Поток под правой половиной полюсного наконечника будет

$$\Delta\Phi_\Pi = 2a_0 \int_0^{b_0} \Sigma_\infty(x) dx = 2a_0 B_0 \int_0^{b_0} e^{\alpha \frac{x}{b_0}} dx = 2a_0 B_0 \frac{b_0}{\alpha} (e^\alpha - 1). \quad (46)$$

Поток под левой половиной полюса будет

$$\Delta\Phi_\wedge = 2a_0 \int_{-b_0}^0 \Sigma_\infty(x) dx = 2a_0 B_0 \int_{-b_0}^0 e^{\alpha \frac{x}{b_0}} dx = B_0 \frac{2a_0 b_0}{\alpha} B_0 (1 - e^{-\alpha}). \quad (47)$$

Итак, суммарный магнитный поток под правой половиной полюсного наконечника (где поток увеличивается из-за токов в полосе) определяется выражением (46), а под левой половиной (где поток ослабляется из-за токов в полосе) - выражением (47).

ЭДС в измерительной катушке скорости  $K_1$  (слева) будет

$$\dot{E}(K_1) = -j\omega W_V \Delta \dot{\Phi}_\lambda = -j\omega W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha}. \quad (48)$$

ЭДС в измерительной катушке скорости  $K_2$  (справа) будет

$$\dot{E}(K_2) = -j\omega W_V \Delta \dot{\Phi}_\Pi = -j\omega W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{e^\alpha - 1}{\alpha}. \quad (49)$$

При согласованном включении катушек ЭДС будет

$$\dot{E}_{\text{согл}} = \dot{E}(K_1) + \dot{E}(K_2) = -j\omega 2W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{\text{sh}\alpha}{\alpha}. \quad (50)$$

При встречном включении катушек скорости получим

$$\dot{E}_{\text{встр}} = \dot{E}(K_1) - \dot{E}(K_2) = -j\omega 2W_V 2a_0 b_0 \dot{B}_0 \frac{1 - \text{ch}\alpha}{\alpha}. \quad (51)$$

**Заключение.** На основании исследования электромагнитных процессов в зазоре ВТП при прокатке проводящей полосы получены аналитические выражения для ЭДС в измерительных катушках скорости, расположенных на набегающем и сбегающем краях полюсного наконечника.

Показано, что разность ЭДС  $E_v$  этих катушек совместно с ЭДС  $E_h$  должна использоваться для измерения в чистом виде скорости прокатки  $V$ . При этом исключается влияние на измеряемую величину толщины прокатки  $h$ . Разработка микропроцессорного блока к ВТП позволяет производить раздельное измерение двух взаимно-связанных электромагнитных параметров скорости  $V$  и толщины  $h$  прокатываемой полосы. В результате резко повышается эффективность использования ВТП для контроля технологических параметров процесса прокатки листов, полосы, фольги или других токопроводящих прокатываемых материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арешян Г.Л., Нерсисян В.Б.** Определение толщины проводящей пластины в зазоре магнитной цепи вихретокового преобразователя // Изв НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2001. - Т 54, <sup>1</sup> 1.- С. 67-75.
2. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. - М.: Энергия, 1980. - 928 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 30.11.2000.

**Գ.Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ, Վ.Բ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ**

**ՀԱՂՈՐԴԻՉ ԺԱՊԱՎԵՆԻ ԳԼԱՆՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՄՐՐԿԱՀՈՍԱՆՔԱՅԻՆ  
ԵՂԱՆԱԿՈՎ**

Ուսումնասիրվում են էլեկտրամագնիսական գործընթացները մրկահոսանքային ձևափոխիչի օդային բացակում, որում առկա է գլանվող հաղորդիչ ժապավեն: Ստացվել են վերլուծական արտահայտություններ բևեռային վերջնամասին մոտեցման և նրանից հեռացման եզրերում տեղակայված արագության չափիչ փաթույթների սեղմակների էլշու-ի համար: Ցույց է տրված, որ ժապավենի շարժման արագությունը չափելիս անհրաժեշտ է նշված փաթույթների  $E_v$  էլշու-ի հետ համատեղ օգտագործել նաև  $E_h$  էլշու-ն: Այս դեպքում բացառվում է գլանվածքի հաստության ազդեցությունը չափվող արագության վրա:

**G.L. ARESHYAN, V.B. NERISSYAN**

**DEFINITION OF A ROLLING SPEED OF A CONDUCTIVE BELT USING EDDY-CURRENT  
METHOD**

Electromagnetic processes are investigated in the air gap of eddy-current transducer, in which a rolling conductive belt is available. Analytic relations are obtained for the e.m.f. of speed measuring winding terminals installed in approaching to and removing from pole edge. It is proved that the difference of these winding e.m.f.  $E_v$  should be used simultaneously with e.m.f.  $E_h$  for measuring the speed of rolling, excluding the influence on measurable quantity of the rolling thickness  $h$ .

Г. К. КАРАПЕТЯН, М. А. АРАМЯН

## ОБ УСРЕДНЕНИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

На основе известного определения усреднения физических величин установлена связь между параметрами усредненного поля неоднородной среды и поля внутри включения. Для средней диэлектрической проницаемости неоднородных систем регулярных структур получено общее соотношение, которое применимо для включений любой геометрической формы.

**Ключевые слова:** включение, усреднение, диэлектрическая проницаемость, напряженность электрического поля.

Неоднородные среды, к которым относятся композиционные, зернистые и волоконные материалы, различные смеси, неоднородные проводники и т.д., имеют широкое применение в технике. Изучению электромагнитных, тепловых, диффузионных и других свойств неоднородных материалов при применении различных физических полей посвящено большое количество работ, в которых предложены различные методы, эмпирические и полумпирические формулы. Их публикация продолжается до сих пор [1-6]. Для определения усредненных параметров неоднородных материалов необходимо вычислить физические поля внутри всех составляющих этих материалов, после чего перейти к усредненным средам. Очевидно, что эта задача очень сложна, и для ее решения необходимы данные о структуре неоднородного материала, ориентировании и распределении всех его составляющих.

В статье предлагается метод, позволяющий произвести усреднение в неоднородной двухкомпонентной среде и получить уравнения состояния среды. Известно, что ряд различных физических процессов характеризуется уравнением вида

$$\vec{Q} = \lambda \vec{F}, \quad (1)$$

где  $\vec{Q}$  и  $\vec{F}$  – определенные векторные величины;  $\lambda$  – коэффициент переноса или другой параметр материала (теплопроводность, электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость, диффузия).

Уравнением такого вида описывается связь: вектора электрического смещения и напряженности электрического поля; плотности электрического тока и напряженности электрического поля; магнитной индукции и напряженности магнитного поля и т.д. Если  $\vec{Q}$  и  $\vec{F}$  – тензорные поля, то под обобщенной проводимостью  $\lambda$  следует понимать тензоры модулей упругости, коэффициент теплового расширения и т.д. [3].

Предположим, имеем двухкомпонентную неоднородную среду с параметрами  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , к которой приложена обобщенная однородная сила  $\vec{F}_0$ . Усредненный параметр  $\langle \lambda \rangle$  этой системы, согласно (1), будет

$$\langle \lambda \rangle = \frac{|\langle \vec{Q} \rangle|}{|\langle \vec{F} \rangle|}, \quad (2)$$

где усреднения проводятся согласно определению Лоренца.

Если рассматриваемая среда диэлектрическая, то среднее значение ее диэлектрической проницаемости будет равно

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\left| \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \vec{D}_M dv \right|}{\left| \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \vec{E}_M dv \right|} = \frac{|\langle \vec{D} \rangle|}{|\langle \vec{E} \rangle|}. \quad (3)$$

Усредненный параметр неоднородной системы определяется в два этапа. На первом этапе изучается распределение поля в компонентах системы с учетом граничных условий. На втором этапе методом наложения полей определяется среднее поле. Применим вышеназванный метод к исследуемой двухкомпонентной системе. В случае, когда относительная диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды ( $i=1$ , для усредненного электрического вектора смещения получим

$$\langle \vec{D} \rangle = \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \vec{D} dv = \frac{1}{V_0} \left[ \int_{V_1} \vec{D} dv + \int_{V_2} \vec{D} dv \right], \quad (4)$$

где  $V_2$  – объем включений в физически бесконечно малом объеме  $V_0$ ;  $V_1$  – соответственно, объем дисперсионной среды внутри  $V_0$ .

В области  $V_1$   $\vec{D}_1 = \varepsilon_0 \vec{E}_1$ , а в  $V_2$  –  $\vec{D}_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}_2$ . Тогда уравнение (4) примет вид

$$\langle \vec{D} \rangle = \frac{1}{V_0} \int_{V_1} \varepsilon_0 \vec{E}_1 dv + \frac{1}{V_0} \int_{V_2} \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}_2 dv. \quad (5)$$

Так как рассматриваются линейные среды, то напряженность поля в любой точке пространства будет

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p, \quad (6)$$

где напряженность поля поляризации, как известно из [7], равна

$$\vec{E}_p = -\frac{1}{\varepsilon_0} \vec{P}.$$

В области  $V_1$  имеем

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 + \vec{E}_{p1} = \vec{E}_0 - \frac{1}{\varepsilon_0} \vec{P}_1 = \vec{E}_0, \quad (7)$$

так как  $\vec{P}_1 = 0$  ( $\varepsilon_1 = 1$  вакуум).

Известно, что в неоднородных системах регулярных структур при внешнем однородном поле включения поляризуются одинаково и однородно. Тогда напряженность внутри включений  $\vec{E}_2$  будет постоянная.

Уравнение (5) с учетом (7) примет вид

$$\begin{aligned} \langle \vec{D} \rangle &= \frac{1}{V_0} \int_{V_1} \varepsilon_0 \vec{E}_0 dv + \frac{1}{V_0} \int_{V_2} \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}_2 dv = \frac{V_1}{V_0} \varepsilon_0 \vec{E}_0 + \frac{V_2}{V_0} \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}_2 = \\ &= f_1 \varepsilon_0 \vec{E}_0 + f_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}_2 = (1 - f_2) \varepsilon_0 \vec{E}_0 + f_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}_2, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $f_2$  - относительная объемная концентрация включений,  $f_1 + f_2 = 1$ .

Теперь определим среднее значение напряженности поля. Усредняя уравнение (6), для  $\langle \vec{E} \rangle$  получим

$$\langle \vec{E} \rangle = \langle \vec{E}_0 \rangle + \langle \vec{E}_p \rangle, \quad (9)$$

где  $\langle \vec{E}_0 \rangle = \vec{E}_0$ , так как внешнее поле однородное.

А для  $\langle \vec{E}_p \rangle$ , по определению (2), получим

$$\begin{aligned} \langle \vec{E}_p \rangle &= \frac{1}{V_0} \int_{V_0} \vec{E}_p dv = \frac{1}{V_0} \left( \int_{V_1} \vec{E}_p dv + \int_{V_2} \vec{E}_p dv \right) = \\ &= -\frac{1}{V_0} \left( \int_{V_1} \frac{\vec{P}_1}{\varepsilon_0} dv + \int_{V_2} \frac{\vec{P}_2}{\varepsilon_0} dv \right) = -\frac{1}{V_0 \varepsilon_0} \int_{V_2} \vec{P}_2 dv = -\frac{V_2}{V_0 \varepsilon_0} \vec{P}_2 = f_2 \vec{E}_{p2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая, что  $\vec{E}_{p2} = \vec{E}_2 - \vec{E}_0$ , для  $\langle \vec{E} \rangle$  окончательно получим

$$\langle \vec{E} \rangle = \vec{E}_0 + f_2 (\vec{E}_2 - \vec{E}_0) = (1 - f_2) \vec{E}_0 + f_2 \vec{E}_2. \quad (11)$$

Подставляя (8) и (11) в (3), можем представить усредненную относительную диэлектрическую проницаемость исследуемой среды как функцию, зависящую только от напряженности поля внутри включения

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{|(1 - f_2) \vec{E}_0 + f_2 \varepsilon_2 \vec{E}_2|}{|(1 - f_2) \vec{E}_0 + f_2 \vec{E}_2|}. \quad (12)$$

После преобразований уравнение (12) примет вид

$$\langle \varepsilon \rangle = 1 + \frac{|(\varepsilon_2 - 1) f_2 \vec{E}_2|}{|f_2 \vec{E}_2 + (1 - f_2) \vec{E}_0|}. \quad (13)$$

В случае, когда относительная диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды  $\varepsilon_1 \neq 1$ , после соответствующих преобразований [1] уравнение (13) примет вид

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{|(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) f_2 \vec{E}_2|}{|f_2 \vec{E}_2 + (1 - f_2) \vec{E}_0|}. \quad (14)$$

Таким образом, рассчитав напряженность поля только внутри включений, можно определить усредненную диэлектрическую проницаемость неоднородной среды. Необходимо также отметить, что выведенное соотношение (14) применимо для двухкомпонентной системы с периодической структурой и включениями любого вида без никаких ограничений на величину концентрации включений  $f_2$ . Для неоднородных же сред с регулярной структурой коэффициент  $\langle \lambda \rangle$  ( $\langle \varepsilon \rangle$ ,  $\langle \mu \rangle$ , ...) в уравнениях состояния среды [2,3] периодичен и не является функцией от пространственных координат.

В качестве примера приведем вывод формулы для расчета средней диэлектрической проницаемости неоднородных материалов со сферическими включениями. Сначала рассмотрим случай  $f_2 \ll 1$ , когда можно пренебречь взаимодействием между включениями. При этом напряженность поля внутри включения определяется выражением

$$\bar{E}_2 = \frac{3\varepsilon_1 \bar{E}_0}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получим известную формулу Максвелла–Лоренца [1]

$$\langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 + 2f_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 - f_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}. \quad (16)$$

Теперь рассмотрим неоднородную среду при высоких объемных концентрациях, когда следует учесть дипольные взаимодействия. Известно, что в этом случае напряженность поля внутри включений равна [4]

$$\bar{E}_2 = \frac{3\varepsilon_1 \bar{E}_0}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 - f_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}. \quad (17)$$

Подставляя (17) в (14), для средней диэлектрической проницаемости неоднородных материалов регулярных структур получим новую формулу

$$\langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_1 \frac{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 + f_2(1 + f_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1 - f_2(2 - f_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}. \quad (18)$$

Эта формула удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к теории смесей. Действительно, в теоретической схеме отсутствуют внутренние противоречия, так как результат основан на уравнении поля, удовлетворяет граничным условиям  $f_2=0 \langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_1$ ,  $f_2=1 \langle \varepsilon \rangle = \varepsilon_2$ , имеет место хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными данными в широком диапазоне концентрации включений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нетушил А.В.** Модели электрических полей в гетерогенных средах нерегулярных структур // Электричество.–1975.– 10.– С. 1-8.
2. **Санчес-Паленсия Э.** Неоднородные среды и теория колебаний.–М.: Мир,1984. – 530 с.
3. **Дульнев Г.Н., Новиков В.В.** Процессы переноса в неоднородных средах. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 470 с.

4. **Карапетян М.А.** Исследование электрического поля в неоднородной среде.- Ереван: Айастан, 1990. –216 с.
5. **Арамян М.А.** Расчет потенциальных полей и средних параметров дисперсных систем регулярных структур с различными формами включений // Электричество.–1997.–<sup>1</sup> 2. – С. 64-69.
6. **Арамян М.А., Симонян В.С., Карапетян Г.К.** Энергия поляризации дисперсной фазы неоднородной системы как функция от своего параметра // Изв.НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.–2000.–Т.53, <sup>1</sup> 1. – С. 59-63.
7. **Стреттон Дж. А.** Теория электромагнетизма.– М.; Л.: Изд. техн.–теор. лит., 1948.– 535 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.07.1999.

**Գ.Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Մ.Ա. ԱՐԱՄՅԱՆ**

**ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ՊՈՏԵՆՑԻԱԼԱՅԻՆ ԴԱՇՏԵՐԻ**

**ՄԻՋԻՆԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ**

Օգտվելով ֆիզիկական մեծությունների միջինացման հայտնի սահմանումից, կապ է հաստատվել անհամասեռ համակարգի միջինացված դաշտի և ներառման ներքում դաշտի պարամետրերի միջև: Պարբերական կառուցվածքով անհամասեռ համակարգերի միջին դիէլեկտրիկական թափանցելիության համար ստացվել է ընդհանուր առնչություն, որը կիրառելի է ցանկացած երկրաչափական ձև ունեցող ներառումների համար:

**G .K. KARAPETYAN, M. A. ARAMYAN**

**ON AVERAGING POTENTIAL FIELDS IN**

**INHOMOGENEOUS MEDIA**

Using the known definition of averaging the physical values, a relation between the parameters of averaging fields in inhomogeneous environment and fields inside the inclusion is established. The general relationship being applicable for any inclusions having arbitrary geometrical forms is obtained for average dielectric permittivity of inhomogeneous systems with periodic structures.

Г.В. БЕРБЕРЯН

## К АНАЛИЗУ ВЛИЯНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ПОЛЮСОВ РОТОРА НА АСИММЕТРИЮ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Рассматривается проблема влияния формы огибающей поверхности полюсов ротора на асимметрию воздушного зазора в гидрогенераторах. Результатом проведенного анализа, с одной стороны, является подробное описание случайного процесса распределения воздушного зазора, с другой - доказательство возможности оценки эксцентриситетов ротора и статора в условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** эксцентриситет, асимметрия, огибающая полюсов, воздушный зазор, ротор, статор.

Известно, что асимметрия воздушного зазора наряду с коротким замыканием (к.з.) в обмотках возбуждения вызывает асимметрию магнитного поля, что является причиной ряда нежелательных последствий, ведущих к аварийному исходу в случае их несвоевременного обнаружения и ликвидации вызвавших их причин [1-3]. Причина указанной асимметрии – искажения правильных форм расточки статора и огибающей полюсов ротора, результат совместного действия которых принято рассматривать на основе принципа наложения. В связи с этим для исследования указанного влияния следует четко представить модель анализа, состоящую из ротора и статора. В данном случае очевидными являются допущения идеальности статора в виде цилиндра правильной формы без зубцов и пазов, искажения огибающей полюсов в виде поверхности эллипсоида [3] и наличия эксцентриситетов статора и ротора относительно центра вращения ротора (рис.1).

В принятой модели (рис.1а) ротор можно представить в виде поперечного сечения, перпендикулярного его геометрической оси и ограниченного снаружи эллипсом, жестко связанные друг с другом большая и малая оси которого в общем случае в начальный момент могут быть ориентированы в пространстве случайным образом в пределах от нуля до  $2\pi$  рад к горизонтальной (или вертикальной) оси статора.

На рис.1а случайным образом изображены три положения большой оси указанного эллипса -  $aa_1$ ,  $bb_1$ ,  $cc_1$  так, что положение  $aa_1$  ориентировано вдоль вертикальной оси окружности  $l$  с центром в точке  $O_1$ , а два других -  $bb_1$  и  $cc_1$  - под одинаковым углом наклона, но в противоположных направлениях от вертикали.

Эксцентриситет ротора относительно его же центра  $O$  равен  $d_2$ . Центр вращения  $O$  может занять произвольное положение вдоль окружности со случайным радиусом  $d_1$  и центром в точке  $O_1$ , а центр  $O_2$  - вдоль окружности со случайным радиусом  $d_2$  и центром в точке  $O$ .

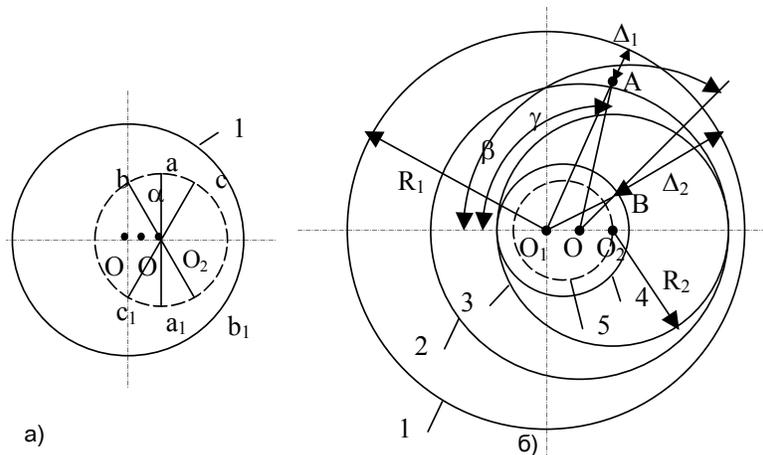


Рис.1

Нетрудно заметить, что центры  $O_1$  и  $O$  в любом случае будут расположены на диаметре статора, а центр  $O_2$ , в силу его вращения вокруг центра  $O$ , дважды в течение одного полного поворота ротора также окажется расположенным на том же диаметре вместе с центрами  $O_1$  и  $O$  со смещением влево или вправо от центра  $O$ . Очевидно, что в смысле наибольших приближений точек  $a$ ,  $b$  или  $c$  к внутренней поверхности статора, имеющих отношение к асимметрии воздушного зазора, из вышеуказанных двух положений центра  $O_2$  наиболее критичным будет то, которое окажется вправо от  $O$ , поскольку в этом случае вращающаяся вокруг центра  $O$  точка  $O_2$  окажется наиболее удаленной от центра  $O_1$ . Таким образом, из приведенного рассмотрения случайного процесса ориентации центров  $O_1, O$  и  $O_2$  относительно друг друга следует, что ориентация, указанная на рис.1а, является представительной для произвольного случая. Кроме того, поскольку число пар полюсов ротора  $P$  является целым, то при одинаковом шаге между ними они оказываются попарно размещенными на противоположных концах различных диаметров, повернутых друг к другу на одинаковый угол  $\alpha$  (рис.1 а).

Из-за эллипсности поперечного сечения длины указанных диаметров будут распределены случайным образом между наибольшим и наименьшим значениями для данного ротора, приписываемыми большой и малой осям эллипса соответственно. Поэтому при вращении центра  $O_2$  вокруг  $O$  конечные точки, например,  $a$  и  $a_1$ ,  $b$  и  $b_1$  и др., изображающие вершины полюсов в их огибающей наружной поверхности, получают максимальное и минимальное приближения к расточке статора (рис.1 а).

Что касается наибольшего и наименьшего значений осей указанного эллипса, то их можно распознать во время пусконаладочных операций

путем поочередной установки подходящих измерительных средств на всех парах противоположных полюсов и измерения воздушного зазора под ними по принятой процедуре. После обнаружения наибольшего значения большой оси эллипса указанное измерительное средство может продолжать функционировать в составе общей информационно-измерительной системы (ИИС). Необходимость в указанной идентификации очевидна, т.к. априорно определить большую ось эллипса невозможно, а ее распознавание с помощью средств, установленных на всех полюсах, связано с удорожанием и усложнением ИИС и поэтому неприемлемо.

Следует также отметить, что указанную процедуру необходимо провести для обоих крайних сечений ротора - верхнего и нижнего, т.к. из-за определенной прецессии ротора существует разница в асимметрии воздушного зазора, достигающая максимального значения на этих уровнях.

Рассмотрим изменение воздушного зазора на основе рис.1 а, откуда следует, что если большая ось эллипса совпадет с отрезком  $aa_1$ , то ее крайние точки  $a$  и  $a_1$  будут вращаться вокруг центра  $O$  с одинаковыми радиусами  $r_1 = Oa = Oa_1$ . Удаления этих точек от расточки статора будут одинаковыми, причем максимальное удаление возникнет тогда, когда  $Oa$  займет левое, а минимальное - правое горизонтальные положения. В случае других исходных направлений большой оси, например, совпадающих с направлением отрезков  $bb_1$  или  $cc_1$ , точки  $b$  и  $b_1$  или  $c$  и  $c_1$  будут вращаться с разными радиусами  $r_{2B} = O_B < r_{2B1} = O_{B1}$  и  $r_{3C} = O_C > r_{3C1}$  соответственно.

На рис.1б изображено пять окружностей, причем окружность 1 представляет расточку статора, 2 - траекторию движения точек  $b_1$  или  $c$ , 3 - траекторию движения точек  $a$  или  $a_1$  вокруг центра  $O_2$ , 4 - траекторию движения точек  $b$  или  $b_1$  вокруг центра  $O$ , 5 - траекторию движения геометрического центра  $O_2$  вокруг центра вращения  $O$ , а расположение этих окружностей относительно друг друга следует из результатов предварительного анализа.

Для определения минимальных и максимальных приближений двух характерных точек к статору, например,  $b$  и  $b_1$ , при вращении вокруг центра  $O$  достаточно воспользоваться соотношениями, следующими из рис.1 б. При произвольном положении точки  $b_1$  на окружности 2 в точке  $A$  и точки  $B$  на окружности 4 радиальные длины воздушных зазоров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  будут соответственно равны

$$\Delta_1 = R_1 - O_1A = R_1 - \sqrt{d_1^2 + (R_2 + d_2)^2 - 2d_1(R_2 + d_2)\cos\gamma} \quad \text{и}$$

$$\Delta_2 = R_1 - O_1B = R_1 - \sqrt{d_1^2 + (R_2 - d_2)^2 - 2d_1(R_2 - d_2)\cos\beta},$$

где  $R_1$  - радиус расточки статора, а  $R_2$  - большая полуось эллипса.

Минимальные и максимальные значения  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  можно найти из экстремумов  $O_1 A$  и  $O_1 B$  по аргументам  $\gamma$  и  $\beta$ , изменяющимся периодически в пределах от нуля до  $2\pi$  рад, в следующем виде:

$$\Delta_{1\max} = R_1 - R_2 + (d_1 - d_2), \quad (1)$$

$$\Delta_{1\min} = R_1 - R_2 - (d_1 + d_2), \quad (2)$$

$$\Delta_{2\max} = R_1 - R_2 + (d_1 + d_2), \quad (3)$$

$$\Delta_{2\min} = R_1 - R_2 + (d_2 - d_1). \quad (4)$$

Полученные выражения (1) - (4) образуют систему уравнений, в которых левые части представляют собой измеряемые (известные), а правые - неизвестные величины  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $d_1$  и  $d_2$ , причем вычитания (2) из (3) и (1) из (4) приводят к новой системе уравнений, содержащей только искомые неизвестные  $d_1$  и  $d_2$ :

$$\begin{cases} \Delta_{2\max} - \Delta_{1\min} = 2(d_1 + d_2), \\ \pm \Delta_{2\min} \mp \Delta_{1\max} = 2(\pm d_2 \mp d_1). \end{cases} \quad (5)$$

Легко заметить, что  $\Delta_{2\max}$  и  $\Delta_{1\min}$  - это наибольшее и наименьшее из измеренных значений  $\Delta_2$  и  $\Delta_1$  соответственно, а  $\Delta_{2\min}$  и  $\Delta_{1\max}$  образуют равные по модулю разности, причем, если модуль равен нулю, то

$$d_1 = d_2 = (\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min}) / 2, \quad (6)$$

если  $\Delta_{2\min} \neq \Delta_{1\max}$ , то при  $\Delta_{2\min} > \Delta_{1\max}$  значения  $d_1$  и  $d_2$  равны

$$d_1 = (\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min} - \Delta_0) / 4, \quad (7)$$

$$d_2 = (\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min} + \Delta_0). \quad (8)$$

В случае, если  $\Delta_{1\max} > \Delta_{2\min}$ , значение  $d_1$  определяется из (8), а  $d_2$  из (7), причем

$$\Delta_0 = |\Delta_{2\max} - \Delta_{1\min}|. \quad (9)$$

Отсюда следует, что система уравнений (5) и ее решения полностью определяют относительно простой алгоритм идентификации эксцентриситетов  $d_1$  и  $d_2$  статора и ротора при вышеуказанных допущениях. Для расточки статора, отличающейся от идеальной произвольными искажениями формы, идентификацию эксцентриситетов можно произвести лишь на основе вероятностных оценок при известном законе (или плотности) распределения погрешности, возникающей при измерении воздушного зазора.

Согласно предельной теореме вероятностей, указанные погрешности распределены по нормальному закону, значение среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  которого можно определить на основе опытных данных. Дело в том, что при пусконаладочных работах производят измерение длины воздушного зазора под всеми полюсами с максимальной погрешностью  $\delta_{\max} = \pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  [2]. А т.к. при указанном выше распределении  $\delta_{\max} = 3\sigma$  (при вероятности  $P=0,97$ ), то отсюда следует, что  $\sigma = \delta_{\max} / 3$ , а значения  $d_1$  и  $d_2$  можно оценить по выражениям

(7) и (8), добавив к ним либо  $\pm\rho=2\sigma/3$  при  $P=0,5$  для вероятной погрешности  $\rho$ , либо  $\delta=2\sigma$  при  $P=0,95$  для средней погрешности, либо  $\pm\delta_{\max}=3\sigma$  при  $P=0,97$  для максимальной погрешности.

Таким образом, анализ показал, что контроль асимметрии воздушного зазора гидрогенератора в условиях эксплуатации можно совместить с идентификацией эксцентриситетов ротора и статора, реализуемой с вероятностной оценкой на основе несложного алгоритма обработки результатов измерений. Указанное совмещение двух видов контроля позволяет существенно упростить ИИС и повысить достоверность предсказания причин возникновения и развития магнитной асимметрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль А.А., Нецевский А.Б. Анализ спектра индукции при асимметрии магнитного поля в воздушном зазоре гидрогенераторов // Электричество.- 1981.- <sup>1</sup> 8.- С.13-17.
2. Коваль А.А., Нецевский А.Б. Эксплуатационный контроль асимметрии магнитного поля в воздушном зазоре гидрогенераторов // Энергетика и электрификация.- 1984.- <sup>1</sup> 2.- С. 17-20.
3. Нецевский А.Б., Самородов Ю.Н., Элькинд Ю.М. К анализу причин, признаков и развития начальных дефектов гидрогенераторов // Электрические станции.-1981.- <sup>1</sup> 6.- С. 35-39.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 26.10.1999.

#### Գ.Վ. ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ

#### ՌՈՏՈՐԻ ԲԵՎԵՆՆԵՐԻ ԸՆԴՊԵՐԿՈՂ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅՑԻ ԶԵՎԻ՝ ՀԻՂՈՂԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՕՂԱՅԻՆ ԲԱՑՎԱԾՔԻ ԱՆՀԱՄԱՉԱՓՈՒԹՅՈՒՆ ԱՌԱՋԱՑՆՈՂ ԱՁԴՅՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Հոդվածում դիտարկվում է ռոտորի բևեռներն ընդգրկող մակերևույթի ձևի՝ հիդրոգեներատորի օղային բացվածքի անհամաչափության վրա ունեցած ազդեցության խնդիրը: Կատարված վերլուծության արդյունքը, մի կողմից, հիդրոգեներատորի բևեռների և ստատորի միջև առաջացած օղային բացվածքի բաշխման պատահական ընթացքի մանրակրկիտ նկարագրումն է, մյուս կողմից, ռոտորի ու ստատորի էքսցենտրիսիտետների շահագործման պայմաններում գնահատման հնարավորության ապացույցը:

#### G.V. BERBERYAN

#### ON THE ANALYSIS OF THE ROTOR POLE-PIECE ENVELOPE SURFACE IMPACT EXERTING ON THE HYDROGENERATOR AIR-GAP ASYMMETRY

A problem of rotor pole-piece envelope surface profile effect exerted on the hydrogenerator air-gap asymmetry is discussed. The basic result is, on the one hand, a detailed description of a random process in the air-gap distribution and, on the other hand, possibility to prove rotor and stator eccentricity evaluation based on the experimental data under operating conditions.

М. К. БАГДАСАРЯН

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Рассмотрена задача анализа и оптимизации расходов электроэнергии в технологической линии измельчения при разных технологических ситуациях. Предложены математическая модель, алгоритм решения и пакет программ.

**Ключевые слова:** анализ и оптимизация, энергозатраты, технологическая линия измельчения, платежная матрица.

Расходы электроэнергии в технологической линии измельчения характеризуются следующими особенностями:

- теснота взаимосвязи расходов электроэнергии с качественными и количественными показателями перерабатываемого продукта измельчения;
- нестационарность технологического процесса, обусловленного влиянием различных факторов (влажность руды, организационные неполадки, поступление сырья в неполном объеме), в связи с чем необходимы соответствующие условия переработки;
- цикличность процесса;
- возможность перестройки технологического процесса (изменение коммуникации между операциями и соотношениями объемов работающих мельниц в схеме по стадиям).

Известные работы [1,2], посвященные поискам путей анализа и оптимизации расходов электроэнергии в процессе измельчения [1,2], характеризуются отсутствием комплексного рассмотрения вопроса, что, естественно, не дает требуемого результата.

В настоящей работе предлагается алгоритм для анализа и оптимизации расходов электроэнергии в технологической линии измельчения для разнообразных свойств создаваемой ситуации.

Общие энергозатраты в линии измельчения аккумулируют в себе затраты электроэнергии в операциях с учетом расходов водонасосов на подачу воды (операция измельчения и классификация) и затраты на перекачку пульпы между операциями, которые изменяются в связи с изменением производительности линии и усложнением технологии процесса и схем цепей аппаратов.

Для четкого решения поставленной задачи сформирована модель, в основе которой лежат принципы, согласно чему энергетические показатели каждой операции и между операциями характеризуются определением параметров продукта, выходящего из операций, по известной характеристике входа, числа и типоразмера установленных аппаратов, а также коэффициентов их использования.

В этой связи формализация модели расходов электроэнергии базирована с использованием моделей операций измельчения, классификации и уточнения циркулирующих потоков. Общая структура модели приводится на рис.1, где  $W_M(M)$ ,  $W_{Mk}(C)$ ,  $W_k(K)$ ,  $W_{kM}(A)$  - функциональные зависимости, характеризующие расходы электроэнергии по операциям;  $M(A,B,F)$ ,  $K(C, V)$  - функциональные зависимости процессов измельчения и классификации, составляющие которых имеют вид

$$B = \{d_0, Q_0, R_0, \delta, T_0, \varphi, \psi, \alpha, r, L_M, D_M, d_g, \gamma\}, \quad A = \{R_{Si}, T_{Si}, Q_{Si}, V_M\}, \\ F(\bar{y}), \quad C = \{B_M, R_M, T_M, D_p, H_p, L_p\}, \quad V = \{B_K, V_K, g, L_K, D_K, T_K\},$$

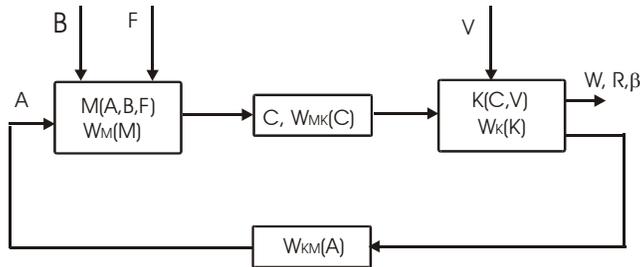


Рис.1. Структурная схема модели формирования расхода электроэнергии

где  $d_0, R_0, Q_0, \delta, T_0, \alpha$  - соответственно, исходный диаметр, содержание класса  $d_0$  по фракциям, подача исходного материала, плотность руды, твердость, содержание металла в исходной руде;  $\varphi, \psi, r, L_M, D_M$  - коэффициент заполнения, скорость вращения, число и типоразмер мельниц;  $d_g, \gamma$  - диаметр и объемная масса стальных шаров;  $F(\bar{y})$  - зависимость, характеризующая состояние электромеханической системы мельница-двигатель [3];  $T_{Si}, R_{Si}$  - твердость и класс крупности  $d$  продукта циркуляции;  $Q_{Si}$  - вес циркулирующего продукта  $i$ -й стадии измельчения;  $V_M$  - масса добавляемой в мельницу воды;  $R_M, T_M$  - содержание класса крупности  $d_M$  и твердость в мельнице;  $B_M, D_p, H_p, L_p$  - соответственно, плотность пульпы, диаметр, высота подачи, длина горизонтальной части трубопровода;  $B_K$  - плотность пульпы в классификаторе;  $T_K$  - твердость в классификаторе;  $g, L_K, D_K$  - число и типоразмер классификатора;  $V_K$  - масса добавляемой в классификатор воды. Следует отметить, что на выходе сформированной модели образуется вектор  $\{w, R, \beta\}$ , характеризующий удельный расход

электроэнергии, массу расходуемой чистой воды, гранулометрический состав и содержание металла измельчаемого материала:

$$w = \frac{1}{Q_0} \left( \sum_{p=1}^{p1} \frac{Q_p H_p Z_{pq} t_{np}}{102 \eta_p} + \sum_{r=1}^{m1} \frac{(1,8\sqrt{2D_r} L_r \psi_r + \gamma_{gr} V_r S_{0r} \sqrt{D_r}) t_{mr} + 3\sqrt{2D_r} L_r \psi_r}{\eta_{\text{eax}} \eta_D} + \sum_{h=1}^{m2} \frac{(1,8\sqrt{2D_h} L_h \psi_h + \gamma_{rh} V_h S_{0h} \sqrt{D_h}) t_{mh} + 3\sqrt{2D_h} L_h \psi_h}{\eta_{\text{eax}} \eta_D} + \sum_{g=1}^{g1} k_{3g} t_{kg} D_{kg} L_{kg} \right),$$

$$\beta = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{1 - R_{ci}}{\left(\frac{Q_{Si}}{Q_0} + 1\right) - \left(\frac{Q_{Si}}{Q_0} + 1\right) R_{ki}}, \quad R = 1 - R_{kn} \left(\frac{Q_{Sn}}{Q_0} + 1\right) - R_{Sn} \frac{Q_{Sn}}{Q_0},$$

где  $Z_{pq}$  - плотность пульпы между операциями  $p$  и  $q$ ;  $k_{3g}$  - коэффициент загрузки электродвигателя приводящего классификатора  $g$ ;  $t_{np}, t_{kg}, t_{mr}, t_{mh}$  - коэффициенты использования, соответственно, пульпонососа, классификатора, мельниц первой и второй стадий;  $\eta_{\text{max}}, \eta_D, \eta_k$  - соответственно, КПД передачи, электродвигателя и насоса;  $S_{or}, S_{oh}$  - безразмерный коэффициент полезной мощности мельниц первой и второй стадий;  $R_{ci}$  - содержание плюсового класса  $i$ -й стадии слива классификатора;  $R_{ki}, R_{kn}$  - содержание плюсового класса, соответственно, на входе классификатора  $i$ -й и  $n$ -й стадий измельчения;  $R_{Si}, R_{Sn}$  - содержание циркулирующего класса  $i$ -й и  $n$ -й стадий измельчения;  $Q_{Si}, Q_{Sn}$  - циркулирующие нагрузки  $i$ -й и  $n$ -й стадий измельчения;  $Q_p, H_p$  - производительность пульпонососа и напор, развиваемый насосом.

Для уточнения циркулирующих параметров минимизируется отклонение циркулирующих параметров между итерациями  $i$  и  $i+1$  (использован алгоритм Нелдера-Мида [4]):

$$\left(\frac{Q_{Si} - Q_{Si-1}}{Q_{Si}}\right)^2 + \left(\frac{T_{Si} - T_{Si-1}}{T_{Si}}\right)^2 + \left(\frac{R_{Si} - R_{Si-1}}{R_{Si}}\right)^2 \rightarrow \min.$$

Полученные результаты позволяют с высокой точностью исследовать энергетические затраты по операциям и сформулировать целевую функцию для оптимальных расходов электроэнергии.

Учитывая, что стратегия управления технологической линией измельчения основана на снижении удельного расхода электроэнергии, увеличении извлечения полезных компонентов из перерабатываемых руд, повышении и стабилизации содержания мелкого класса (-0,08), предъявляются более высокие требования к качеству оптимизации

расходов электроэнергии с учетом параметров, определяющих качественные характеристики режимов работы линии измельчения.

В данной статье предлагается подход к оптимизации потребляемой электроэнергии, основывающийся на учете нескольких важных, помимо электропотребления, критериев оптимизации, в частности, учитывается содержание мелкого класса в сливе  $R$ , содержание металла в продукте  $\beta$ , а также соотношение крупности слива классификаторов по содержанию плюсового класса между стадиями:

$$w(\bar{x}) \rightarrow \min, \quad R(\bar{x}) \rightarrow \max, \quad \beta(\bar{x}) \rightarrow \max,$$

$$D = \left\{ \begin{array}{l} x \in S^n : R_0 > R_{k1} > R_{c1}; R_{ci-1} > R_{ki} > R_{ci}; \\ x_j^- \leq x_j \leq x_j^+, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right\},$$

где  $x_j^-, x_j^+$  - нижнее и верхнее предельные значения для  $j$ -го управляемого параметра.

Учитывая конфликтность требований, предъявляемых к технологической линии измельчения, решается задача нахождения оптимального компромиссного набора технологических параметров.

Для этого применяется теория игры, предметом изучения которой является математический анализ формализованной модели конфликта, учитывающий особенности реальной конфликтной ситуации.

В качестве модели конфликта использована платежная матрица  $\|a_{i\ell}\|$ , которая аккумулирует в себе основные условия задачи оптимизации и представляет собой матрицу значений (потер), показывающую изменение рассматриваемых критериев оптимальности от экстремального во всех возможных наборах технологических параметров:

$$a_{i\ell} = \left| \frac{F_\ell(\bar{x}_k) - F_\ell(\bar{x}_i)}{F_\ell(\bar{x}_k)} \right|,$$

где  $\ell$  - номер рассматриваемого критерия ( $\ell = 1, 2, 3$ );  $i$  - номер набора технологических параметров ( $i=1, 2, \dots, m$ );  $F_\ell(\bar{x}_k)$  - экстремальное значение  $\ell$ -го критерия;  $F_\ell(\bar{x}_i)$  - значение  $\ell$ -го критерия при  $i$ -ом наборе технологических параметров.

Таким образом, задача оптимизации сводится к игре с матрицей

$$\begin{array}{c} 1 \quad 2 \quad \dots \quad m \\ \left\| \begin{array}{cccc} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3m} \end{array} \right\| \end{array}$$

Цели первого и второго игроков антагонистические. Игрок 2 стремится минимизировать изменение критериев, а игрок 1 -

максимизировать его. Определим оптимальный набор технологических параметров (вектор  $E$ ), при котором были бы минимальными потери по всем критериям оптимальности ( $W$ ,  $\beta$ ,  $R$ ):

$$E = \|C_1 \quad C_2 \quad C_3\| \left\| \begin{array}{cccc} x_1^i & x_2^i & \dots & x_n^i \\ x_1^j & x_2^j & \dots & x_n^j \\ x_1^k & x_2^k & \dots & x_n^k \end{array} \right\|, \quad C_1 + C_2 + C_3 = 1,$$

где  $C_1, C_2, C_3$  - оптимальные стратегии первого игрока;  $x_1^i, \dots, x_n^i; x_1^j, \dots, x_n^j; x_1^k, \dots, x_n^k$  - режим технологических параметров соответствующей оптимальной стратегии.

Стратегии первого игрока являются случайным набором критериев оптимизации  $w(\bar{x})$ ,  $R(\bar{x})$ ,  $\beta(\bar{x})$ , а стратегии второго игрока - набором технологических параметров. Решение представленной матричной игры осуществляется симплекс-методом линейного программирования. Для определения составляющих вектора  $E$  прежде всего решается следующая экстремальная задача:

Найти

$$YV \rightarrow \max, \quad Y = \eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_m \quad (1)$$

при условии

$$AY \leq U, \quad (2)$$

где  $V = \{1, 1, \dots, 1\}$ ,  $U = \{1, 1, \dots, 1\}$ .

Введением дополнительных неотрицательных переменных неравенство (2) превратим в равенство

$$\eta_1 a_1 + \eta_2 a_2 + \dots + \eta_m a_m + u_1 \lambda_1 + u_2 \lambda_2 + u_3 \lambda_3 = 1,$$

а максимизирующую функцию (1) представим в виде

$$\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_m + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 + 0 \cdot u_3 \rightarrow \max,$$

где  $a_1 = (a_{11}, a_{21}, a_{31})$ ,  $a_2 = (a_{12}, a_{22}, a_{32})$ ,  $\dots$ ,  $a_m = (a_{1m}, a_{2m}, a_{3m})$ .

Выбирая в качестве начального базиса систему ортов  $u_1, u_2, u_3$  и подсчитав строку симплекса [5], получим исходную матрицу для рассматриваемой игры. Далее определяется базис и выполняется операция замещения. Выбор базиса и операция замещения повторяются до тех пор, пока в последней строке матрицы не исчезнут отрицательные элементы. Из окончательной таблицы находятся оптимальный вектор  $Y = \eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_m$  и значение игры  $\mu$ , определяющей оптимальные стратегии  $C$ :

$$C = \left( \frac{\eta_1}{\mu}, \frac{\eta_2}{\mu}, \frac{\eta_3}{\mu}, \dots, \frac{\eta_m}{\mu} \right).$$

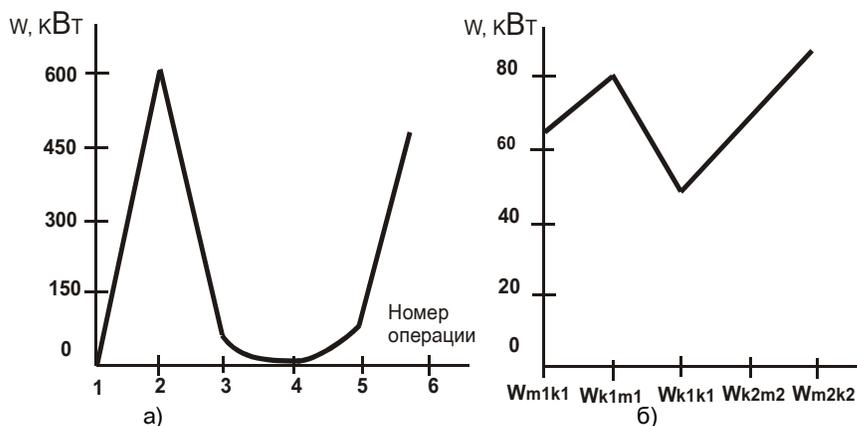


Рис.2. Расход электроэнергии по операциям (а), между операциями (б) для двухстадийной схемы измельчения

На основе описанного алгоритма разработан пакет программ, содержащий ряд диалоговых программ для анализа, прогноза и оптимизации технологических режимов и расходов электроэнергии промышленного процесса измельчения. Диалоговый сервис рассчитан на пользователей, не имеющих специальной подготовки программиста. Обслуживающие модули программы выполняют следующие функции: выбор схем измельчения и типоразмеров используемых аппаратов; ввод в диалоговом режиме исходных данных, таблиц начальных приближений; уточнение циркулирующих параметров; ввод нижней и верхней границ управляемых технологических параметров; вывод оптимальных режимов и результатов анализа в виде таблиц и графических изображений. Заполнение базы данных, расчеты и формирование выходных графиков (рис.2) осуществляются с помощью предоставленных пользователю соответствующих “меню”. Пакет программ работает в операционных системах Windows-95, Windows-98, Windows-2000.

Разработанный алгоритм позволяет при разных технологических и организационных ситуациях оперативно выяснить изменение качество-количественных показателей выходного продукта и расходов электроэнергии по операциям, а также оптимизировать их с учетом важных критериев оптимизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kheifets A.S., Lin I.J.** Energetic approach to kinetics of batch ball milling // Jnt. J. Miner. Process.-1998.-54, 1 2. – P. 81-97.
2. **Папков Б.В., Шеголькова Т.М.** Повышение эффективности электропотребления на промышленных предприятиях // Промышленная энергетика. - 1995. - 1 12. - С 21.
3. **Багдасарян М.К., Меликян Д.Р.** Модель для оценки динамики электромеханической системы мельница-двигатель // Информационные технологии и управление. – Ереван, 2000. -1 4. – С. 56-62.

4. **Банди Б.** Методы оптимизации: Пер. с англ.- М.: Радио и связь, 1988. - 128 с.
5. **Крапивин В.Р.** Теоретико-игровые методы синтеза сложных систем в конфликтных ситуациях. - М.: Наука, 1982. - 213 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.03.2001.

**Մ. Բ. ԲԱԴԴԱՍՅԱՆ**

**ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԾԱԽՍԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄԸ  
ԼԵՌՆԱՀԱՐՍՏԱՑՄԱՆ ՁԵՌՆԱՐԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՆՐԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ  
ԳԾԵՐՈՒՄ**

Դիտարկված են մանրացման տեխնոլոգիական գծերում ծախսվող էլեկտրաէներգիայի վերլուծության և լավարկման խնդիրները տարբեր տեխնոլոգիական իրավիճակներում: Առաջարկված են մաթեմատիկական մոդել, լուծման ալգորիթմ և ծրագրային փաթեթ:

**M.K. BAGHDASSARYAN**

**ELECTRIC POWER CONSUMPTION ANALYSIS AND OPTIMIZATION IN TECHNOLOGICAL  
REDUCING LINE ON MINING CONCENTRATING PLANT**

An electric power consumption analysis and optimization problem in technological reducing line under different technological situations is considered. A mathematical model, algorithm of solution and software package are proposed.

Г.Г. КИРАКОСЯН, Г.А. МАКАРЯН, А.В. ПЕТРОСЯН

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕМПА РЕКОМБИНАЦИИ В ТРАНЗИСТОРЕ С ПОЛИКРЕМНИЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ

Разработан метод, учитывающий влияние границы раздела на ток неосновных носителей. Получена формула, позволяющая рассчитать рекуррентно эффективный темп рекомбинации (ЭТР) на границе кремний-поликремний в зависимости от количества зерен.

**Ключевые слова:** поликремний, эффективный темп рекомбинации, зерно, граница зерен, граница раздела, блочная модель.

**Введение.** В последнее время слои поликремния Si\* стали широко применяться при изготовлении быстродействующих силовых многоэмиттерных транзисторов в качестве резисторов и источников диффузии для создания активных областей приборов. Коэффициент усиления транзисторов с поликремниевым эмиттером намного превышает коэффициент усиления обычных транзисторов (7-10 раз) [1]. В [2-3] предложено характеризовать поведение неосновных носителей в поликремнии эффективной подвижностью и константой времени жизни, что приводит к уменьшению скорости поверхностной рекомбинации по сравнению с монокристаллическим эмиттером. В этих работах принимается, что подвижность неосновных носителей заряда равна подвижности основных. Однако теоретический анализ показывает, что это не так [4]. Кроме того, в аналитическом приближении [2] влияние границы раздела поликремний-кремний не учитывается при расчете эффективной поверхностной скорости рекомбинации, поэтому последний параметр не используется при анализе прибора.

В настоящей работе разработан метод, позволяющий учитывать влияние границы раздела на ток неосновных носителей при низких и средних смещениях, используя концепцию об эффективном темпе поверхностной рекомбинации.

**Блочный анализ поликремниевых зерен и границ зерен.** Известно, что поликремний состоит из монокристаллических зерен и разупорядоченных границ зерен [5-6]. В транзисторах с высоколегированным поликремниевым эмиттером внутри зерен существует встроенное электрическое поле, обусловленное потенциальным барьером, образованным вследствие захвата основных носителей [5]. Если количество инжектированных в зерна неосновных носителей заряда намного меньше, чем основных (низкий и средний уровень инжекции), то влияние этого поля на движение неосновных носителей заряда ничтожно мало. В таких условиях неосновные носители перемещаются как незаряженные частицы, т.е. только за счет диффузии. Поэтому при решении уравнения непрерывности не учитывается дрейфовая компонента тока. Применяя уравнение диффузии к каждому зерну, токи на границах зерна можно

представить как линейную функцию от концентраций избыточных неосновных носителей на тех же границах зерна:

$$j_1 = q(a_g p_1 - b_g p_2), \quad j_2 = q(b_g p_1 - a_g p_2), \quad (1)$$

где

$$a_g = \frac{D_p}{L_p} \coth \frac{d_g}{L_p}, \quad b_g = \frac{D_p}{L_p} \operatorname{csc} h \frac{d_g}{L_p}, \quad (2)$$

$\delta p(0)=p_1$ ,  $\delta p(d_g)=p_2$  - концентрации избыточных неосновных носителей на границах зерна;  $D_p$ ,  $L_p$  - коэффициент диффузии и диффузионная длина дырок внутри зерен соответственно, которые имеют то же значение, что и в монокристаллическом кремнии;  $d_g$  - размер зерна.

В вышеприведенных уравнениях учитывается рекомбинация носителей внутри зерен. Вблизи границы зерна происходит дополнительное рассеяние на деформациях решетки, а на границе - рекомбинация на ловушечных уровнях. Обычная модель границы зерен пренебрегает ее толщиной и предполагает, что концентрация носителей не изменяется вдоль границы, т.е. рекомбинация происходит в бесконечно тонком слое [3]. Полное уменьшение подвижности в поликремнии объясняется наличием потенциального барьера на границе. Однако эта модель является ограниченной и не объясняет уменьшение подвижности неосновных носителей. Здесь используется модель, предложенная в [7], где предполагается, что подвижность на границе зерен отличается от подвижности в зерне. Далее полное уменьшение подвижности приписывается меньшему значению подвижности  $\mu_{gb}$  на границе зерна с конечной толщиной. Что касается рекомбинации, обусловленной энергетическими состояниями в запрещенной зоне границы зерен, то можно определить среднее время жизни или предположить, что рекомбинация происходит только на границе раздела, используя скорость рекомбинации  $S_{gb}$ . Таким образом, принимается, что граница зерен для исследования подвижности носителей имеет конечную толщину, а для расчета скорости рекомбинации является бесконечно тонкой, т.е. модельными параметрами являются  $\mu_{gb}$  и  $S_{gb}$ . С другой стороны, эта интерпретация является результатом линейного соотношения между плотностью тока и концентрацией избыточных носителей на границе раздела

$$j_{gb} = qT_{gb}(p_2 - p_3), \quad T_{gb} = \frac{kT}{q} \frac{\mu_{gb}}{w}, \quad (3)$$

где  $w$  - ширина границы зерен, а  $\mu_{gb}$  - подвижность дырок на границе зерен, которая называется подвижностью делокализованного состояния и принимает значение  $\mu_{gb} = 2 \text{ см}^2 / \text{Вс}$  [7].

Скорость рекомбинации  $S_{gb}$  вблизи края границы зерен определяется следующим образом:

$$j_2 - j_{gb} = qS_{gb}p_2, \quad j_{gb} - j_3 = qS_{gb}p_3. \quad (4)$$

Пренебрегая зависимостью темпа рекомбинации от уровня Ферми, для  $S_{gb}$  получим простое выражение

$$S_{gb} = \frac{N_{st}}{2} c_p v_{th}, \quad (5)$$

где концентрация примесных центров на границе зерен разделяется на две равные части и распределяется по краям границы зерен;  $c_p$  - сечение захвата для дырок;  $v_{th}$  - средняя тепловая скорость свободной дырки при данной температуре.

Подставляя первую формулу (3) в (4), получим

$$j_2 = q(a_{gb}p_2 - b_{gb}p_3), \quad j_3 = q(b_{gb}p_2 - a_{gb}p_3), \quad (6)$$

где

$$a_{gb} = S_{gb} + T_{gb}, \quad b_{gb} = T_{gb}. \quad (7)$$

Как видно из (1) и (7), существует аналогичное линейное соотношение между выходными токами и концентрациями носителей для краев границ зерен и самих зерен, хотя в области зерна зависимость  $p(x)$  имеет гиперболический вид, тогда как на границе  $p(x)$  является линейной. Это делает концепцию эффективного темпа рекомбинации (ЭТР) более корректной, так как ток на зернах и их границах пропорционален концентрации избыточных носителей в этих же точках. Фактически, пока электрическое поле и физические параметры  $D_p, \tau_p$  являются функциями только профиля легирования (случай низкого уровня инжекции), для неосновных носителей это линейное соотношение выполняется. В дальнейшем назовем эту модель "блочной", тем самым указывая, что рассматриваются только выходные токи и концентрации носителей.

Предположим, что внутри поликремниевого слоя имеется  $N$  одинаковых зерен с известным размером, а ЭТР на контакте  $Si^*$ -металл  $S_M \approx 10^6$  см/с (см. рис.).

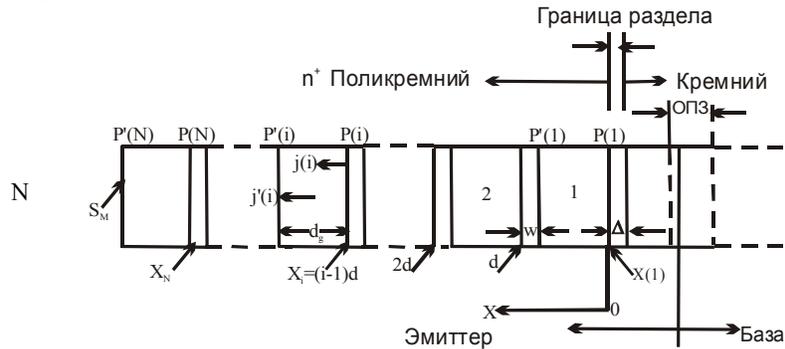


Рис. Схематическая диаграмма транзистора с поликремниевым эмиттером

На рис. используется следующая запись для токов:

$$j(i) = j(x_i), \quad j'(i) = j(x_i + d_g),$$

где  $x_i = (i-1)d$ ,  $d = d_g + w$  - полная длина зерна, а  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Из уравнений (1) и (7) получим трехдиагональную систему  $2N-1$  линейных уравнений. Неизвестными параметрами являются концентрации избыточных неосновных носителей  $p'(1), p(i), p'(i) (i = 2, \dots, N)$  на краях зерен, любая из которых является линейной функцией от  $p(1)$ . Последняя представляет собой концентрацию инжектированных носителей в поликремнии вблизи границы раздела поликремний-кремний. Таким образом, выражение для  $p(1)$  можно записать в виде

$$p'(1) = Ap(1), \quad A = b_g / (a_g + S_{\text{eff}}).$$

Здесь  $S_{\text{eff}}$  - ЭТР на границе первого зерна.

Подставив вышеприведенные уравнения в первую формулу (1), получим выражение для инжекционного тока

$$j(1) = q[a_g p(1) - b_g p'(1)] = qS_{p'} p(1),$$

где

$$S_{p'} = a_g - \frac{b_g^2}{a_g + S_{\text{eff}}} = V_d \frac{V_d + S_{\text{eff}} \coth(d_g / L_g)}{V_d \coth(d_g / L_g) + S_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

$V_d = D_p / L_p$  - диффузионная скорость.

Линейное соотношение между током и концентрацией в одинаковых точках позволяет определить ЭТР  $S_{p'}$ , который характеризует влияние поликремниевого слоя на поведение инжектированных неосновных носителей в эмиттере. Т. е. действие поликремниевого контакта заключается в том, что ЭТР  $S_M$  преобразуется в ЭТР  $S_{p'}$ . Если  $S_{p'}$  меньше чем  $S_M$ , то доминирует блокирующее действие поликремния, обусловленное малыми значениями  $\mu_{gb}$ , что приводит к увеличению коэффициента усиления. В противном случае, дополнительная рекомбинация вблизи границы зерен превалирует над понижением подвижности, что не позволяет получить приемлемые значения коэффициента усиления.

Цель работы - определить  $S_{p'}$ , зная физическую структуру поликремниевого слоя, даже в случае, когда размеры зерен неодинаковы. Задаваемыми геометрическими параметрами являются количество зерен, его размер и ширина границы. Физическими параметрами являются подвижность и время жизни неосновных носителей заряда внутри зерен  $\mu_g, \tau_g$ , а также  $\mu_{gb}, N_{st}$  на границе зерен.

Например, при  $N=1$  (одно зерно)

$$S_{p'} = a_g - b_g^2 / (a_g + S_M), \quad (9)$$

при  $N = 2$  (два зерна и одна граница зерен)

$$S_{p'} = a_g - b_g^2 / (a_g + S_{\text{eff}}), \quad (10)$$

где

$$S_{\text{eff}} = T_{\text{gb}} + S_{\text{gb}} - \frac{T_{\text{gb}}^2}{a_g + T_{\text{gb}} + S_{\text{gb}} - b_g^2 / (a_g + S_M)}.$$

На самом деле, нет необходимости одновременно решить полную систему линейных уравнений, чтобы получить значение  $S_{p'}$ . Применяя формулы (10) и используя соответствующие значения для  $S_M, a_g, b_g$  на блоках, можно легко получить  $S_{p'}$ . Заметим, что блок здесь относится как к зерну, так и к границе зерен.

Влияние поликремниевого слоя на ЭТР учитывается с помощью формул (9), (10) так же хорошо, как и с последующими членами с N-м количеством зерен, большим чем 2. Два конкурирующих фактора изменяют  $S_{p'}$  в разных направлениях. Дополнительная рекомбинация на границах зерен увеличивает полный рекомбинационный ток, в результате которого повышается  $S_{p'}$ , тогда как малое значение подвижности вблизи границ зерен уменьшает крутизну распределения инжектированных неосновных носителей в соседнем слое монокристаллического эмиттера [8], в результате чего уменьшается  $S_{p'}$ . В случае, если превалирует последний эффект, увеличение количества зерен приводит к уменьшению  $S_{p'}$ , либо при фиксированном размере зерна  $d_g$ , либо при фиксированной полной толщине  $L_t$  поликремниевого слоя. Если рекомбинационный эффект (обусловленный большим поперечным сечением захвата  $c_p$ ) превосходит эффект понижения подвижности, то увеличение количества зерен может только ухудшить характеристики транзистора с помощью увеличения  $S_{p'}$ . Этот вывод отличается от предыдущих результатов [3], где увеличение количества зерен всегда приводит к уменьшению ЭТР.

Таким образом, применение поликремневых эмиттеров позволяет существенно уменьшить ток инжекции из базы в эмиттер и, следовательно, увеличить статический коэффициент усиления по току. Этот эффект обуславливается процессами как в самом поликремнии, так и на границе раздела  $\text{Si}^* - \text{Si}$ . В заключение отметим, что разработанный новый метод получен в приближении малой толщины (промежуточного квазиокисного слоя  $\text{SiO}_x$ ).

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ А-140-2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **De Graaff H.C. and De Groot J. G.** The SIS tunnel emitter: A theory for emitters with thin interface layers // IEEE Trans. Electron Devices. – 1979. – V. ED – 26, 1 8.- P. 1771-1776.
2. **Fossum J.G. and Shibib M.A.** A minority-carrier transport model for polysilicon contacts to silicon bipolar devices, including solar cells // IEDM Tech. Dig.-1980.-P. 280-283.
3. **Eltoukhy A.A. and Roulston D.J.** Minority-carrier injection into polysilicon emitters// IEEE Trans. Electron Devices-1982.-V. ED-29, 1 4.-P. 961-964.
4. **Bennet H.S.** Hole and electron mobilities in heavily doped silicon: comparison of theory and experiment // Solid State Electr.-1983.-V. 26, 1 12.- P. 1157-1166.
5. **Lu N.C.C.,Gertzberg L.,Lu C.Y.,Meindl J.D.** A new conduction model for polycrystalline silicon films // IEEE Electron Device Lett.-1981. - V. EDL - 2, 1 3.- P. 95-98.
6. **Киракосян Г.Г., Амбарян А.Р., Шабоян А.С.** Влияние изолированной границы зерен на диффузионные параметры р-п переходов // Мат. 1-й Нац. конф. “Полупроводниковая микроэлектроника”, 21 мая 1997г. - С. 129-132.
7. **Zhao J., Li G.P., Liao K.Y., Chin M.R., Sun J.Y.** Observation of electromigration of hydrogen in polycrystalline silicon using poly emitter bipolar transistors // Appl.Phys.Lett.-1993.- V. 62, 1 23. - P. 2950-2952.
8. **Бубенников А.Н., Садовников А.Д.** Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. – М.: Радио и связь,1991.-287с.

ГИУА, ЗАО “Виасфер Технопарк”. Материал поступил в редакцию 20.02.2000.

**Գ.Հ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Գ.Ա. ՄԱԿԱՐՅԱՆ, Ա.Վ.ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ**

**ՎԵՐԱՄԻԱՎՈՐՄԱՆ ԱՐՁՅՈՒՆԱՐԱՐ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ  
ԲԱԶՄԱՍԻԼԻՑԻՈՒՄՍՅԻՆ ԷՄԻՏԵՐՈՎ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐՈՒՄ**

Աշխատանքում մշակված է նոր մեթոդ, որը հաշվի է առնում բաժանման սահմանագծի ազդեցությունը ոչ հիմնական լիցքակիրների հոսանքի վրա: Ստացված է բանաձև, որը թույլ է տալիս, կախված հատիկների քանակությունից, անդրադարձորեն հաշվարկել վերամիավորման արդյունաբար արագությունը (ՎԱԱ):

**G.H. KIRAKOSSYAN, G.A. MAKARYAN, A.V. PETROSSYAN**

**EFFECTIVE RECOMBINATION RATE INVESTIGATION IN THE TRANSISTOR WITH  
POLYSILICON EMITTER**

Taking into account the interface influence on the minority carrier current, a new method is developed. A formula allowing to calculate recurrently the effective recombination rate (ERR) on silicon-polysilicon interface depending on the number of grains is obtained.

С.О. СИМОНЯН, К.С. АГАДЖАНЫН

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ  
ОПТИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Предложен новый метод (метод обратного тангенса - МОТ) решения линейных задач оптимального быстродействия, позволяющий полностью автоматизировать процесс решения при использовании ППП MATLAB-5.2. На основе решения задачи оптимального управления движением искусственного спутника Земли осуществлен сравнительный анализ ряда известных и предложенного методов.

**Ключевые слова:** оптимальное управление, метод обратного тангенса, пакет прикладных программ, искусственный спутник Земли.

**Введение.** В [2] был рассмотрен вопрос автоматизированной машинной реализации известного метода детерминантных уравнений (МДУ) [3], предназначенного для решения линейных автономных задач оптимального управления, движение которых описывается системой дифференциальных уравнений

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (1)$$

при краевых условиях

$$X(0) = \text{fix}, \quad X(T) = \text{fix} = O_{R^n} \quad (2)$$

и "жестких" ограничениях

$$|u_k(t)| \leq \ell_k, \quad k = \overline{1, r}, \quad (3)$$

причем требуется, чтобы

$$I = \int_0^T 1 dt = T \rightarrow \min_{u(t)}, \quad (4)$$

где  $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$  - вектор основных переменных (здесь и далее  $T$  - знак транспонирования, а  $T$  - время оптимального быстродействия);  $U(t) = (u_1(t), \dots, u_r(t))^T$  - вектор управляющих воздействий;  $A = (a_{ij}); i, j = \overline{1, n}$  - матрица системы;  $B = (b_{jk}); j = \overline{1, n}; k = \overline{1, r}$  - матрица управляющих воздействий;  $\ell_k, k = \overline{1, r}$  - амплитуды последних.

С помощью МДУ путем получения эквивалентной динамической задачи (1)-(4) конечной системы трансцендентных уравнений сначала находятся моменты переключений  $t_{kj}; k = \overline{1, r}; j = \overline{1, n}$ , кусочно-постоянной функции программного управления

$$U_{\text{opt}}(t) = \text{diag}(\ell_k) \text{SIGN}[B^T \Psi(t) \psi(0)], \quad (5)$$

а затем вектор начальных значений сопряженных переменных  $\psi(0) = (\psi_1(0), \dots, \psi_n(0))^T$  ( $\text{diag}(\ell_k)$  - диагональная матрица порядка  $r$ ;  $\text{SIGN}(\cdot)$  - векторная функция знака размерами  $r \times 1$ ;  $\Psi(t) = (\Phi^{-1}(t))^T = \Phi^T(-t)$  - матрица фундаментальных решений сопряженной системы  $\dot{\psi}(t) = -A^T \psi(t)$ , где  $\psi(t) = (\psi_1(t), \dots, \psi_n(t))^T$  - вектор сопряженных переменных, причем  $\Phi(t)$  - матрица фундаментальных решений однородной системы  $\dot{X}(t) = AX(t)$ ).

В настоящей работе предлагается новый метод решения задачи (1)-(4). При этом вектор  $\psi(0) = (\psi_1(0), \dots, \psi_n(0))^T$  определяется непосредственно и совместно со временем оптимального быстрогодействия  $T$ . В случае необходимости моменты переключений  $t_{kj}$ ;  $k = \overline{1, r}$ ;  $j = \overline{1, n}$ , оптимальной управляющей функции (5) могут быть определены в дальнейшем как решение, в общем случае, трансцендентной системы конечных уравнений

$$\sigma(t) = B^T \Psi(t) \psi(0) = 0, \quad (6)$$

где  $\sigma(t) = (\sigma_1(t), \dots, \sigma_r(t))^T$  - вектор функций переключения.

**Математический аппарат.** Известно [3], что решение задачи (1)-(4) сводится к решению интегрального уравнения

$$-X(0) = \int_0^T \Phi^{-1}(t) B U(t) dt \quad (7)$$

относительно вектора управляющих воздействий  $U(t)$ , определяемого соотношением (5).

Используя метод функциональных преобразований сведения ограничений типа неравенств к равенствам без использования дополнительных переменных (метод сглаживания) [4, с.53] и вводя параметр  $K$  (достаточно малую величину), функцию знака  $\text{sign}(g(x))$  от некоторой функции  $g(x)$  довольно точно можно аппроксимировать функцией обратного тангенса, т.е. принять, что

$$\text{sign}[g(x)] \approx \frac{2}{\pi} \arctg \left[ \frac{g(x)}{K} \right]. \quad (8)$$

Имея такую аппроксимацию, соотношение (5) можно заменить выражением

$$\begin{aligned}
U_{\text{opt}}(t) &= \frac{2}{\pi} \text{diag}(\ell_k) \text{Arctg} \left[ \frac{1}{K} B^T \Psi(t) \psi(0) \right] = \\
&= \frac{2}{\pi} \text{diag}(\ell_k) \text{Arctg} \left[ \frac{1}{K} \begin{pmatrix} \sigma_1(t) \\ \vdots \\ \sigma_r(t) \end{pmatrix} \right], \tag{9}
\end{aligned}$$

где  $\text{Arctg}(\bullet) = \left( \text{arctg} \left[ \frac{1}{K} \sigma_1(t) \right], \dots, \text{arctg} \left[ \frac{1}{K} \sigma_r(t) \right] \right)^T$ .

Представление (9) дает возможность вместо кусочно-постоянных знакопеременных функций  $\text{sign}(\sigma_k(t))$ ;  $k = \overline{1, r}$ , использовать непрерывные функции  $\text{arctg} \left[ \frac{1}{K} \sigma_k(t) \right]$ ;

$k = \overline{1, r}$ , что позволяет сравнительно легко преодолевать очевидные вычислительные трудности, связанные с интегрированием системы (7) при использовании соотношения (5).

После интегрирования (7), с учетом (9), получаем трансцендентную систему  $n$  конечных уравнений с  $(n+1)$  неизвестными:

$$F(\psi_1(0), \dots, \psi_n(0), T) = 0. \tag{10}$$

При этом динамическая задача оптимизации (1)-(4) сводится к задаче математического программирования:

$$T \rightarrow \min_{\psi_1(0), \dots, \psi_n(0), T} \tag{11}$$

при условиях (10).

Задача Лагранжа (10), (11) требует составления расширенного критерия качества

$$L = \psi_0 T + F^T(\cdot) \mu \Rightarrow \min_{\psi(0), T} \tag{12}$$

где  $\psi_0 = -1$  [3];  $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_n)^T$  - вектор неопределенных множителей Лагранжа.

Заметим, что  $\psi(0) \equiv \mu$  [3].

Необходимые условия экстремума функции (12) имеют вид

$$\begin{cases} \nabla_T L = -1 + \nabla_T^T F \mu = 0 & \text{(одно уравнение),} & (13) \\ \nabla_\mu L = F(\cdot) = 0 & \text{(n уравнений),} & (14) \end{cases}$$

где с учетом (7) и (9) имеем

$$\nabla_T F = \frac{2}{\pi} \Phi(-T) B \text{diag}(\ell_k) \text{Arctg} \left[ \frac{1}{K} B^T \Phi^T(-T) \psi(0) \right]. \tag{15}$$

Следовательно, из (13) имеем

$$\psi^T(0) \cdot \Phi(-T) B \text{diag}(\ell_k) \text{Arctg} \left[ \frac{1}{K} B^T \Phi^T(-T) \psi(0) \right] = \frac{\pi}{2}. \tag{16}$$

Учитывая, что

$$\psi^T(0) \Phi(-T) B = \sigma^T(T), \tag{17}$$

уравнение (16) представим в компактной форме:

$$\sigma^T(T) \text{diag}(\ell_k) \text{Arctg} \left[ \frac{1}{K} \sigma(T) \right] = \frac{\pi}{2}, \quad (18)$$

или, с учетом (8),

$$\sigma^T(T) \text{diag}(\ell_k) \text{SIGN}(\sigma(T)) = 1. \quad (19)$$

Уравнение (19) можно представить также в виде

$$\sum_{k=1}^r |\ell_k \sigma_k(T)| = 1. \quad (20)$$

Присоединив последнее уравнение к системе (10) (или (14)), будем иметь доопределенную систему (n+1)-го порядка, решением которой можно получить как время оптимального быстрогодействия T, так и вектор  $\psi(0) = (\psi_1(0), \dots, \psi_n(0))^T$ , обеспечивающий оптимальность закона управления  $U_{\text{opt}}(t)$ .

**Пример.** Рассмотрим практическую задачу. Синтезируем регулятор, обеспечивающий оптимальное в смысле быстрогодействия управление движением спутника [1], когда: момент инерции спутника  $J = 200 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ; исполнительными органами системы управления являются газовые реактивные двигатели с регулируемой тягой, развивающие максимальный момент  $M_m = 4 \text{ кг} \cdot \text{м}$ ; в начальный момент отклонение спутника составляет  $\vartheta_0 = 1^\circ 46'$ , а угловая скорость  $d\vartheta_0/dt = 28,65 \text{ рад/с}$ . Уравнение движения спутника при отсутствии возмущений имеет вид

$$J \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = kM.$$

Необходимо найти время и управление изменением момента M, при котором приход спутника в установившееся нулевое состояние будет совершаться наискорейшим образом.

После несложных преобразований движение спутника можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,005 \end{pmatrix} u(t),$$

а на управление  $u(t)$ , которое переводит эту систему из начального состояния

$X(0) = (0,03; 0,5)^T$  в состояние покоя  $X(T) = (0, 0)^T$  за минимальный промежуток времени

T, наложено ограничение  $|u(t)| \leq 4$ .

Для этой задачи выражение (7) принимает вид

$$-\begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,03 \end{pmatrix} = \int_0^T \begin{bmatrix} 1 & -t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0,005 \end{pmatrix} u(t) dt,$$

где  $u_{\text{opt}}(t) = 8/\pi \text{ arctg}[(-\psi_1(0)t + \psi_2(0))/K]$ .

В соответствии с (20) имеем:  $4(-\psi_1(0)T + \psi_2(0)) = 1$ , откуда  $T = (4\psi_2(0) - 1) / 4\psi_1(0)$ .  
 Интегрируя (7) и подставив вместо T последнее соотношение, получим следующую  
 трансцендентную систему уравнений с неизвестными  $\psi_1(0)$  и  $\psi_2(0)$ :

$$\begin{cases} F_1(\psi_1(0), \psi_2(0)) = \frac{1}{\psi_1^2(0)} [-24,9987 + 0,9996\psi_2(0) - 0,0064 \times \\ \times \arctg(500\psi_2(0))\psi_2^2(0) + 2,546510^{-8} \arctg(500\psi_2(0)) + \\ + 1,2732 \cdot 10^{-5} \cdot \psi_2(0) \ln(1 + 250000\psi_2^2(0)) + 0,03\psi_1^2(0)] = 0, \\ F_2(\psi_1(0), \psi_2(0)) = \frac{1}{\psi_1^2(0)} [-0,9997 + 0,0127\arctg(500\psi_2(0)) \times \\ \times \psi_2(0) - 1,2732 \cdot 10^{-5} \ln(1 + 250000\psi_2^2(0)) + 0,5\psi_1(0)] = 0. \end{cases}$$

Решение этой системы ( $K=10^{-5}$ ) приводит к следующим результатам:  
 $\psi_1(0) = -2,8215$ ;  $\psi_2(0) = -120,5404$ ;  $T = 60,4416$ [с].

При этом  $U_{opt}(t) = 2,5465\arctg(1410,7861t - 60270,2141)$ , причем время  
 переключения  $t_{пер.} = 42,7210$ [с].

Сопоставим эти величины со значениями соответствующих неизвестных,  
 полученными в [1] методом фазовой плоскости (МФП), а также с результатами,  
 полученными МДУ при решении следующей эквивалентной нелинейной системы  
 конечных уравнений 5-го порядка:

$$\left\{ \begin{array}{l} -0,02t_1^2 + 0,02t_2^2 - 0,01T^2 + 0,03 = 0, \\ 0,04t_1 - 0,04t_2 + 0,02T + 0,5 = 0, \end{array} \right\} \quad \left( \begin{array}{l} \text{система (7) при} \\ \text{функции (5)} \end{array} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_1(t_1 - t_2) + \gamma_1^2 = 0, \\ (t_2 - t_1)(t_2 - T) + \gamma_2^2 = 0, \end{array} \right\} \quad \left( \begin{array}{l} \text{равенства Валентайна} \\ \text{(детерминантное уравнение)} \end{array} \right)$$

$$0,064\gamma_1\gamma_2(t_1 - t_2) = 0,$$

где  $t_1$  и  $t_2$  - времена переключений (в конкретном случае,  $t_1 = 0$ );  $\gamma_1, \gamma_2$  - неизвестные  
 постоянные Валентайна (в конкретном случае,  $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 27,5136$ ); T- время оптимального  
 быстрогодействия.

Сравнительные оценки представлены в таблице, где МОТ - метод обратного тангенса.

Переменные	МФП	МДУ	МОТ
$t_{\text{пер.}} [c]$	42,8	42,7200	42,7210
$T [c]$	60,6	60,4401	60,4416
$\psi_1(0)$	-2,8089	-2,8209	-2,8215
$\psi_2(0)$	-120,2247	-120,5219	-120,5404
$x_1(t_{\text{пер.}})$	3,1116	3,1400	3,1400
$x_2(t_{\text{пер.}})$	-0,3560	-0,3544	-0,3543
$x_1(T)$	$-5,6800 \cdot 10^{-2}$	$0,2664 \cdot 10^{-14}$	$-6,860 \cdot 10^{-4}$
$x_2(T)$	0,0000	0,0000	$-0,079 \cdot 10^{-4}$

Заметим, что в таблице величины  $\psi_1(0) = -2,8089$ ,  $\psi_2(0) = -120,2247$  при МФП получены путем дополнительных вычислений с целью сопоставления их с соответствующими значениями, полученными МДУ и МОТ.

Временные характеристики решения задачи МОТ представлены на рис.1 и 2. Машинная реализация решения задачи осуществлена применением пакета прикладных программ "MATLAB - 5" [5].

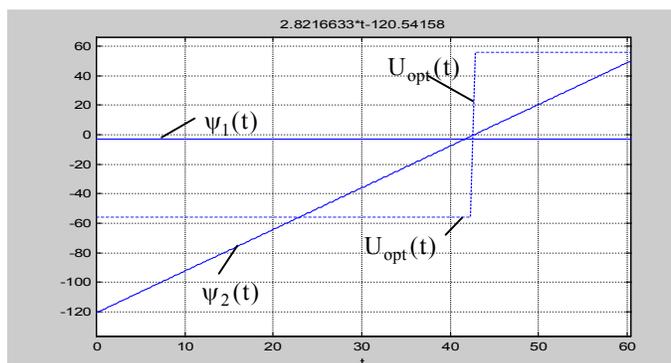


Рис. 1

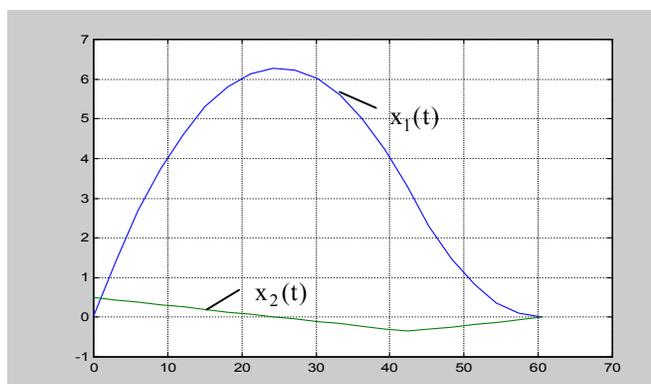


Рис. 2

Заключение. При МОТ система (13),(14) всегда  $(n+1)$ -го порядка, вне зависимости от значения  $r$ . Между тем, при МДУ эквивалентная система конечных уравнений  $(2nr+1)$ -го порядка, причем очевидно, что  $(2nr+1) > n+1$ , ( $r \geq 1$ ).

Что касается сравнительной эффективности МДУ и МОТ, то, при прочих равных условиях, МДУ превосходит МОТ, если трудности вычислительного характера, обусловленные порядком  $(2nr+1)$ -й эквивалентной системы конечных уравнений, не преобладают над затруднениями, обусловленными сложностью соотношений системы (13),(14). В противном случае МОТ, очевидно, выгодно отличается от МДУ и, тем более, от МФП, возможности которого весьма ограничены размерностью переменных состояния ( $n \leq 2$ ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антомонов Ю.Г. Синтез оптимальных систем. – Киев: Наукова думка, 1972.-320 с.
2. Симомян С.О., Агаджанян К.С. К оптимизации по быстродействию линейных многомерных систем // Моделирование, оптимизация, управление // Сб. науч. тр. – 1999. - Вып. 2. - С. 168-175.
3. Симомян С.О. Метод детерминантных уравнений в прикладной теории оптимальных систем / ГИУА. - Ереван, 1992. – 104 с. (на арм. яз.).
4. Трухачев Р.И., Хоменюк В.В. Теория неклассических вариационных задач.-Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1971.-168 с.
5. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов "MATLAB – 5". В 2-х т. - М.: Диалог-Мифи, 1999. Т.1 – 366 с., Т.2 – 304 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.11.1999.

### Ս.Չ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Կ.Ս. ԱԴԱՋԱՆՅԱՆ

### ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՆԳԱԳՈՐԾՈՒԹՅԱՆ ԳԾԱՅԻՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ

### ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԵԹՈՂԻ ՄԱՍԻՆ

Օպտիմալ արագագործության գծային խնդիրների լուծման համար առաջարկվել է նոր մեթոդ (հակադարձ տանգենտի մեթոդ - շՏՄ), որը հնարավորություն է տալիս ամբողջապես ավտոմատացնել լուծման գործընթացը MATLAB 5.2 ԿՕՓ-ի օգտագործման դեպքում: Երկրի արհեստական արբանյակի շարժման օպտիմալ կառավարման խնդրի լուծման հիման վրա իրականացվել է մի շարք հայտնի և առաջարկված մեթոդների համեմատական վերլուծություն:

S.H. SIMONYAN, K.S. AGHAJANYAN

### ON ONE METHOD FOR LINEAR PROBLEM SOLVING OF OPTIMAL HIGH-SPEED

A new method (a method of a return tangent (MRT)) for linear problem solving of optimal high-speed is proposed. The method allows to automate completely the solving process using MATLAB 5.2. Based on the problem solving of optimal control by artificial Earth satellite movement, a comparative analysis of some known methods and the proposed one is realized.

УДК 517.935

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА

В.Г. ПЕТРОСЯН, Р.Р. ГЮЛБУДАГЯН

**АЛГОРИТМ И ОЦЕНКА НАКЛОНА УДАРЯЮЩЕЙ ДЕТАЛИ В  
ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СОССП БЛОКОВ  
ВВЭР-440**

Разработан алгоритм распознавания и оценки массы, ее скорости в момент удара, а также угла наклона ударяющей детали на основе гидродинамической теории ударных волн и теории удара Герца. Предложенный алгоритм работает в диагностической системе СОССП, которая функционирует на блоке №2 Армянской АЭС.

**Ключевые слова:** диагностика, распознавание, ударная волна, мембрана.

Системы диагностики широко используются для повышения уровня ядерной безопасности АЭС. Среди них важное место занимают системы: звукового контроля утечек - ALUS или СКТ [1]; обнаружения свободных и свободно закрепленных предметов - СОССП или KUS [2]; наблюдения за вибрациями - SUS [3] и т.д.

Как известно, удары свободных и освободившихся частей вызывают в главном циркуляционном контуре реактора образование корпусных шумов. Задача СОССП заключается в распознавании места образования шумов и выдаче информации о состоянии отдельных компонентов ядерной установки. Корпусные шумы получаются при ударе свободной детали по стенкам или встроенным элементам, затем записываются пьезоэлектрическими датчиками ускорения в звуковой области. Полученные вследствие удара сигналы обрабатываются различными методами [4-7].

В [4, 5] разработан алгоритм определения массы свободного предмета на основе теории Герца, где рассматриваются поперечные удары. В [7] предлагаются алгоритм и программа вычисления скорости ударяющей детали в момент удара, а также определяются зависимости массы ударяющей детали от основной частоты или периода регистрируемых сигналов, приводится экспериментальное подтверждение разработанного алгоритма для частного случая поперечного удара.

Однако при распознавании свободно ударяющей детали среди ее характеристик, кроме скорости в момент удара и величины ее массы, важное значение имеет определение угла наклона удара этой детали. Для решения указанной задачи разработанный алгоритм определения массы по гидродинамической теории ударных волн [7] дополняется вычислением «проникания» детали в массивную пластину и связью «проникания» с основным периодом регистрируемого сложного сигнала по теории удара Герца [4].

Полный алгоритм распознавания массы свободно ударяющей детали, ее скорости в момент удара и угла наклона имеет вид

$$U_{n0} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_0(1-\rho_0/\rho)}}, \quad U_n = \frac{\rho_0}{\rho} U_{n0}, \quad (1)$$

$$U_\tau = \frac{\rho U_n^2}{\sqrt{2\rho_0\rho U_n^2 + \rho_0^2 U_{n0}^2}} \quad \text{при } \beta = 90^\circ, \quad (2)$$

$$U_\tau^4 - 2\left(1 + \frac{\rho}{\rho_0}\right)U_n \operatorname{ctg}\beta U_\tau^3 + \left[2\frac{\rho}{\rho_0}U_n^2 \operatorname{ctg}^2\beta - \left(1 + \frac{\rho}{\rho_0}\right)^2 U_n^2 + \frac{U_{n0}^2}{\sin^2\beta}\right]U_\tau^2 + 2\frac{\rho}{\rho_0}\left(1 + \frac{\rho}{\rho_0}\right)U_n^3 \operatorname{ctg}\beta U_\tau - \frac{\rho^2}{\rho_0^2}U_n^4 \operatorname{ctg}^2\beta = 0$$

при  $0 < \beta < 90^\circ$ ,

$$U_\tau = \sqrt{\left(1 + \frac{\rho}{\rho_0}\right)^2 U_n^2 - U_{n0}^2} \quad \text{при } \beta = 90^\circ, \quad (4)$$

$$m_{0T} =$$

$$= \frac{0,0018\pi^{1/3} \tau [U_\tau \cos\beta + U_n \sin\beta]^{2/3} T^{8/3}}{g^{1/3} [U_{\tau 0} \cos\beta + U_{n0} \sin\beta + \sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}]^{2/3} \left[ \frac{\cos\beta}{U_{\tau 0}} + \frac{\sin\beta}{U_{n0}} + \frac{\sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}}{U_{\tau 0} U_{n0}} \right]^{2/3}}, \quad (5)$$

$$m_{0T,0} - 0,01 < m_{0T} < m_{0T,10} + 0,01, \quad (6)$$

$$r = 0,38T \sqrt{\frac{\tau}{\rho_0}}, \quad S_{\text{эKB}} = 0,76\pi \sqrt{0,02m_{0T} \pi g \tau},$$

$$w_{\text{max}} = \frac{2m_{0T} g}{S_{\text{эKB}}}, \quad h = 30 w_{\text{max}}, \quad (7)$$

$$m = \rho_0 \pi r^2 h, \quad m_{\text{эKB}} = 0,01m, \quad m_B = \frac{2m_{\text{эKB}} [U_\tau \cos\beta + U_n \sin\beta]}{U_{\tau 0} \cos\beta + U_{n0} \sin\beta + \sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}},$$

$$U_{\tau 0, T} = \frac{m_B U_{\tau 0}}{m_{0T}}, \quad (8)$$

$$\alpha_m = \left[ \frac{15\pi 5\pi (4_0)^{1/6} U_{\tau 0, T}^2 (\delta_1 + \delta_2) m_{0T}^{5/6}}{16\sqrt{R}} \right]^{0,4}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{0,17U_{\tau_0, T}}{\alpha_m}, \quad (10)$$

где  $\Delta P$  – разность давлений сжатой и невозмущенной сред (сталь);  $\rho$  - значение плотности сжатого состояния среды, определяемое из гидростатической компрессионной кривой;  $T$  – значение основного периода, определяемое из преобразования Фурье сигнала, получаемого вследствие удара;  $\beta$  - угол наклона удара;  $\vec{U}_{n0}, \vec{U}_n$  - векторы нормальной составляющей скорости ударной волны (УВ) перед и за фронтом;  $\vec{U}_\tau = \vec{U}_{\tau_0}$  - векторы тангенциальной составляющей скорости УВ за и перед фронтом соответственно;  $\rho_0$  - плотность невозмущенного состояния среды;  $\tau$  - предельное значение текучести материала механической мембраны, получаемое вследствие удара;  $m_{от}$  - искомое значение величины массы;  $r$  - радиус мембраны;  $S_{эkv}$  - эквивалентная упругость мембраны;  $w_{max}$  - максимальное динамическое перемещение или толщина мембраны;  $h$  - толщина возбужденного слоя в среде;  $m, m_{эkv}$  - реальная и эквивалентная масса мембраны;  $m_b$  - "масса" УВ;  $U_{\tau_0, T}$  - скорость ударяющего тела в момент удара;  $\alpha_m$  - сжатие;  $\delta_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1 \pi}$ ,  $\delta_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2 \pi}$ ;  $\mu_1, \mu_2$  –

соответственно коэффициенты Пуассона для ударяющего предмета и пластин;  $E_1, E_2$  – модули упругости предмета и пластины (сталь).

На основе алгоритма (1)-(10) при входных величинах  $\Delta P, T$  (определяемых из преобразования Фурье сигнала, получаемого вследствие удара и регистрируемого датчиком диагностической системы СОССП) и  $\rho$  (определяемой из гидростатической компрессионной кривой) вычисляем выходные величины  $U_{n0}, U_n, U_\tau, m_{от}, r, S_{эkv}, w_{max}, h, m, m_{эkv}, m_b, U_{\tau_0, T}, \alpha_m$  как функции угла  $\beta$ .

Угол наклона  $\beta$  определяется по следующему методу. Наряду с входными величинами  $\Delta P, T, \rho$  задается искомый угол от  $\beta = 0^\circ$  до  $\beta = 90^\circ$  с шагом  $10^\circ$ , и для каждого значения  $\beta$  вычисляются все выходные величины. Затем на основании (10)

составляется разность  $\left| \frac{1}{T} - \frac{0,17U_{\tau_0, T}}{\alpha_m} \right| = df = |f - f_{herz}|$  для каждого значения угла  $\beta$ . После

этого сравниваются все значения  $df$ . Наименьшее значение  $df$ , которому соответствует угол наклона  $\beta$ , будет искомым значением угла наклона удара детали.

Как следует из (3), при одних и тех же входных величинах существует несколько вычисляемых значений  $U_\tau$  в зависимости от соотношений коэффициентов уравнения (3) и тем самым несколько значений величины массы  $m_{от}$ . Многозначность вычисляемой величины массы ударяющей детали снижается с помощью ограничения (6), которое следует из реальных условий задачи.

На основании алгоритма (1) – (10) составлена программа «УГОЛ», результаты функционирования которой приведены ниже.

Таблица  
Оценка угла наклона

$T= 1,180e-04 \quad f= 8,475e+03$			$T= 1,340e-04 \quad f= 7,463e+03$		
beta	f_hertz	d_f	beta	f_hertz	d_f
40	6726,05	1748,53	40	6385,18	1077,50
50	6664,73	1809,85	50	6214,85	1247,84
60	6496,57	1978,00	60	6223,89	1238,79
60	5933,32	2541,25	60	5582,48	1880,21
70	5964.49	2510,09	70	5628,40	1834,29
80	5994.71	2479,87	80	5711,22	1751,47
90	6793.94	1680.63	90	6395,93	1066,76

$T= 1,920e-04 \quad f= 5,208e+03$			$T= 1,800e-04 \quad f= 5,556e+03$		
beta	f_hertz	d_f	beta	f_hertz	d_f
40	4588,86	619,47	40	5132.79	422,76
60	4012,10	1196,23	60	4495.47	1060,08
70	4025,52	1182,82	70	4532.24	1023,32
80	4071,29	1137,04	80	4597.22	958,34
90	4597,20	611,13	90	5158.27	397,28

Как видно из таблицы, при всех значениях  $T$ , а также при  $\beta = 0...90$  наименьшее значение  $df$  соответствует углу  $\beta = 90^\circ$ , которое является искомым.

Искомое значение  $\beta = 90^\circ$ , которое находится алгоритмическим путем, подтверждается реальными экспериментами, проведенными на трубопроводах I – го контура блока №2 Армянской АЭС в определенных местах заданных поперечных ( $\beta = 90^\circ$ ) ударов.

Отметим, что указанный алгоритм распознавания угла наклона удара дает правильные результаты для значений:  $40^\circ < \beta \leq 90^\circ$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система звукового контроля утечек (ALUS) Siemens. 1988.
2. Система наблюдения за корпусным шумом (KUS) Siemens. 1988.
3. Система наблюдения за вибрациями (SUS) Siemens. 1988.
4. **Гольдсмит В.** Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. - М.: Стройиздат, 1965. - 180 с.
5. Методика обработки и анализа БИ для систем СКТ и СОССП: Научно-технический отчет / ВНИИАЭС. – М., 1997. – 35 с.
6. Результаты базовых измерений по СОССП. Методика, обработка, анализ, оценки БИ и результаты: Научно-технический отчет / Ин-т "Арматом". - Ереван, 1997. – 40 с.
7. Разработка и проверка алгоритма и программы определения массы по гидродинамической теории ударных волн: Отчет о научно-исследовательской работе / Ин-т «Арматом» - Ереван, 1999.- 60 с.

НИИ «Арматом».

Материал поступил в редакцию 10.03.1999.

**Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ռ.Ռ. ԳՅՈՒԼԲՈՒԴԱԴՅԱՆ**

**ՋՋԷՌ - 440 ԲԼՈԿԻ ԱԹԱՀՀ ԱԽՏՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ**

**ԴԵՏԱԼԻ ՀԱՐՎԱԾԻ ԹԵՔՈՒԹՅԱՆ ԱՆԿՑԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ**

**ԱԼԳՈՐԻԹՄ**

Մշակված է հարվածող դետալի մասսայի, հարվածի պահին նրա արագության, ինչպես նաև թեքության անկյան ճանաչման և գնահատման ալգորիթ: Առաջարկված ալգորիթմը աշխատում է Հայկական ԱԷԿ - ի N 2 բլոկում գործող ԱԹԱՀՀ (ազատ և թույլ ամրացված առարկաների հայտնաբերման համակարգ) ախտորոշման համակարգում:

**V.G. PETROSSYAN, R. R. GYULBUDAGHYAN**

**ALGORITHM AND EVALUATION OF IMPACTING PART'S SLOPE IN THE  
LDPMS OF VVER – 440 TYPE REACTORS**

Based on the hydrodynamic theory of impact waves and the Hertz theory of impact, a new algorithm of identification and evaluation of loose and detached part's mass and its speed at the moment of impact is developed. The proposed algorithm works in the diagnostic LDPMS, which functions on the Unit 2 of the Armenian Nuclear Power Plant.

С.О. МКРТЧЯН, А.С. МКРТЧЯН, В.Э. ДЖАНГИРЯН,  
А.Ф. ЛАЗАРЯН

## СООБЩЕНИЕ 2. КАК “ОЖИВИТЬ” СБИС ?

Рассматриваются вопросы защиты интегральных микросхем (ИМС) от перегрузок по входу и выходу типа к.з. на шины питания и земли. Приводятся примеры таких схем типа эмиттерно-связанной и интегрально инжекционной логики, которые “самоблокируются” при перегрузках указанного типа, тем самым предотвращая перегорание (тепловой пробой) внутренней структуры ИМС.

**Ключевые слова:** самоблокировка, короткое замыкание, перегрузка, самоторможение, запредельное раздражение.

**Введение и постановка задачи.** В настоящей работе рассматриваются вопросы защиты эмиттерно-связанных логических (ЭСЛ) и интегрально-инжекционных (ИИЛ) микросхем, которые существенно отличаются друг от друга не только по схемотехнике построения базового вентиля, но и по потребляемой мощности и другим параметрам, что накладывает определенные ограничения на специфику построения дополнительных цепочек, необходимых для повышения к.з. стойкости базового вентиля.

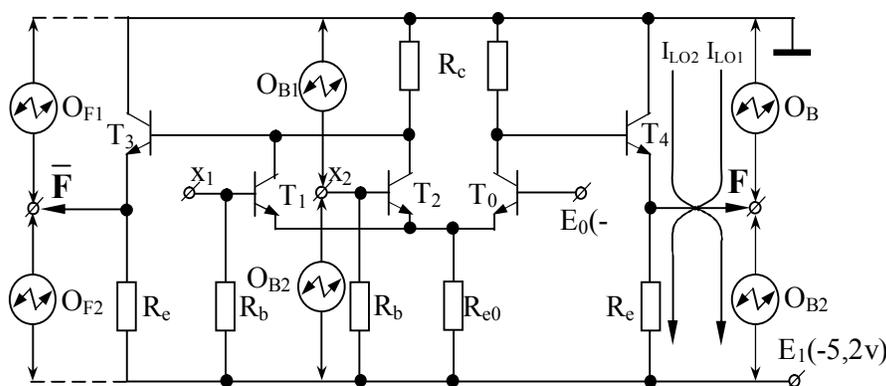


Рис.1. Защита одноуровневой ЭСЛ схемы от перегрузок

**Защита ЭСЛ вентилях от перегрузок.** На рис.1 показана одноуровневая базовая схема ЭСЛ вентиля с возможными входными  $O_B$  и выходными  $O_F$  перегрузками. К.з на шину земли обозначены соответственно через  $O_1$ , а на шину  $-5В$  - через  $O_2$ . Как видно, ЭСЛ, как и ТТЛ схемы по входу защищены, т.е. перегрузки  $O_{B1}$  и  $O_{F1}$  не опасны с точки зрения перегорания микросхем. Поэтому основное внимание



Таким образом, если БИС построена на логических ячейках (рис.4), то для таких БИС не опасны как входные, так и выходные перегрузки типа  $O_{в1}$  и  $O_{в2}$ . При появлении таких перегрузок в БИС она блокируется (попадает в заторможенное состояние наподобие биологических нейронных сетей), предотвращая сгорание микросхемы. Если минует опасность сгорания (устраняется перегрузка), БИС продолжает нормально функционировать. Чем не “живая” электронная схема?

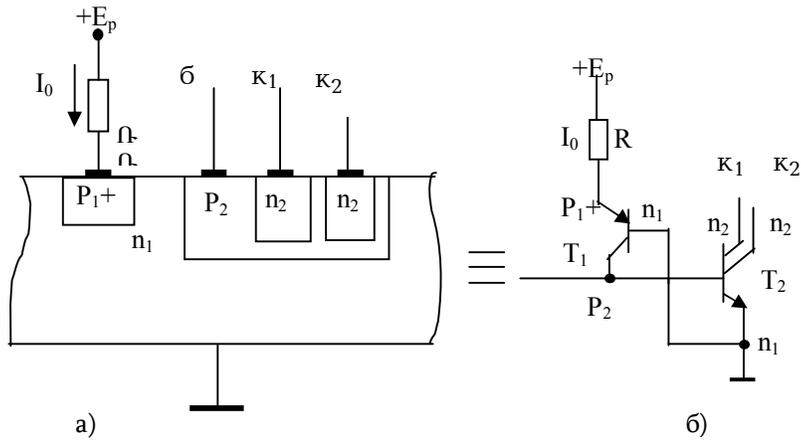


Рис. 3. Структура (а) и эквивалентная электрическая схема (б) ИИЛ ячейки (базовая ячейка)

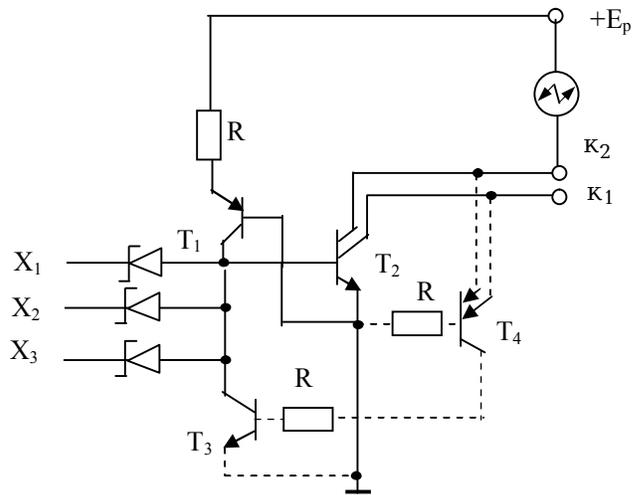


Рис. 4. Защита ИИЛ ячейки от перегрузок на выходе

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Մկրտչյան Ս.Հ. Միկրոսխեմատեխնիկա և նեյրոսխեմատեխնիկա. 1 մաս: Թվային ինտեգրալ սխեմաներ / ՀՊՃՀ. - Երևան, 1999. -222 էջ:
2. **Аваев Н.А., Дулин В.Н., Наумов Ю.Е.** БИС с инжекционным питанием. - М.: Сов. радио, 1977. -248 с.
3. **Мкртчян С.О., Мелконян С.А.** ИИЛ ячейка. А. с. СССР N1386951, Бюл. изобр. 13, 1988.
4. ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.03.2000.

*Ս.Հ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ա.Ս. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Վ.Է. ՋԱՀԱՆԳԻՐՅԱՆ  
Ա.Ֆ. ԼԱԶԱՐՅԱՆ*

### *2. ԻՆՉՊԵՄ «ԿԵՆՂԱՆԱՑՆԵԼ» ԳՄԻՍ-Ը*

Դիտարկվում են ինտեգրալ միկրոսխեմաների (ԻՄՍ) ելքերում «կարճ միացում» (կ.մ.) տեսակի գերբեռնվածությունից պաշտպանության հարցերը: Բերվում են էլեկտրակապակցված տրամաբանական (ԷԿՏ) սխեմաների և ինտեգրալ ինժեկցիոն տրամաբանական (ԻԻՏ) սխեմաների օրինակներ, երբ ելքում նման գերբեռնվածության դեպքում սխեման «ինքնափակվում» է՝ պաշտպանելով ելքային տրանզիստորը ջերմային ծակումից:

*S.H MKRTCHYAN, A.S. MKRTCHYAN, V.E. JAHANGIRYAN,  
A.F. LAZARYAN*

### *2. How to provide the “survivability” of VLSI ?*

Integrated microcircuit (IMC) protection from overload of input and output short circuit type problems are considered. The samples of emitter coupled logic (ECL) and integrated injection logic (IIL) circuits which have self-locking features by overloads of the abovementioned type are given, thereby preventing thermal breakdown of internal chip structure.

А.Ж. МУРАДЯН, А.А. ПОГОСЯН, М.В. АДИБЕКЯН

## МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СДРВ ПРИ НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

Разработана методика выявления слабых возмущений ионосферного сигнала на основе выделения суточного периода из периодограмм временных рядов  $\Delta\varphi$ . Получены корреляционные функции для серий выборок землетрясений и аномалий, рассчитанных в соответствии с предложенной методикой. Показано, что интервал корреляции в основном колеблется в пределах 35...40 дней для землетрясений с магнитудой  $M \geq 4,5$ . Выявленная закономерность позволяет утверждать, что наклонное зондирование ионосферы является предвестником землетрясений.

**Ключевые слова:** зондирование ионосферы, распространение радиоволн, сейсмоионосферные связи.

**Методика и техника эксперимента.** Со дня основания Национальной службы сейсмической защиты при Правительстве РА (НССЗ РА) проводятся исследования пре-, ко-, постсейсмических процессов на Кавказе посредством многопараметрового мониторинга литосферы и атмосферы. Являясь составной частью многопараметрового мониторинга, наблюдения за состоянием ионосферы посредством наклонного зондирования проводятся в Армении (НССЗ РА) с 1992 года.

В процессе наблюдений контролируется распространение сверхдлинных радиоволн (СДРВ) по трассам, пересекающим различные сейсмоактивные регионы планеты. Построение радиотрасс осуществляется на базе фазовой радионавигационной системы (ФРНС) "Омега". Прием осуществляется на станции НССЗ (г. Ереван) с установленными приемниками-компараторами Ч7-38. При измерениях регистрируется разность  $\Delta\varphi$  между фазой принимаемой радиоволны (по моменту прихода фронта волны) и стандартным сигналом, генерируемым атомным стандартом частоты и времени СЧВ-74, синхронизированным с передатчиками станций ФРНС "Омега". Измерение ( $\Delta\varphi$  производится с частотой в одну минуту).

Для мониторинга выбраны четыре станции ФРНС "Омега": Монровия (Либерия), о. Реюньен (Франция), о. Цусима (Япония), Алдра (Норвегия), радиотрассы по которым составляют четыре взаимно-перпендикулярных направления, охватывая таким образом основные Евразийские сейсмически активные регионы (рис. 1).

Процесс распространения СДРВ носит дифракционный характер, благодаря чему имеет место огибание радиоволнами кривизны земной поверхности. Скорость распространения сигналов зависит от физического состояния приземной части атмосферы и нижней ионосферы. Состоянием ионосферы определяется время прихода сигнала или измеряемая разность фаз относительно эталона. Кроме того, на определяемую  $\Delta\varphi$  прихода СДРВ-сигнала влияет высота нижнего слоя ионосферы: днем

слой D, ночью - E. Таким образом, в случае возмущенной ионосферы, т.е. при образовании неоднородностей, вызванных внешними воздействиями, фиксируются изменения  $\Delta\varphi$  по отношению к невозмущенному состоянию.

Невозмущенное состояние графиков функций  $\Delta\varphi$  определяется изменением состояния ионосферы день-ночь, при котором график  $\Delta\varphi(t)$  имеет синусоидальный вид (рис. 2).

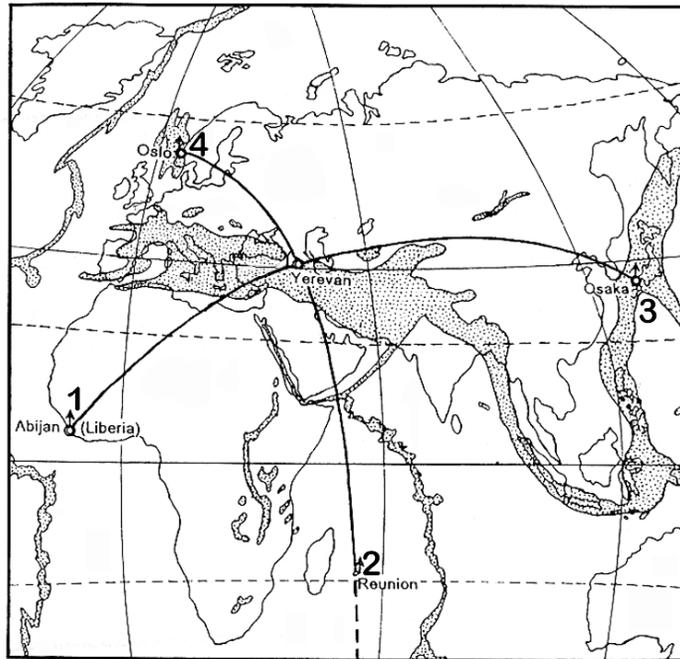


Рис. 1. Карта радиотрасс наклонного зондирования ионосферы с выделенными основными сейсмоактивными регионами планеты. Станции ФРНС "Омега":  
1 - Монровия, 2 - о. Реюньен, 3 - о. Цусима, 4 - Алдра

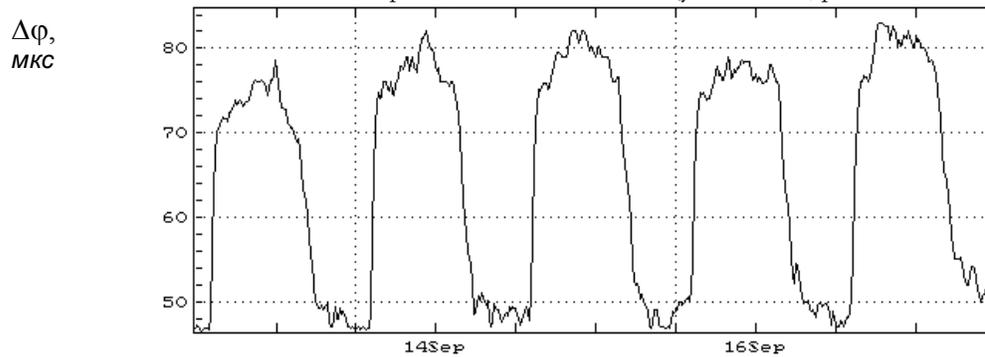


Рис. 2. График  $\Delta\varphi$  для невозмущенной ионосферы по трассе Алдра (Норвегия)- Ереван, 09.13.93. - 09.17.93 г.

Появление нерегулярных неоднородностей в случае возмущений сейсмогенного характера является причиной отклонений  $\Delta\varphi$  от нормального хода. Такие возмущения наблюдались на зависимости  $\Delta\varphi(t)$  (рис. 3), соответствующей Ардебильскому землетрясению ( $M=6,1$ ).

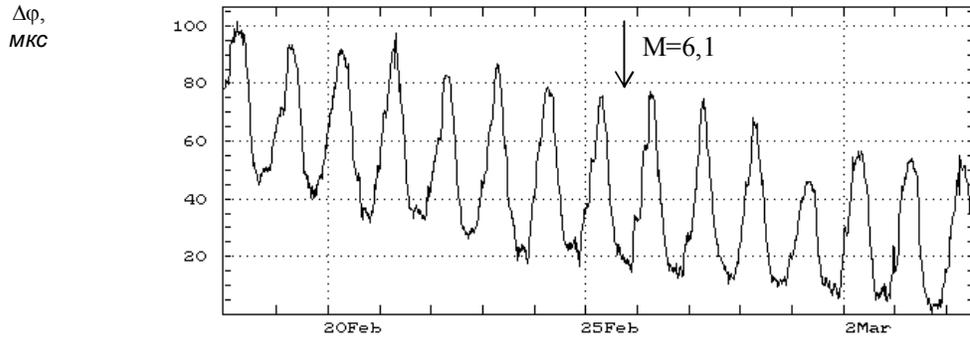


Рис. 3. Период с аномалиями распространения СДРВ

Таким образом, процесс подготовки землетрясения влияет на состояние ионосферы, вследствие чего над сейсмогенными зонами образуются области возмущенной ионосферы, на которых наблюдается аномальное распространение СДРВ. Это проявляется в виде различных искажений суточного хода. Однако не всегда отклонения оказываются настолько явными, чтобы выявить их в процессе визуального анализа. Для более детального количественного анализа аномалий разработана методика выявления аномалий, позволяющая ввести критерии оценки влияния процессов подготовки землетрясений на ионосферу.

Отметим, что отклонения от нормального хода наблюдаются и при влиянии таких возмущающих факторов несейсмогенной природы, как солнечные вспышки (рис. 4), техногенные воздействия и др., которые удастся исключить при фильтрации данных.

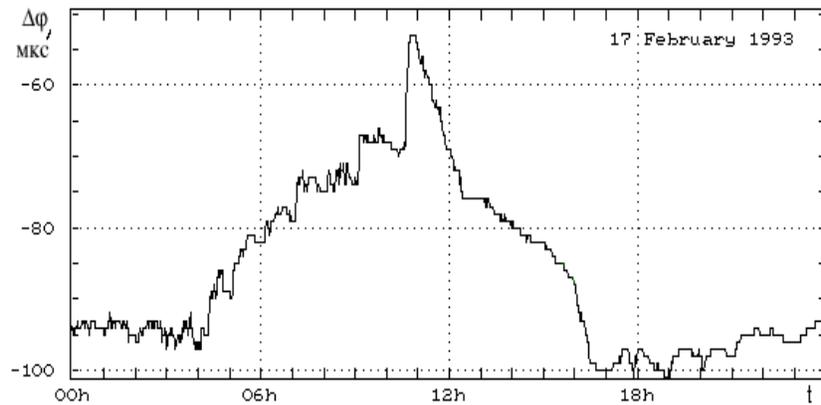


Рис. 4. Воздействие солнечной вспышки на распространение СДРВ

**Описание методики.** Вращение Земли вокруг своей оси, в основном, приводит к квазипериодическим изменениям геофизических параметров окружающей нас среды. В идеальных и стационарных условиях

эти изменения перешли бы к строго периодическому виду. Однако в реальных условиях зачастую наблюдаются отклонения от строгой периодичности вследствие таких внешних воздействий, как вариации потока солнечной энергии, неоднородности и анизотропности среды, орбитального движения Земли и т.д. В процессе долговременных наблюдений выявлено, что подобные нарушения, как правило, малы, и в среднем временное поведение параметров среды в первом приближении можно считать периодическим.

Однако, как было указано выше, в определенные интервалы времени регистрируются относительно большие отклонения измеряемых величин от основного хода вследствие значительных изменений внешних условий в исследуемых регионах.

Предлагаемая методика разработана на основе следующих качественных положений с учетом специфики объекта наблюдений.

Каждая квазипериодическая величина может быть разложена в ряд Фурье, следовательно, каждой функциональной зависимости измеряемой величины  $f(t)$  соответствует своя периодограмма – определенный дискретный набор амплитудных значений  $f_i$ . В случае строгой периодичности независимо от рассматриваемого временного интервала  $t$  будут получены идентичные периодограммы  $f^1=f^2$  при  $\Delta t \gg T$ , где  $T$  – период измеряемой величины  $f(t)$ , в данном случае  $T=24$  ч. При наличии аномалий на одном или нескольких интервалах  $\Delta t$  временной ход  $f(t)$  отклоняется от строгой периодичности, что отражается на соответствующих периодограммах, которые представляются новым набором  $f_i$ . Таким образом, информацию об аномалиях несут в себе периодограммы "аномальных" периодов времени, а разность  $\Delta f$  между двумя периодограммами разных временных интервалов есть количественная мера аномалии. Подобное определение количественной меры аномалии имеет следующие важные свойства:

- разность ( $f$  равна нулю при отсутствии аномалий, т.е. количественно определяется относительно нулевого "фона", что позволяет достичь большой точности статистической обработки;

- абсолютное значение ( $f$  пропорционально аномалии  $f(t)$ ).

Разбив интервал наблюдений на равные промежутки  $\Delta t$  и вычислив  $\Delta f^k$  для последовательности временных интервалов, получим временное развитие или аномалию, где  $\Delta f_i^k$  определяется как

$$\Delta f_i^k = f_i^{k+1} - f_i^k,$$

где  $k=1,2, \dots$  - текущий номер интервала.

Таким образом, получается  $p$  зависимостей аномального сигнала от времени  $a(t)$ , где  $p$  - количество значений в наборе  $f_i$ , а каждая функция  $a(t)$  получается при фиксированном  $i$ , где  $k$  пробегает все свои значения  $1,2,\dots$ . Величина  $a(t)$  определяется с временной точностью  $2\Delta t$  при последовательно непрерывном выборе промежутков  $\Delta t$ , т.е. всегда больше  $T$  ввиду  $\Delta t \gg T$ . Для повышения чувствительности метода, с целью выявления времени появления аномалии, целесообразно уменьшить длительность  $\Delta t$  при соблюдении условия  $\Delta t \gg T$ . Однако большей чувствительности можно достигнуть при выборе частично пересекающихся промежутков, т.к. из вышесказанного ясно, что взаимные перекрытия промежутков никоим образом не противоречат сделанным ранее рассуждениям. Выбор последовательных, частично пересекающихся

промежутков с временными смещениями  $\tau$  позволяет получить сколь угодно высокую временную чувствительность метода ввиду того, что смещения  $\tau$  могут быть произвольными, сколь угодно малыми,  $\tau \ll T$ .

**Применение методики при анализе данных СДРВ наблюдений.** На основе предложенной методики в работе исследована связь аномалий состояния ионосферы, выявляемых наклонным зондированием, и процессов подготовки землетрясений. Выявление и количественное описание аномалий распространения СДРВ, излучаемых передатчиками ФРНС "Омега", производилось по радиотрассе: Алдра (Норвегия) - Ереван (северное меридиональное направление) (рис. 1).

При этом использовались данные за 1993-1995 гг., т.е. непрерывный временной ряд примерно тысячедневной длительности. Среднее  $\Delta\varphi$  около 30..40 мкс.

Для расчета аномалии были получены периодограммы для временных интервалов длительностью 5 дней с однодневным смещением каждого последующего отрезка относительно предыдущего. Полученная таким образом последовательность представляет собой порядка тысячи 5-дневных периодограмм с временным шагом один день. Естественно, что измерения не могут производиться непрерывным образом. В НССЗ измерения производятся с частотой опроса одно измерение в минуту. Подобная дискретность временного ряда для  $\Delta\varphi$  приводит к тому, что на каждой периодограмме, кроме ярко выраженного 24-часового максимума (суточный ход ()), появляются частотно кратные ему максимумы. Кроме того, максимумы появляются на периодах, не кратных 24-часовому, которые в идеальном случае отсутствовали бы. Именно периоды, не кратные 24 часам, и есть выражение отклонений  $\Delta\varphi$  от идеальной периодичности - аномалии распространения СДРВ. Однако появление этих частот ведет к изменению абсолютных значений максимума, соответствующего периоду  $T=24$  ч. Таким образом, информация о нарушениях хода  $\Delta\varphi$  содержится также и в динамике суточного максимума. По этой причине исследовались изменения, соответствовавшие суточному периоду.

Следует отметить, что прямое использование периодограмм для выявления аномалий нецелесообразно по двум причинам. Во-первых, здесь сильно отражены невозмущенные квазипериодические колебания; во-вторых, интересующая нас информация не определена относительно нулевого фона. Исходя из сказанного, как мера (количественная характеристика) аномалий использована разность между двумя последовательными периодограммами.

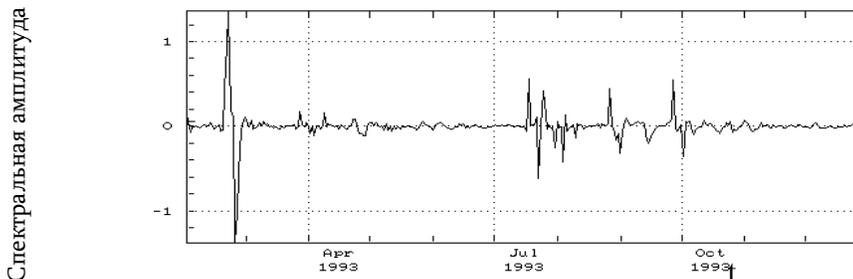


Рис. 5. Функция аномалии для периода  $T=24$  ч. за 1993 г.

На рис. 5 показана функция аномалии. Построением этой картины завершается первый этап исследований - выделение аномалий в квазипериодическом процессе.

**Аномалии распространения СДРВ и сейсмическая активность.** Следующим этапом обработки данных является вычисление кросс-корреляционных функций между аномалией  $a(t)$  и временными функциями величин, которые могут быть источниками аномалий. Значения кросс-корреляционных функций и производные от них величины служат количественными характеристиками статистической связи аномальных сигналов с их предполагаемыми источниками.

На этом этапе ход аномалий СДРВ сопоставляется с сейсмическим режимом (временным распределением землетрясений) в регионах, прилегающих к трассе распространения СДРВ. Нужно отметить, что регионы выбраны по разным направлениям по отношению к пункту приема СДРВ (Ереван) (рис. 6), благодаря чему можно судить о направленности чувствительности радиотрассы. Для этого проведена выборка землетрясений по каталогам Национального центра информации о землетрясениях США (NEIC) и Сейсмологического бюллетеня ОИФЗ РАН, употребляемым многими сейсмологическими и геофизическими службами мира (в частности, при ретроспективном анализе), по изучаемому интервалу времени.

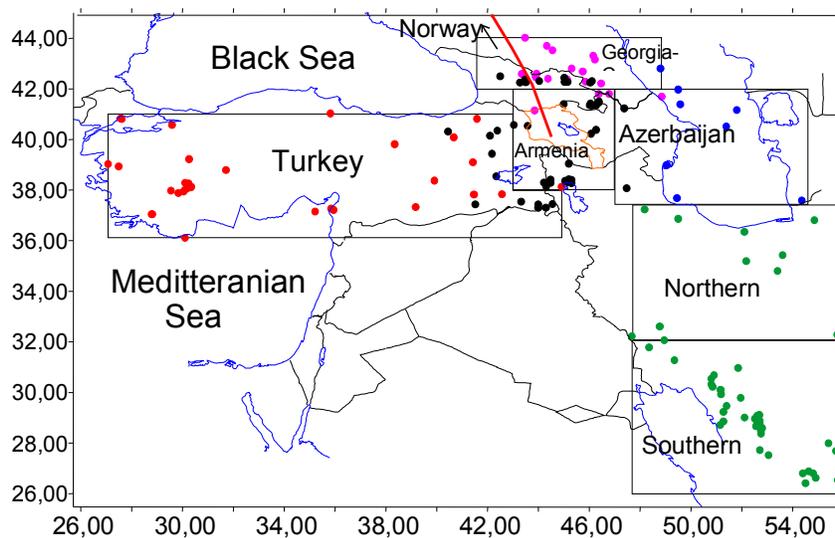


Рис. 6. Радиотрасса Алдра (Норвегия) - Ереван с выделенными регионами. Точками обозначены эпицентры землетрясений

Основываясь на исследованиях [1] по "чувствительности" радиотрасс к сильным землетрясениям  $M \geq 7$ , можно сказать, что дальность воздействия зоны подготовки сейсмического события на распространение СДРВ доходит до трех зон Френеля. Линейные размеры регионов, прилегающих к радиотрассе, выбраны равными примерно 300 км. Таким образом, выбраны землетрясения по регионам во все стороны от трассы Алдра-Ереван с условными названиями: "Армения", "Грузия-Кавказ",

"Азербайджан", "Северный Иран" и тестовый регион "Турция" со значительным удалением от трассы, вне пределов трех зон Френеля. При этом для региона "Армения" взяты землетрясения с  $M \geq 4,0$ , а в остальных случаях нижняя граница определена как  $M \geq 5,0$ . На рис. 7 показаны все сейсмические события за период 1993-1995 гг. в каждом из выделенных для анализа регионе.

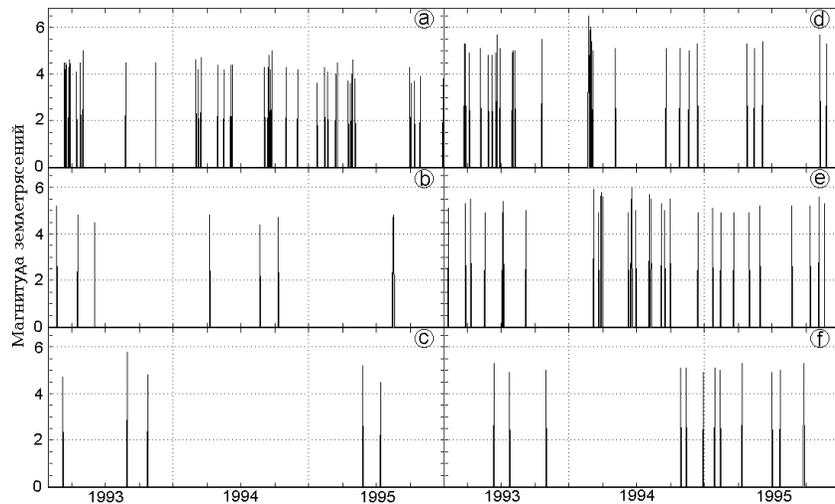


Рис. 7. Сейсмическая активность в исследуемом интервале времени по радиотрассе Алдра (Норвегия) - Ереван по выделенным регионам: а – Армения, б – Грузия-Кавказ, с – Азербайджан, d – Северный Иран, е – Южный Иран, f – Турция

Имея функцию аномалий СДРВ (рис. 5) и сейсмический режим (рис. 7), определенный для тех же интервалов времени, можно получить кросс-корреляции между ними. Для этого период 1993-1995 гг. разделен на трехмесячные интервалы, длительность которых значительно превышает известное из других работ [2, 3] время корреляции между сильными землетрясениями и атмосферными возмущениями (в пределах 40 дней). Заметим, что такое разбиение увеличивает статистику исследуемых событий и, соответственно, повышает их достоверность.

На рис. 8-12 приведены примеры функций кросс-корреляции по регионам, рассчитанные по трехмесячным временным интервалам.

До сих пор известные результаты [4, 5], полученные для других сейсмоактивных районов, относятся к случаям сильных землетрясений ( $M \geq 5,5$ ), в то время как благодаря разработанной методике оказывается возможным снизить порог чувствительности при анализе данных наклонного зондирования ионосферы к землетрясениям до магнитуд  $M \geq 4,0$ .

В целом корреляционные функции, полученные для региона "Армения", характеризуются высокой степенью корреляции, выражающейся как в величинах максимумов, так и в степени их группировки (рис. 8).

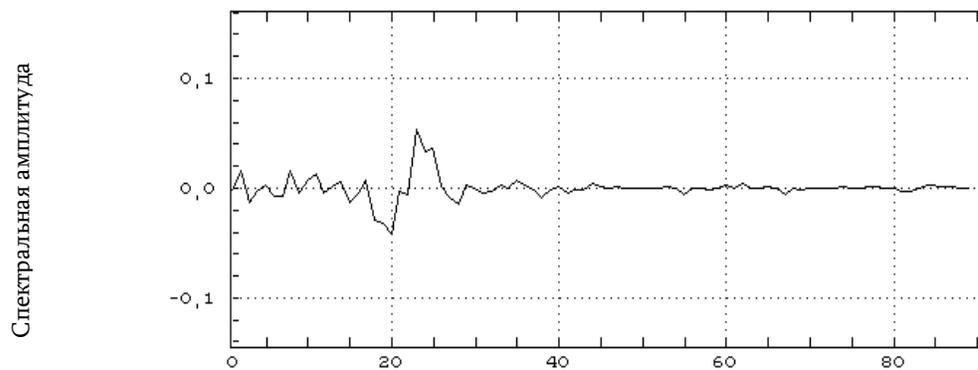


Рис. 8. Кросс-корреляция по региону “Армения”, I интервал 1993 г.

Аналогичная серия корреляционных функций для региона “Грузия-Кавказ” представлена на рис. 9. Сравнение графиков показывает, что для этой зоны корреляция между аномалиями СДРВ и имевшими место землетрясениями практически повторяет ту же закономерность, которая наблюдается по региону “Армения” - максимумы корреляции находятся в 40-дневном интервале, однако по своим абсолютным значениям максимумы чуть меньше.

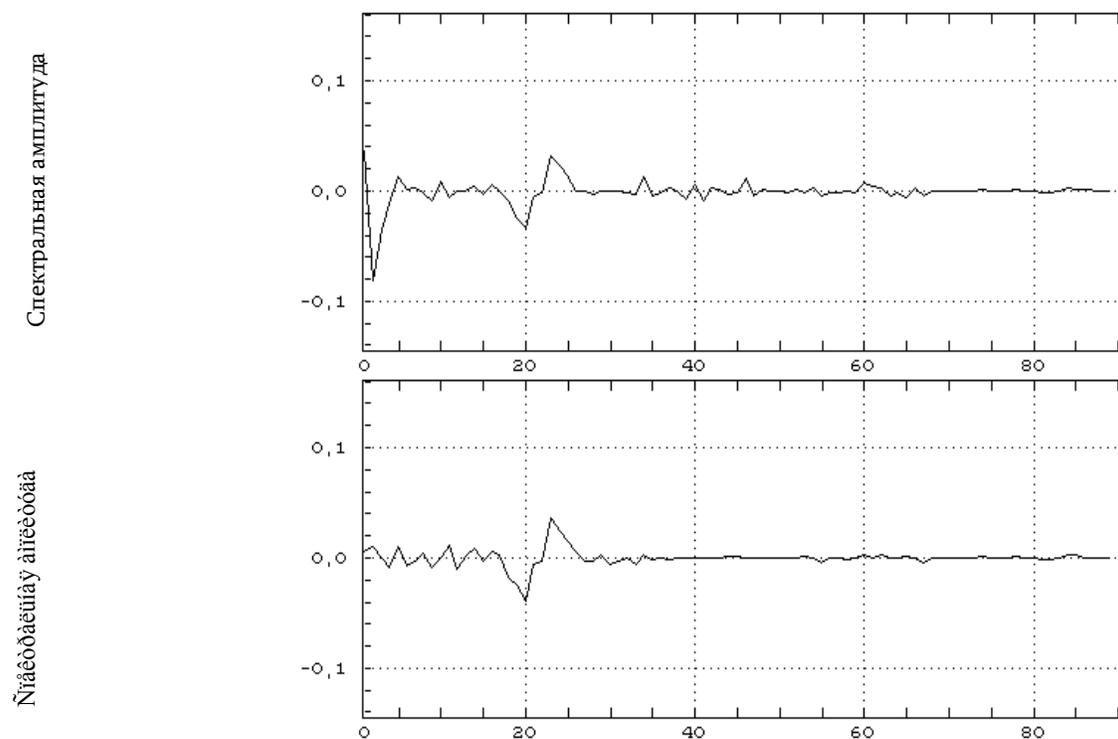


Рис. 9. Кросс-корреляция по регионам “Грузия-Кавказ” (вверху) и “Северный Иран”, I интервал 1993 г.

Для регионов “Азербайджан” и “Северный Иран” (рис. 9) также наблюдается схожая зависимость с некоторыми исключениями.

Разницы между корреляцией по регионам “Азербайджан” и “Грузия-Кавказ” практически не наблюдается, хотя эти регионы находятся в разных условиях. Регион “Грузия-Кавказ” пересекается радиотрассой, в то время как регион “Азербайджан” лежит вне ее.

Для “Южно-Иранского” и особенно “Турецкого” регионов характерна картина с относительно равномерным распределением максимумов по всему исследованному трехмесячному интервалу времени, или же наличие нескольких выделяющихся групп как в пределах, так и вне 35...40 - дневного интервала (рис. 10).

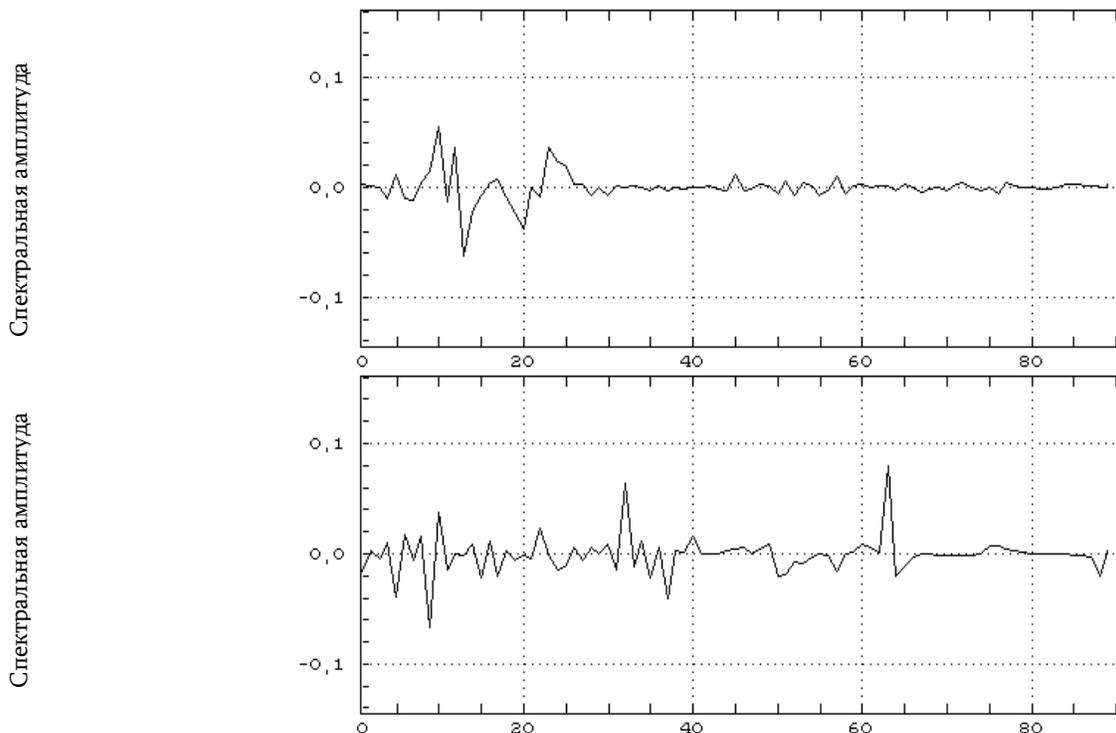


Рис. 10. Кросс-корреляция по регионам “Южный Иран”, I интервал (вверху) и “Турция”, III интервал 1993 г.

Корреляция по региону “Турция” изначально предполагалась низкой ввиду сильно неравномерного распределения землетрясений внутри региона (рис. 6).

Таким образом, анализ корреляционных функций показывает, что интервал корреляции в основном колеблется в пределах 35...40 дней для землетрясений с магнитудой  $M \geq 4,5$ .

Выявленная закономерность позволяет утверждать, что наклонное зондирование ионосферы - распространение СДРВ в волноводе Земля – ионосфера – является предвестником сильных землетрясений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воинов В.В., Гуфельд И.Л.** и др. Эффекты в ионосфере и атмосфере перед Спитакским землетрясением 7 декабря 1988 г. // Изв. АН (Россия). Физика Земли. - 1992. - № 3. - С. 96-101.
2. **Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф., Ямпольский В.С.** Статистический анализ связи возмущений фазы сигналов ФРНС "Омега" с сейсмотектоническим процессом: Препринт № 1. - М.:ИФЗ АН СССР, 1989. - 11 с.
3. **Маренко В.Ф.** Исследование связи сейсмотектонических процессов с возмущениями нижней ионосферы методом радиопросвечивания на длинных волнах: Автореф. дис. к.т.н. Иркутск / СИБИРИЗМИР АН СССР, 1989. - 19 с.
4. **Balassanian S., Mouradian A., Sahakian A., Kalinin S., Babayan M., Pogossian A.** The investigation of electromagnetic precursors to earthquakes in Armenia// Annali di Geofisica. - 1997. - Vol. XL, № 2. - P. 209-225.
5. **Гуфельд И.Л., Рожной А.А., Тюменцев С.Н., Шерстюк С.В., Ямпольский В.С.** Возмущения радиоволновых полей перед Рудбарским и Рачинским землетрясениями // Изв. АН (Россия). - Физика Земли. - 1992. - № 3. - С. 102-106.

НССЗ РА. Материал поступил в редакцию 30.12.2000.

**Ա.Ճ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ, Ա.Ա. ՊՈԴՈՍՅԱՆ, Մ.Վ. ԱԴԻԲԵԿՅԱՆ**

### **ԻՈՆԱՈՒԼՈՐՏԻ ԹԵՔ ԶՈՆԴԱՎՈՐՄԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ ԳԵՌԱ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ԱՆՈՄԱԼԻԱՆԵՐԻ ԱՆՋԱՏՄԱՆ ՍԵԹՈՂԻԿԱ**

Մշակված է իոնոսֆերայում ազդանշանի թույլ զրգռումների բացահայտման մեթոդիկա, որը հիմնված է  $\Delta\varphi$ -ի ժամանակային շարքերի պերիոդոգրամներից օրեկան պարբերության անջատման վրա: Մտացվել են կորելացիոն ֆունկցիաներ երկրաշարժերի ընտրությունների և առաջարկված մեթոդիկայով հաշվարկված անոմալիաների միջև: Ցույց է տրված, որ կորելացիայի ժամանակը հիմնականում տատանվում է 35...40 օր ժամանակահատվածում՝  $M \geq 4,5$  մագնիտուդայով երկրաշարժերի համար: Ներկայացված օրինաչափությունը թույլ է տալիս պնդել, որ իոնոսֆերայի թեք զոնդավորումը երկրաշարժերի կանխանշան է:

**A.ZH. MOURADYAN, A.A. POGHOSSIAN, M.V. ADIBEKYAN**

### **A TECHNIQUE FOR REVEALING ANOMALIES OF ELF PROPAGATION DURING SLOPE SOUNDING OF IONOSPHERE**

On the basis of allocation of the daily period from periodograms of  $\Delta\varphi$  time sequences, a technique for weak disturbances revealing ionospheric signal is developed. The correlation functions for chosen series of earthquakes and anomalies are calculated according to the offered technique. It is shown that the interval of correlation basically changes within the limits of 35...40 days for earthquakes with magnitude  $M \geq 4,5$ . The revealed law allows to state that the slope sounding of an ionosphere is a precursor of earthquakes.

## Р. М. ХАЧАТРЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПРИ  
ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ  $m$  НЕОДИНАКОВЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С  $n$   
ОДИНАКОВЫМИ НАГНЕТАТЕЛЬНЫМИ ТРУБОПРОВОДАМИ

На основании уравнений индивидуальных характеристик  $Q_H-H_H$   $m$  неодинаковых центробежных насосов и  $Q_{HT}-H_T$   $n$  одинаковых нагнетательных трубопроводов получены уравнения суммарных характеристик насосов  $\Sigma Q_H-H_H$  и трубопроводов  $\Sigma Q_{HT}-H_T$ . В результате их совместного решения получена аналитическая зависимость для определения производительности насосной станции при параллельной работе  $m$  неодинаковых центробежных насосов с  $n$  одинаковыми нагнетательными трубопроводами.

**Ключевые слова:** неодинаковые центробежные насосы, одинаковые нагнетательные трубопроводы, уравнения индивидуальных характеристик, параллельная работа насосов, производительность насосной станции, аналитическая зависимость.

Уравнения индивидуальных характеристик  $Q_H-H_H$  параллельно работающих  $m$  неодинаковых центробежных насосов для области высоких КПД можно представить в следующем виде [1,2]:

$$H_{H_i} = H_{\phi_i} - S_{\phi_i} Q_{H_i}^2, \quad (1)$$

где  $H_{H_i} = H_H$  - общий напор для параллельно работающих  $m$  неодинаковых насосов;  $H_{\phi_i}$ ,  $S_{\phi_i}$  и  $Q_{H_i}$  - соответственно фиктивный напор, фиктивное сопротивление и производительность  $i$ -го насоса.

Суммарная производительность параллельно работающих  $m$  неодинаковых насосов, согласно зависимости (1), запишется в виде

$$\sum Q_H = \sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{H_{\phi_i} - H_H}{S_{\phi_i}}}. \quad (2)$$

Из (2) получим

$$(\sum Q_H)^2 = \sum_{i=1}^m \frac{H_{\phi_i} - H_H}{S_{\phi_i}} + 2 \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^{m-1} \sqrt{\frac{(H_{\phi_i} - H_H)(H_{\phi_k} - H_H)}{S_{\phi_i} S_{\phi_k}}} \quad (k = 2, \dots, m). \quad (3)$$

Заменяя в (3) среднеарифметическое значение напоров  $H_{\phi_i}$  и  $H_{\phi_k}$  их среднегеометрическим значением:

$$H_{\phi_i} + H_{\phi_k} = 2\sqrt{H_{\phi_i} H_{\phi_k}}, \quad (4)$$

-\*после простых преобразований получим уравнение суммарной характеристики  $\Sigma Q_H$ - $H_H$  параллельно работающих  $m$  неодинаковых центробежных насосов:

$$H_H = \left( \left( \sum_{i=1}^m \sqrt{H_{\phi_i} / S_{\phi_i}} \right)^2 - (\Sigma Q_H)^2 \right) / \left( \sum_{i=1}^m 1 / \sqrt{S_{\phi_i}} \right)^2. \quad (5)$$

Уравнение индивидуальной характеристики  $Q_{HT}$ - $H_T$  параллельно работающих  $l$  одинаковых трубопроводов имеет вид

$$H_T = H_{\Gamma} + \sum h_T, \quad (6)$$

где  $H_{\Gamma}$  – геометрическая высота подачи воды,  $m$ ;  $\Sigma h_T$  – суммарная потеря напора во всасывающем и нагнетательных трубопроводах,  $m$ ;

$$\sum h_T = (S_{вг_i} + S'_{нт_i}) Q_{H_i}^2 + S_{нт} Q_{HT}^2, \quad (7)$$

$S_{вг_i}$ ,  $S'_{нт_i}$  и  $S_{нт}$  – соответственно полное сопротивление всасывающего и нагнетательных трубопроводов, расположенных внутри и вне здания насосной станции,  $(с/м^3)^2 \cdot м$ ;  $Q_{H_i}$  и  $Q_{HT}$  – соответственно расход воды, подаваемой одним из  $m$  неодинаковых насосов и проходящей по одному из  $l$  одинаковых нагнетательных трубопроводов,  $м^3/с$ .

Уравнение суммарной характеристики  $\Sigma Q_{HT}$ - $H_T$  параллельно работающих всасывающих и нагнетательных трубопроводов насосной станции можно представить в следующем виде [3, 4]:

$$H_T = H_{\Gamma} + S_{\Sigma} (\Sigma Q_{HT})^2, \quad (8)$$

где  $S_{\Sigma}$  – эквивалентное сопротивление всех всасывающих и нагнетательных трубопроводов насосной станции,  $(с/м^3)^2 \cdot м$ ,

$$S_{\Sigma} = \left( \sum_{i=1}^m 1 / \sqrt{S_{вг_i} + S'_{нт_i}} \right)^{-2} + S_{нт} / n^2, \quad (9)$$

$\Sigma Q_{HT}$  – суммарный расход воды, подаваемой  $l$  одинаковыми нагнетательными трубопроводами,  $м^3/с$ .

Имея в виду, что для режимной точки  $A$  совместной параллельной работы насосов и трубопроводов (рис.) имеют место равенства

$$\begin{aligned} H_H &= H_T = H_A, \\ \Sigma Q_H &= \Sigma Q_{HT} = Q_A, \end{aligned} \quad (10)$$

и приравнивая правые части уравнений (5) и (8) с учетом (9) и (10), получим аналитическое выражение для определения суммарного расхода воды, подаваемой  $m$  неодинаковыми центробежными насосами при параллельной их работе с  $l$  одинаковыми нагнетательными трубопроводами:

$$Q_A = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^m \sqrt{H_{\phi_i}/S_{\phi_i}}\right)^2 / \left(\sum_{i=1}^m 1/\sqrt{S_{\phi_i}}\right)^2 - H_r}{\left(\sum_{i=1}^m 1/\sqrt{S_{\phi_i}}\right)^{-2} + \left(\sum_{i=1}^m 1/\sqrt{S_{вт_i} + S'_{нт_i}}\right)^{-2} + S_{нт}/n^2}}. \quad (11)$$

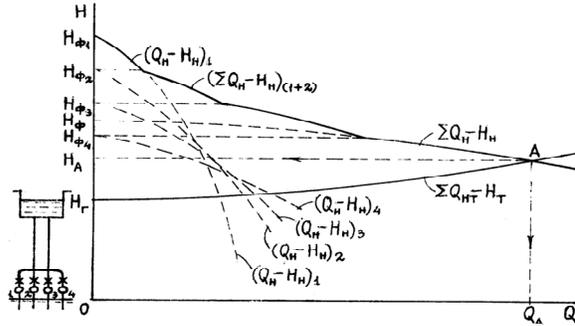


Рис.

Чтобы несколько уменьшить хотя и незначительное увеличение про-изводительности насосной станции, вызванное принятием допущения (4), введем поправочный коэффициент  $K_m$  при совместной параллельной работе  $m$  неодинаковых одиночных насосов, имеющий вид

$$K_m = \frac{2\sqrt{H_{\phi_1} H_{\phi_2}}}{H_{\phi_1} + H_{\phi_2}} \cdot \frac{2\sqrt{H_{\phi_2} H_{\phi_3}}}{H_{\phi_2} + H_{\phi_3}} \dots \frac{2\sqrt{H_{\phi_{(m-1)}} H_{\phi_m}}}{H_{\phi_{(m-1)}} + H_{\phi_m}}. \quad (12)$$

При совместной параллельной работе двух неодинаковых центро-бежных насосов поправочный коэффициент  $K_2$  равен первой дроби зависимости (12); при параллельной работе трех насосов  $K_3$  равен произведению первых двух дробей и т.д.

С учетом поправочного коэффициента  $K_m$  зависимость (11) примет следующий вид:

$$Q_A = \sqrt{\frac{K_m \left(\sum_{i=1}^m \sqrt{H_{\phi_i}/S_{\phi_i}}\right)^2 / \left(\sum_{i=1}^m 1/\sqrt{S_{\phi_i}}\right)^2 - H_r}{\left(\sum_{i=1}^m 1/\sqrt{S_{\phi_i}}\right)^{-2} + \left(\sum_{i=1}^m 1/\sqrt{S_{вт_i} + S'_{нт_i}}\right)^{-2} + S_{нт}/n^2}}. \quad (13)$$

В частном случае, при параллельной работе  $m$  одинаковых центро-бежных насосов с  $l$  одинаковыми нагнетательными трубопроводами, зави-симости (11) и (13) примут вид, полученный нами ранее [5]:

$$Q_A = \sqrt{(H_{\phi} - H_r) / \left( \frac{S_{\phi} + S_{вт} + S'_{нт}}{m^2} + \frac{S_{нт}}{n^2} \right)}, \quad (14)$$

так как в этом случае имеют место равенства:

$$\begin{aligned} H_{\phi_1} &= H_{\phi_2} = \dots = H_{\phi_m} = H_{\phi}, \\ S_{\phi_1} &= S_{\phi_2} = \dots = S_{\phi_m} = S_{\phi}, \end{aligned} \quad (15)$$

и, согласно (12) и (15), поправочный коэффициент равен единице ( $K_m=1$ ).

Рассмотрим численные примеры параллельной работы двух, трех и четырех центробежных насосов различных марок, характеристики которых сведены в табл. 1.

Таблица 1

Колич. паралл. работ. насосов n, штук	Марка насоса		Фиктивный напор насоса $H_{\phi}, \text{ м}$	Фиктивное сопротивление насоса $S_{\phi}, (\text{с/л})^2/\text{м}$	Расходы воды опт. области работы насоса $Q, \text{ л/с}$	Суммарный расход воды опт. области работы насосов $\Sigma Q, \text{ л/с}$
	нынешняя	прежняя				
2	Д 320-70	6НДс	92,6	0,0033	60-92	171-259
	Д 500-65	10Д-6	80,7	0,00084	111-167	
3	Д 320-70	6НДс	92,6	0,0033	60-92	190,4-292,4
	Д 500-65	10Д-6	80,7	0,00084	111-167	
	К 90/55	4К-8	67,3	0,0217	19,4-33,4	
4	Д 200-95	4НДв	121,0	0,0096	37,5-55	226,5-351,5
	К 90/85	4К-6	105,6	0,0237	18-37,5	
	Д 320-70	6НДс	92,6	0,0033	60-92	
	Д 500-65	10Д-6	80,7	0,00084	111-167	

В табл.2 приведены значения производительности насосной станции, подсчитанные теоретическим способом по зависимостям (11), (13) настоящей статьи и (7) из [3], а также графическим способом, в случае подачи воды по двухниточному одинаковому нагнетательному трубопроводу при различных его длинах и прочих равных условиях.

Приведены также проценты отклонений от значений производительности насосной станции, подсчитанных методом последовательных приближений по зависимости (2).

Как видно из табл.2, предлагаемые зависимости обеспечивают достаточно высокую, с практической точки зрения, точность окончательных результатов, полученных с гораздо меньшими затратами времени и труда, чем при графическом способе решения задач.

Таблица 2

Кол. нас. разл. марок т, штук	Геом. высота подачи Нг, м	Двухнит. одинак. нагнет. трубопровода			Производительность насосной станции, Qд, л/с				
		диаметр d, мм	уд. сопрот. S <sub>сопр.</sub> , (с/м <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	длина L <sub>теп.</sub> , м	методом посл. приibl. по зав. (2)	графичес. способом	процент отклонен ия	теоретичес. способом по зав. (11)	процент отклонения
2	45	350	0,4365	500	304,526	304,6	+0,024	305,011	+0,16
				1000	286,608	288,6	+0,695	287,161	+0,19
				1500	271,505	271,8	+0,109	272,118	+0,226
				2000	258,547	258,5	-0,018	259,216	+0,259
				4000	220,584	221,2	+0,279	221,436	+0,386
3	45	350	0,4365	500	328,347	328,8	+0,138	329,783	+0,437
				1000	304,7	305,4	+0,230	306,427	+0,567
				1500	285,405	286,3	+0,314	287,420	+0,706
				2000	269,245	270,3	+0,392	271,562	+0,861
				4000	222,96	223,4	+0,197	227,153	+1,881
4	50	400	0,2189	500	412,77	413,4	+0,153	416,254	+0,844
				1000	390,467	391,0	+0,137	394,361	+0,997
				1500	371,33	371,8	+0,127	375,594	+1,148
				2000	354,672	355,5	+0,233	359,275	+1,298
				4000	304,627	305,0	+0,122	310,360	+1,882

Продолжение табл. 2

Кол. нас. разл. марок т, штук	Геом. высота подачи Нг, м	Двухнит. одинак. нагнет. трубопровода			Производительность насосной станции, Qд, л/с				
		диаметр d, мм	уд. сопрот. S <sub>сопр.</sub> , (с/м <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	длина L <sub>теп.</sub> , м	поправочный коэф. K <sub>тп</sub> по зав. (12)	теоретическим способом по зав. (13)	процент отклонения	теоретическим способом по зав. ст. [3]	процент отклонения
2	45	350	0,4365	500	0,99764	304,241	+0,093	304,147	-0,124
				1000		286,436	-0,060	286,151	-0,160
				1500		271,431	-0,027	271,185	-0,118
				2000		258,561	+0,005	258,561	+0,005
				4000		220,877	+0,133	220,714	+0,059
3	45	350	0,4365	500	0,99354	327,431	-0,279	-	-
				1000		304,242	-0,150	-	-
				1500		285,371	-0,012	-	-
				2000		269,625	+0,141	-	-
4	50	400	0,2189	500	0,99319	413,119	+0,085	-	-
				1000		391,391	+0,237	-	-
				1500		372,765	+0,386	-	-
				2000		356,569	+0,535	-	-
				4000		308,023	+1,115	-	-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прегер Е.А.** Аналитическое исследование параллельной работы насосов // Научные труды ЛИСИ.- 1953.- Вып. 16. - С. 32-46.
2. **Ильин В. Г.** Расчет совместной работы насосов, водопроводных сетей и резервуаров. - Киев: Госстройиздат УССР, 1963.- 136 с.
3. **Хачатрян Р.М.** Определение производительности насосной станции при параллельной работе двух неодинаковых центробежных насосов с  $n$  одинаковыми нагнетательными трубопроводами: Бюллетень строителей Армении. Специальный выпуск.-1997. - №12(17).- С.28-32 (на арм.).
4. **Хачатрян Р.М.** Определение эквивалентного сопротивления трубопроводов насосной станции // Изв. НАН РА и ГИУА.Сер.ТН.-1999. - Т.52, №3. - С. 410 - 414.
5. **Хачатрян Р. М.** Определение коэффициента редукции производительности параллельно работающих одинаковых центробежных насосов // Исследование по гидротехнике и сантехнике: Межвуз.сб.научн.тр. / ЕрПИ. - Ереван, 1984.- С. 64-70.

ЕрГУАС. Материал поступил в редакцию 02.08.2000.

**Ռ. Մ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ**

**ՊՈՍՏԱՎԱԿԱՅԱՆԻ ԱՐՏԱՂՈՂՈՎԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՏԱՐԲԵՐ ՄԱԿԻՇՆԵՐԻ  $m$  ԿԵՆՏՐՈՆԱԽՈՒՅՄ ՊՈՍՏԵՐԻ՝  
 $n$  ՄԻԱՆՄԱՆ ՄՂՄԱՆ ԽՈՂՈՎԱԿԱՇԱՐԿԵՐԻ ՀԵՏ ԶՈՒԳԱՀԵՈ ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԴԵՊՈՒՄ**

Տարբեր մակնիշների  $m$  կենտրոնախույս պոմպերի անհատական  $Q_{\text{պ}}-H_{\text{պ}}$  և  $n$  միանման մղման խողովակաշարերի  $Q_{\text{մղ}}-H_{\text{մղ}}$  բնութագրերի հավասարումների հիման վրա ստացվել են պոմպերի  $\Sigma Q_{\text{պ}}-H_{\text{պ}}$  և խողովակաշարերի  $\Sigma Q_{\text{մղ}}-H_{\text{մղ}}$  գումարային բնութագրերի հավասարումները: Նրանց համատեղ լուծման արդյունքում ստացվել է տարբեր մակնիշների  $m$  կենտրոնախույս պոմպերի  $n$  միանման մղման խողովակաշարերի հետ գուգահեռ աշխատանքի դեպքում պոմպակայանի արտադրողականությունը որոշելու վերլուծական առնչություն:

**R. M. KHACHATRYAN**

### **DETERMINATION OF PUMPING STATION CAPACITY IN PARALLEL OPERATION OF $m$ IDENTICAL CENTRIFUGAL PUMPS WITH $n$ IDENTICAL DELIVERY PIPELINES**

Based on the equations of individual characteristic curves  $Q_p-H_p$  for  $m$  identical centrifugal pumps and  $Q_{\text{dp}}-H_{\text{pl}}$  for  $n$  identical delivery pipelines, the equations of total characteristic curves  $\Sigma Q_p-H_p$  and  $\Sigma Q_{\text{dp}}-H_{\text{pl}}$  are obtained. Owing to their joint solution, an analytical expression for determination of pumping station capacity in parallel operation of  $m$  inidentical centrifugal pumps with  $n$  identical delivery pipelines is obtained.

Г.В. БАРЕГАМЯН

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ИНВЕРТОРОВ С СИНУСОИДАЛЬНЫМ ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И ДВУХУРОВНЕВОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Рассматриваются вопросы автоматизированного расчета стабилизированных инверторов с однократным преобразованием электрической энергии, в которых синусоидальное выходное напряжение формируется посредством двухуровневой широтно-импульсной модуляции. Приводятся аналитические соотношения для расчета параметров компонентов и инвертора в целом. Описываются алгоритм и программа расчета на алгоритмическом языке PASCAL.

**Ключевые слова:** инвертор, коммутатор, трансформатор, фильтр, система управления, широтно-импульсная модуляция.

В последнее время для анализа и проектирования различных электронных устройств все шире применяются компьютерная техника и универсальные системы моделирования. Известны также специализированные системы, предназначенные для моделирования и анализа определенного класса электронных устройств (например, система ЭЛТРАН для вентильных преобразователей). Однако на практике при решении конкретных задач нередко эффективными оказываются индивидуальные алгоритмы и программы, позволяющие за короткое время в диалоговом режиме с компьютером вести расчет и проектирование устройства.

В данной статье рассматривается машинный алгоритм и программа расчета токов и напряжений ветвей, а также других параметров схемы инвертора (рис.1). Инвертор собран по структуре "входной фильтр - коммутатор - трансформатор - выходной фильтр", т.е. с одним преобразованием энергии, а выходное синусоидальное напряжение формируется посредством двухуровневой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом путем переключения коммутатора импульсами управления, поступающими от системы управления (СУ) инвертором и следующими с высокой несущей частотой, на обмотках трансформатора формируются двуполярные прямоугольные импульсы напряжения, ширины которых промодулированы по синусоидальному закону. После фильтрации на нагрузке получается примерно синусоидальное напряжение. Стабилизация выходного напряжения также осуществляется СУ путем воздействия на коэффициент заполнения импульсов.

В рассматриваемой структуре инвертора при ШИМ имеют место чрезвычайно сложные процессы, не поддающиеся точному аналитическому описанию. Напряжения и токи ветвей, кроме составляющих выходной (основной) частоты  $f$ , содержат также пульсационные составляющие несущей частоты  $f_n$  сложной формы, что затрудняет их учет при анализе и расчете процессов.

При анализе электромагнитных процессов в схеме инвертора рис.1 ключевые приборы, трансформатор и элементы фильтров предполагаются идеальными, нагрузка - активно-индуктивной, на входе включен емкостной фильтр ( $L_d=0$ ), а на выходе - "Г"-образный LC-фильтр.

Аналитический анализ проводился в три этапа путем определения основных, пульсационных и результирующих величин.

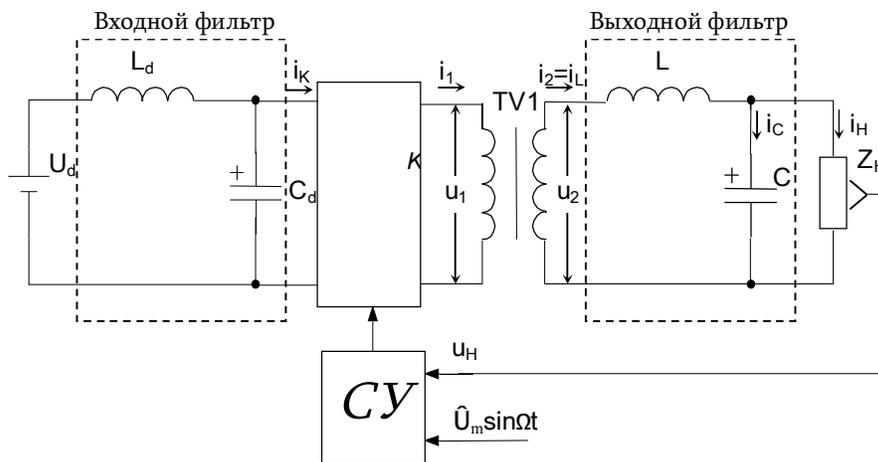


Рис.1. Схема инвертора

На первом этапе определяются напряжения и токи основной частоты на вторичной стороне трансформатора. При этом проще предположить напряжение и ток нагрузки синусоидальными, что обычно вносит несущественную ошибку в расчет. Для более точных расчетов можно воспользоваться известной зависимостью между напряжением, его первой гармоникой и коэффициентом несинусоидальности  $\xi$ :

$$U_{H1} = U_H / \sqrt{1 + \xi^2}.$$

Что касается тока нагрузки, то в силу фильтрующих свойств активно-индуктивной нагрузки ток получается практически отфильтрованным.

Несравненно сложной задачей является расчет пульсаций. Для этого в [1] предлагается оперировать максимальными пульсациями токов фильтра, что приводит к достаточно грубой оценке параметров. Более точным можно считать подход с использованием так называемого метода "локального усреднения" [2], сущность которого заключается в следующем. В пределах такта (периода несущей частоты), считая напряжение нагрузки постоянным, определяются параметры пульсации тока дросселя, имеющей модулированную треугольную форму. Параметры последней зависят от коэффициента заполнения ШИМ импульсов и меняются от такта к такту. Если соотношение несущей и выходной частот сравнительно велико, что обычно имеет место на практике, то коэффициент заполнения можно приближенно представить синусоидальной функцией выходной частоты с амплитудой, равной глубине модуляции (M). Тем самым пульсации тока "присваивается" модуляционная огибающая, и удается записать конечное и достаточно точное аналитическое

выражение в функции от  $M$ . В силу принятых допущений пульсация тока дросселя полностью протекает через конденсатор фильтра, вызывая пульсацию выходного напряжения. Последняя определяется интегрированием пульсации тока.

Результирующие величины на вторичной стороне трансформатора определяются "наложением" основных и пульсационных составляющих. По ним легко вычисляются средние, эффективные и максимальные значения искомых величин: напряжений и токов элементов фильтра, трансформатора, коммутатора и входящих в него ключевых приборов, входного фильтра и др. В частности, для элементов выходного LC - фильтра в относительных единицах получены следующие соотношения:

- для дросселя:

$$\bar{I}_L = F_4, \quad \bar{I}_{L_{\max}} = \sqrt{2} [F_1 + F_3 (1 - M^2 \cos^2 \alpha)]_p$$

$$\bar{U}_L = \sqrt{\bar{X}_L^2 F_1^2 + \frac{2}{M^2} F_2^2 - 1}, \quad \bar{U}_{L_{\max}} = \sqrt{2} \left( 1 + \frac{F_2}{M} \right);$$

- для конденсатора:

$$\bar{I}_C = \sqrt{\bar{Y}_C^2 + F_4^2 - F_1^2}, \quad \bar{I}_{C_{\max}} = \sqrt{2} [\bar{Y}_C + F_3 (1 - M^2 \cos^2 \beta)]$$

$$\bar{I}_{CP} = \sqrt{F_4^2 - F_1^2}, \quad \bar{I}_{CP_{\max}} = \sqrt{2} F_3, \quad \bar{U}_C = \bar{U}_H; \quad \bar{U}_{CP_{\max}} = \frac{\pi \bar{\Omega} F_3}{2 \sqrt{2} \bar{Y}_C},$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_{C_{\max}} &= \sqrt{2} U_H + \bar{U}_{CP_{\max}}, \quad \xi = \\ &= \bar{U}_{CP_{\max}} \sqrt{\left( 24 + 2M^2 - 30M^4 + \frac{135}{8} M^6 \right) / 45}. \end{aligned}$$

В выражениях приняты:  $\bar{X}_L = 2\pi fL/Z_H$ ,  $\bar{Y}_C = 2\pi fCZ_H$  - относительные сопротивление дросселя и проводимость конденсатора фильтра на основной частоте;  $\alpha$  - угол между основными гармониками входного тока и напряжения;  $\beta$  - угол между основными гармониками входного и выходного напряжений;  $\bar{\Omega} = f/f_H$  - относительная выходная частота; индексом "р" обозначены пульсационные составляющие;  $F_1... F_9$  - расчетные коэффициенты (часть из них используется далее):

Таблица

Схема комм.		Параметры		
		мостовая	полумостовая	нулевая
Трансформатор	$\bar{U}_1$	$\sqrt{2}F_2 / M$		
	$\bar{U}_2$	$\sqrt{2}F_2 / M$		
	$\bar{I}_1$	$F_4$		
	$\bar{I}_2$	$F_4$		
	$\bar{S}_T$	$\sqrt{2}F_2 F_4 / M$	$\sqrt{2}F_2 F_4 / M$	$(1 + 0,5\sqrt{2})F_2 F_4 / M$
	$n$	$\frac{U_{d \min}}{\sqrt{2}U_H F_{2 \max}}$	$\frac{U_{d \min}}{2\sqrt{2}U_H F_{2 \max}}$	$\frac{\sqrt{2}U_{d \min}}{U_H F_{2 \max}}$
Коммутатор	$\bar{I}_{KO}$	$MF_1 \cos \alpha / \sqrt{2}$	$MF_1 \cos \alpha / 2\sqrt{2}$	$\sqrt{2}MF_1 \cos \alpha$
	$\bar{I}_{K1}$	–	$F_1 / 2$	–
	$\bar{I}_{K2}$	$MF_1 / 2$	$MF_1 / 4$	$MF_1$
	$\bar{I}_{KP}$	$F_6$	$F_6 / 2$	$2F_6$
	$\bar{I}_{Пср}$	$F_7$		
	$\bar{I}_{Пэфф}$	$F_4 / \sqrt{2}$		
	$\bar{I}_{Пmax}$	$F_5$		
Вентили	$\bar{I}_{Тср}$	$\sqrt{2}F_1(0,5 + F_8) / \pi$		
	$\bar{I}_{Тэфф}$	$F_9$		
	$\bar{I}_{Тmax}$	$F_5$		
	$\bar{I}_{Дср}$	$\sqrt{2}F_1(0,5 - F_8) / \pi$		
	$\bar{I}_{Дэфф}$	$\sqrt{F_4^2 / 2 - F_9^2}$		
	$\bar{I}_{Дmax}$	$F_5$		

$$F_1 = \sqrt{1 - 2\bar{Y}_C \sin \varphi + \bar{Y}_C^2}, \quad F_2 = \sqrt{[1 - \bar{X}_L (\bar{Y}_C - \sin \varphi)]^2 + (\bar{X}_L \cos \varphi)^2},$$

$$F_3 = \frac{\pi \bar{\Omega} F_2}{2M \bar{X}_L}, \quad F_4 = \sqrt{F_1^2 + F_3^2 \frac{2}{3} \left(1 - M^2 + \frac{3}{8} M^4\right)}, \quad M = \sqrt{2n} F_2 \frac{U_H}{U_d},$$

$$F_5 = \sqrt{2} \left\{ F_1 \cos \left( \frac{2F_3 M^2 \alpha}{2F_3 M^2 - F_1} \right) + F_3 \left[ 1 - M^2 \cos \left( \frac{F_1 \alpha}{2F_3 M^2 - F_1} \right) \right] \right\},$$

$$F_6 = \sqrt{F_1^2 \left[ 1 - \frac{1}{4} M^2 (2 + \cos 2\alpha) \right] + F_4^2}, \quad F_{2\max} = F_2 / \cos \varphi = (\cos \varphi)_{\min},$$

$$F_7 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} F_1 \left\{ 1 + \frac{1}{6} \left[ \frac{F_3}{F_1} (1 - M^2 \sin^2 \alpha) \right]^2 \right\}, \quad F_8 = \frac{\pi}{8} M \cos \alpha,$$

$$F_9 = \sqrt{F_1^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{2M}{3\pi} \cos \alpha \right) + \frac{F_3^2}{6} \left( 1 + \frac{2M}{\pi} - M^2 - \frac{8M^3}{3\pi} + \frac{3M^4}{8} + \frac{16M^5}{15\pi} \right)},$$

$$\alpha = \arctg \left( \frac{\bar{Y}_C - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) - \beta, \quad \beta = \arctg \left[ \frac{\bar{X}_L \cos \varphi}{1 - \bar{X}_L (\bar{Y}_C - \sin \varphi)} \right],$$

где  $Z_n$ ,  $\varphi$  - сопротивление и угол нагрузки;  $n$  - коэффициент трансформации.

Расчетные соотношения для остальной части схемы инвертора зависят от типа применяемого коммутатора. В таблице приведены выражения для расчета эффективных значений токов, напряжений, коэффициента трансформации и габаритной мощности трансформатора, средних, максимальных и эффективных токов транзисторов и возвратных диодов, а также составляющих входного тока коммутатора (постоянной, с выходной, удвоенной выходной и несущей частотами).

Следует отметить, что часть приведенных соотношений для пульсационных составляющих и в случае мостового коммутатора заимствована из [2], некоторые из которых уточнены. Расчетные формулы обобщены и приведены к относительным величинам. Причем в качестве базовых величин для вторичной стороны трансформатора выбраны эффективные значения напряжения и тока нагрузки ( $U_H$ ,  $I_H$ ), а для первичной стороны - их приведенные значения ( $nU_H$ ,  $I_H/n$ ).

На основе полученных расчетных соотношений разработан алгоритм (рис.2) и составлена программа на алгоритмическом языке PASCAL для машинного расчета процессов в схеме инвертора. Программа рассчитана для работы в диалоговом режиме с компьютером, а расчет ведется в следующей последовательности.

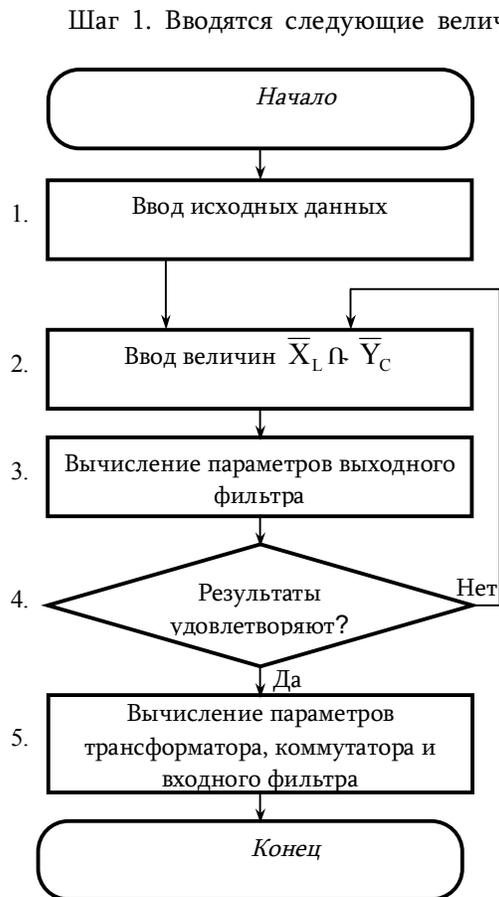


Рис.2. Блок-схема алгоритма расчета процессов в инверторе

Отметим, что при принятых допущениях ошибка расчета процессов по приведенным формулам обычно не превышает 2...3%. При необходимости полученные результаты могут служить отправными для оптимизации показателей проектируемого инвертора с привлечением, например, универсальных систем моделирования и анализа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барегамян Г.В., Маркарян В.В., Симонян Г.Р.** Расчет выходного LC - фильтра инвертора с ШИМ / ГИУА; Деп. в АрмНИИНТИ 08.06.98, <sup>1</sup> 85 – Ар. 98. - Ереван, 1998. - 13 с.
2. Статические агрегаты бесперебойного питания / **Г.Г. Адамия, Е.И. Беркович, А.С. Картавых** и др.; Под ред. **Ф.И. Ковалева**. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 288 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.09.2000.

### Գ.Վ. ԲԱՐԵԴԱՄՅԱՆ

#### ԵՐԿՄԱԿԱՐԴԱԿ ԼԱՅՆԱ - ԻՄՊՈՒԼՍԱՑԻՆ ՍՈՂՈՒԼԱՑՄԱՍԲ ԵՎ ՍԻՆՈՒՍՈՒԴԱՑԻՆ ԵԼՔԱՑԻՆ ԼԱՐՄԱՍԲ ԻՆՎԵՐՏՈՐՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄԸ

Դիտարկվում են էլեկտրական էներգիայի մեկ ձևափոխմամբ կայունացված ինվերտորների ավտոմատացված հաշվարկման հարցերը, որոնցում ելքային սինուսոիդային լարումը ձևավորվում է երկդիրք լայնա-ինպուլսային մոդուլացման միջոցով: Բերված են տարրերի և ընդհանուր առմամբ ինվերտորի պարամետրերի հաշվարկման վերլուծական արտահայտությունները: Նկարագրվում են հաշվարկման ալգորիթմը և ՊԱՄԿԱԼ ալգորիթմական լեզվով ծրագիրը:

### G.V. BAREGHAMYAN

#### INVERTER CALCULATION WITH SINUSOIDAL OUTPUT VOLTAGE AND TWO-LEVEL PULSE-WIDTH MODULATION

Stabilized inverter calculation automation problems with single energy conversion are considered. The sinusoidal output voltage is formed by two-level pulse-width modulation. Analytical relations for parameter calculations and the inverter as a whole are presented. The algorithm calculation and the corresponding PASCAL program are described.

В.М. МОВСЕСЯН

РЕЗОНАНСНЫЙ ИНВЕРТОР С ЦИКЛИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ  
ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Разработана цифровая система циклического управления резонансным инвертором. Предложена методика расчета резонансного контура, основанная на условии минимизации потерь.

**Ключевые слова:** резонансный инвертор, циклическое управление, коммутационные потери.

Резонансные инверторы (РИ) широко применяются для преобразования постоянного напряжения в высокочастотное переменное. Ввиду меньших коммутационных потерь по сравнению с другими преобразователями их часто используют в источниках вторичного электропитания (ИВЭП) с бестрансформаторным входом для трансформации уровня напряжения. Обычно в ИВЭП с регулируемым выходом инвертор является управляемым, и в его функции также входит регулирование выходного напряжения. На практике РИ с последовательным резонансным контуром применяются в случаях, когда нагрузка постоянная или мало изменяется. Если же нагрузка изменяется в широких пределах, то она подключается параллельно к емкости контура (рис. 1). В настоящее время частотное управление является основным методом регулирования РИ благодаря своей простоте. Однако в этом случае при изменении частоты в широких пределах потери растут из-за возрастания фазового сдвига между током и напряжением ключа. С целью минимизации потерь в последовательном РИ с постоянной нагрузкой в [1] предлагается циклический метод регулирования выходной мощности путем изменения числа периодов отбора мощности от источника к числу периодов, где нагрузка питается от энергии, накопленной в резонансном контуре. При этом рабочая частота и ток коммутации силовых ключей  $I_0$  (рис. 1) сохраняются постоянными. Однако управление с постоянным значением тока коммутации может оказаться неработоспособным, когда сопротивление нагрузки изменяется в широких пределах. Поскольку  $I_0$  сохраняется постоянным при изменении амплитуды тока нагрузки, то время  $t_s$ , необходимое для запирающего транзистора, тоже меняется. Если  $I_0$  выбрать из наихудшего случая, то во всех остальных случаях  $I_0$  будет больше требуемого, и, следовательно, потери будут неоправданно большими.

В данной работе предлагается циклический метод управления РИ с параллельным подключением нагрузки (рис. 1), где время, необходимое для запирающего транзистора, держится не меньше допустимого значения, а нагрузка может меняться в широких пределах. Рабочую частоту можно выбирать как на восходящей области амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) контура (рис. 1в), так и на нисходящей, где частота больше резонансной. Второй вариант при использовании полностью управляемых транзисторных ключей является предпочтительным, т.к. в

этом случае коммутационные потери меньше [1]. При этом транзисторы отпираются при нулевом токе, т.е. без потерь, а запираются принудительно, когда они проводят ток  $I_0$ .

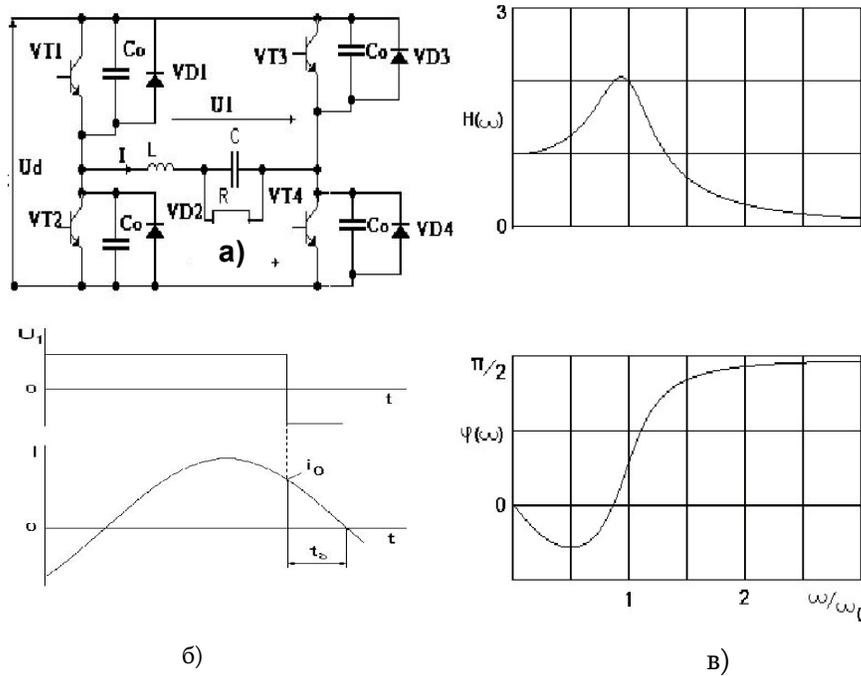


Рис. 1. Резонансный инвертор: а - электрическая схема; б - напряжение и ток диагонали; в - частотные характеристики контура

При циклическом методе управления инвертор может работать в следующих режимах: питания - открыта пара перекрестных транзисторов, энергия отбирается от источника; рекуперации - открыта пара перекрестных диодов, энергия контура возвращается в источник; покоя - открыта пара верхних или нижних ключей (транзистор и противоположный диод), диагональ замкнута накоротко, нагрузка питается от контура.

Вводятся обозначения для состояний инвертора (в скобках указаны открытые приборы): S1(VT1,VT4), S2(VT2,VT3) - режим питания; S3(VD1,VD4), S4(VD2,VD3) - режим рекуперации; S5(VT1,VD3), S6(VT3,VD1), S7(VT2,VD4), S8(VT4,VD2) - режим покоя. Пары состояний S5, S6 и S7, S8 эквивалентны, поэтому можно использовать одну из них. Вводятся обозначения для тактов (полупериодов) основной частоты инвертора: a1(S3,S1), a2(S4,S2) с напряжением  $\pm U_d$  на диагонали; a3(S6,S5), a4(S5, S6) с нулевым напряжением на диагонали. Амплитуда первой гармоники напряжения на диагонали определяется по формуле [1]

$$U_{1m} = \frac{4}{\pi} U_d \frac{2M}{2N}, \quad (1)$$

где 2M - число тактов с напряжением  $\pm U_d$  (a1 или a2) в цикле управления с 2N тактами основной частоты.

Амплитуда первой гармоники выходного напряжения определяется в виде

$$U_{2m} = H(x, R)U_{1m}, \quad (2)$$

где  $H(x, R)$  - коэффициент передачи контура;  $x = \omega/\omega_0$  - относительная частота;  $R$  - сопротивление нагрузки.

Для регулирования напряжения  $U_{2m}$  изменяется  $U_{1m}$  путем изменения числа  $M$  при фиксированном  $N$ . При стабилизации  $U_{2m}$ , в случае изменения  $R$  или  $U_d$ , соответствующим образом изменяется  $M$  (обычно по сигналу обратной связи).

Для заданной последовательности состояний, сохраняемой в запоминающем устройстве, система управления (рис. 2) формирует импульсы открытого состояния транзисторов. Чтобы обеспечить заданный необходимый интервал  $t_\delta$  между моментами запираания транзисторов одной пары и отпираания другой пары, с помощью тактового генератора  $G$  генерируются прямоугольные импульсы длительностью  $t_\delta$  и частотой  $2f$ . Далее из тактового сигнала в соответствии с типом формируемого такта ( $a_1, \dots, a_4$  - логические переменные, и в каждый момент времени только одна из них равна единице) с помощью логических вентилях  $G_2 \dots G_7$  формируются импульсы управления транзисторами:  $VT_1 = a_1 \& g' \vee a_3 \& g' \vee a_4$ ,  $VT_2 = a_2 \& g'$ ,  $VT_3 = a_2 \& g' \vee a_3 \vee a_4 \& g'$ ,  $VT_4 = a_1 \& g'$ . На рис. 3 показаны временные диаграммы управляющих сигналов, тока и напряжения диагонали инвертора, полученные моделированием с помощью программы EWB5 при  $P=100 \text{ Вт}$ ,  $f=50 \text{ кГц}$ ,  $L=6 \text{ мГ}$ ,  $C=2 \text{ нФ}$ ,  $R=3,6 \text{ кОм}$ ,  $2N=10$ ,  $2M=8$ .

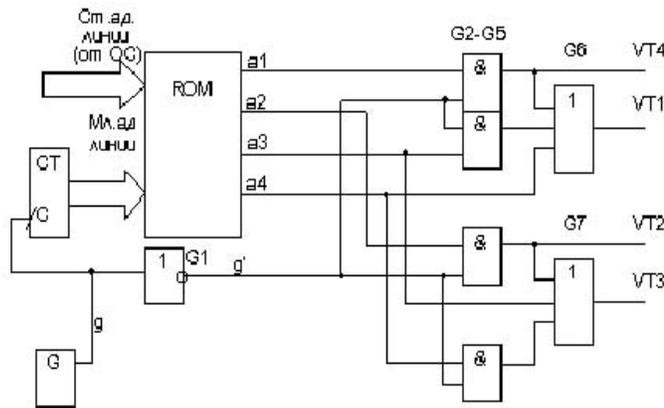


Рис. 2. Система управления резонансным инвертором

Для каждого требуемого значения  $U_{1m}$  необходимо формировать соответствующую последовательность  $2N$  тактов  $a_1, \dots, a_4$ . Эти последовательности могут быть сформированы либо алгоритмически, например, с помощью используемого в системе управления микроконтроллера, либо они могут быть определены заранее и должны храниться в постоянном запоминающем устройстве (ROM) (рис. 3). Выбор соответствующей последовательности осуществляется старшими адресными битами ROM, которые поступают от органа задания уровня выходного напряжения или из устройства обратной связи (при стабилизации выходного

напряжения). Кодированные значения тактов  $a_1, \dots, a_4$  текущей последовательности выбираются младшими адресными битами ROM, поступающими от двоичного счетчика СТ. Коэффициент пересчета счетчика равен  $2N$  (числу тактов в одной последовательности).

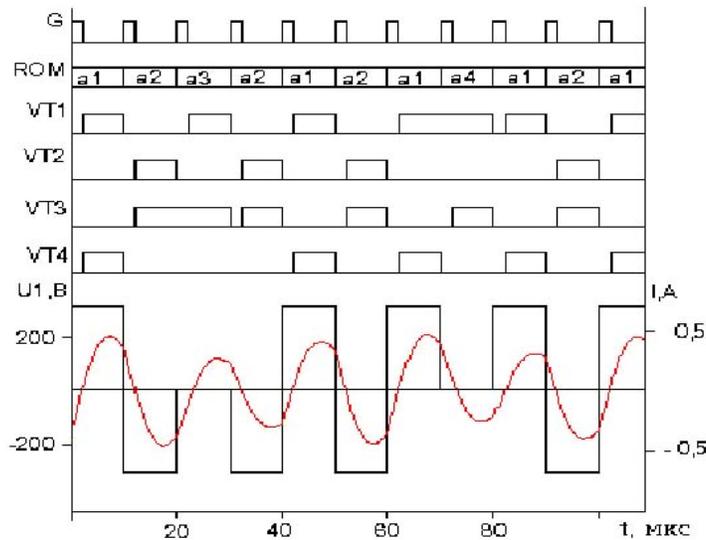


Рис. 3. Диаграммы управляющих импульсов и процессов в РИ

Последовательности тактов должны удовлетворять следующим ограничениям и условиям:  $N$  должен быть нечетным для того, чтобы  $N$ -я гармоника спектра  $U_{1m}$  имела частоту  $f_0$ ; числа  $a_1$  и  $a_2$  тактов в последовательности должны быть равными, чтобы среднее значение напряжения  $U_{1m}$  было равно нулю. Длина последовательности определяется из условия обеспечения требуемой точности регулирования выходного напряжения:  $N=1/\delta$ ,  $\delta$  - заданная относительная погрешность. Необходимое число последовательностей зависит от диапазона регулирования:  $N_1=(U_{2nom} - U_{2min})N/U_{2nom}$ , где  $U_{2nom}$ ,  $U_{2min}$  - номинальное и минимальное значения выходного напряжения. Необходимая емкость памяти ROM составляет  $C_n=2NN_1$  четырехразрядных слов. Реальная емкость памяти будет больше этого значения, поскольку память адресуется двоичными переменными. Необходимое число младших адресных битов:  $n_m = \lceil \log_2 2N \rceil$ , а число старших адресных битов:  $n_c = \lceil \log_2 N_1 \rceil$ , где квадратные скобки означают целое число, большее или равное значению логарифма. Таким образом, реальная емкость памяти составит

$$C_n = 4 \cdot 2^{n_m + n_c}, \text{ бит.} \quad (3)$$

Например, при стабилизации напряжения с точностью в 1% ( $\delta=0,01$ ) и изменении нагрузки от холостого хода до номинальной ( $N_1=100$ ) емкость памяти составит  $4 \cdot 2^{15}$  бит, т.е. необходимо использовать ROM с емкостью в  $2^{15}$  четырехразрядных слов.

Потери мощности в одном транзисторе определяются по формуле

$$P_{sw} = \frac{t_f^2 I_m^2}{24C_0} \sin^2 \varphi_z \left( 1 - \frac{t_f}{\omega t_g \varphi_z} \right) = \frac{t_f^2 I_0^2}{24C_0} \left( 1 - \frac{t_f}{\omega t_g \varphi_z} \right), \quad (4)$$

где  $t_f$  - время спада тока транзистора ( $t_g > t_f$ );  $\varphi_z = \omega t_g$ ;  $I_m$  - амплитуда тока транзистора;  $C_0$  - емкость ключа;  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  - рабочая частота РИ.

Как следует из фазочастотной характеристики (рис. 16) и из (1), при частотном управлении фазовый сдвиг  $\varphi_z$  изменяется в широких пределах, что приводит к большим коммутационным потерям.

При работе на фиксированной частоте, что имеет место при циклическом управлении, фазовый сдвиг  $\varphi_z$  изменяется только из-за изменения нагрузки:

$$\varphi_z(k, x, Q) = \arctg\left(\frac{kQ}{x} + \frac{x(x^2 - 1)}{kQ}\right), \quad (5)$$

где  $k$  - относительное изменение сопротивления нагрузки;  $Q$  - добротность контура при номинальной нагрузке.

На рабочей частоте больше  $\omega_0$  ( $x > 1$ ) и больших добротностях ток диагонали мало зависит от нагрузки:  $I \approx I_{mm} Qx$ . Потери в этом случае зависят только от  $\varphi_z$ . Для минимизации потерь в силовых ключах при работе на неизменяемую нагрузку контур следует рассчитать из условия поддержания фазы не ниже минимально допустимого значения и по мере возможности близко к этому значению. Поэтому предлагается определить параметры контура из решения следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{aligned} & \min \{ \max \varphi_z(k, x, Q) \} \\ \text{при} \quad & \varphi_z(1, x, Q) = \varphi_{z \min}, \quad \varphi_z(k, x, Q) \geq \varphi_{z \min}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\varphi_z$  определяется по (5), а  $\varphi_{z \min} = \omega t_{g \min}$ . Например, при  $\varphi_{z \min} = 0,45$  и  $k=10$  решение задачи (6) с применением OPTIMIZATION TOOLBOX языка программирования MATLAB дает:  $x=1,029$ ,  $Q=3,916$ .

Потери при циклическом методе управления определяются в виде

$$P_{swc} = \frac{2M}{2N} P_{sw}, \quad (7)$$

где  $P_{sw}$  определяется по (4), а отношение  $2M/2N$  учитывает, что в тактах а3 и а4 не имеет место принудительное запираение транзисторов.

В качестве примера сравнены потери в силовых ключах в РИ со стабилизированным выходным напряжением при частотном и циклическом методах управления. В случае частотного управления контур рассчитывается из условия необходимого диапазона изменения АЧХ для стабилизации выходного напряжения и обеспечения необходимого фазового сдвига  $\varphi_z$  при заданном отношении максимальной и минимальной частот ( $x_1/x_2$ ) [2]:

$$H(x_1, R_{nom}) = H(x_2, R_{max}) ,$$

$$\varphi_z(x, R) \geq \varphi_{zmin} ,$$
(8)

где  $[x_1, x_2]$  - диапазон изменения относительной частоты  $x$ ;  $[R_{nom}, R_{max}]$  - диапазон изменения нагрузки  $R$ .

Для  $\varphi_{zmin} = 0,45$ ,  $x_2/x_1 = 1,25$ ,  $k=10$  решение (8) дает  $x_1 = 0,99$ ,  $Q=1,8$ .

На рис. 4 представлены зависимости относительных потерь от относительной выходной мощности  $P_{swr} = P_{sw}/P_{swnom}$  для частотного управления (кривая 1) и  $P_{swcr} = P_{swc}/P_{swnom}$  для циклического управления (кривая 2) при  $t_f=0,5$  мкс,  $t_r=1,5$  мкс и  $f_{nom}=50$  кГц.

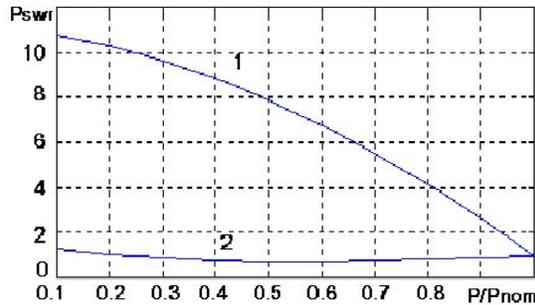


Рис. 4. Зависимости потерь в силовом транзисторе от мощности нагрузки

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Heuman K., Ying J.** Small Loss Series Resonant Inverter // European Power Electronics and drives. - 1994.- V. 4, № 1.- P. 21-28.
2. **Мовсесян В.М., Барегамян Г.В., Петросян Н.Н., Арутюнян А.Ш.** Машинное проектирование источников вторичного электропитания на основе статических резонансных преобразователей// Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 1998. - Т. 51, № 3. -С.322-328.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.05.2000.

**Վ. Մ. ՄՈՎՍԵՍՅԱՆ**  
**ԵԼՔԱՅԻՆ ԼԱՐՄԱՆ ՑԻԿԼԻԿ ԿԱՐԳԱՎՈՂՄԱՄԲ**  
**ՌԵԶՈՆԱՆՍԱՅԻՆ ԻՆՎԵՐՏՈՐ**

Մշակված է փոքր կորուստներով ռեզոնանսային ինվերտորի ցիկլիկ կառավարման թվային համակարգ: Առաջարկված է ռեզոնանսային կոնտուրի հաշվարկի եղանակ հիմնված կորուստների նվազարկման վրա:

**W.M. MOVSESYAN**  
**RESONANT INVERTER WITH CYCLIC CONTROL**  
**OF OUTPUT VOLTAGE**

A digital cyclic control system of resonant inverter with small losses is elaborated. A resonant circuit calculation method minimizing the losses is proposed.

*А.А. ГЮЛЬЗАДЯН, Р.М. МИРЗАХАНИЯН, А.Х. ВАГАНЯН*

### **ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ КАОЛИНА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ**

Изучен процесс сушки в псевдоожигенном слое каолина, образующегося при комплексной переработке гематит-каолинитовой руды. Построены кинетические кривые при различных условиях высушивания. Определено необходимое время пребывания частиц в аппарате. Предложены схема непрерывно работающей промышленной сушильной установки и порядок ее расчета.

**Ключевые слова:** псевдоожигенный слой, сушка, каолинит, кинетические кривые.

В различных областях промышленности широкое распространение получили процессы сушки материалов в псевдоожигенном слое, позволяющие значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, интенсифицировать удаление влаги из материала и сократить продолжительность сушки. Сушилки с псевдоожигенным слоем успешно применяются для сушки не только сыпучих материалов, но и пастообразных материалов, растворов, расплавов и суспензий.

При изучении процессов сушки в псевдоожигенном слое рассматриваются теоретические и опытные данные, так как кинетические уравнения сушки надежны только в условиях, близких к тем, в которых они получены [1, 2]. При выборе, расчете и проектировании сушилок для каждого конкретного материала необходимо иметь найденные опытным путем так называемые кривые сушки, показывающие изменение относительной влажности высушиваемого материала  $C$  в течение времени ( $\tau$ ) (рис.2). Опыты проводились в моделях, в которых воспроизводятся рабочие условия сушки, характерные для промышленного аппарата [2].

В настоящей работе приводятся результаты исследования кинетики сушки каолина, получаемого при обработке гематит-каолинитовой руды Урцского месторождения [3, 4]. Предлагается схема промышленной сушильной установки, изложен порядок ее расчета.

Химический состав высушиваемого каолина (масс.%): каолинит ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$ ) – 86,3;  $SiO_2$  – 7,03;  $CaO$  – 0,55;  $MgO$  – 0,53;  $TiO_2$  – 4,21;  $P_2O_5$  – 0,16;  $Fe_2O_3$  – 0,5 и другие примеси. Гранулометрический состав каолина (масс.%): 0,2...0,25 мм – 12,4; 0,105...0,2 мм – 15,8; 0,053...0,105 мм – 42,2; меньше 0,053 мм – 29,6. Средний эквивалентный диаметр частиц  $d = 0,08954$  мм. Материал перед сушкой содержит 25,8% влаги.

Процесс сушки изучен на лабораторной установке (рис.1).

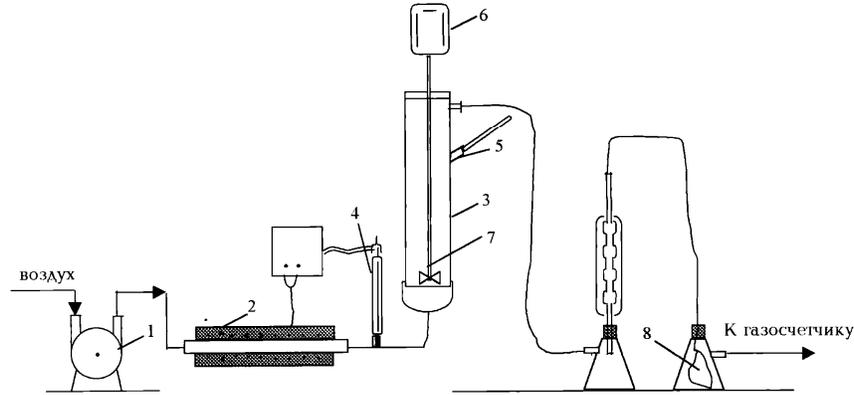


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Воздух, подаваемый газодувкой 1, нагревается в калорифере 2 и поступает в нижнюю часть сушилки 3, представляющей собой стеклянный цилиндр диаметром 34 мм и высотой 300 мм. После достижения необходимой температуры воздуха, измеряемой контактным термометром 4, навеска влажного материала массой  $m_0$  и влагосодержанием  $w_0$  (масс.%) через патрубок 5 засыпается в сушилку – в слой сухого материала массой  $m_c$ . Псевдооживленный слой материала перемешивается мешалкой 7 с электродвигателем 6. Соотношение количеств  $m_0/m_c$  определяется из условия обеспечения устойчивого гидродинамического режима псевдооживления твердого материала на решетке. Опытным путем установлено, что такой режим сохраняется при влажности каолина  $w_{п} = 12,27\%$  и меньше. Исходный каолин содержит  $w_0=25,8\%$  влаги, а высушенный –  $w_k=1\%$ . Следовательно, для получения каолина с влажностью  $w_{п}=12,27\%$  в начале процесса сушки необходимо брать соотношение количеств  $m_0/m_c=0,833$ . Именно в таком соотношении брались количества влажного и сухого материалов для получения псевдооживленного слоя высотой  $h$  в опытной сушилке (рис.1). После определенных промежутков времени  $\tau$  патрубок 5 открывается, из сушилки снимается проба высушиваемого материала (около 1 г) для определения влажности  $w$ . Расход воздуха измеряется газосчетчиком. В одной серии опытов при постоянных значениях температуры  $t$  и высоты слоя  $h$  проводилось 7 опытов при  $\tau = 5, 10, 20, 35, 50, 65$  и  $80$  мин. Всего было четыре серии опытов, результаты которых приведены на рис.2. По оси ординат отложены значения относительной влажности материала  $C$  в кг влаги/кг сухого каолина. В начале сушки  $C_0=12,27/(100 - 12,27)=0,14$ . Примерно 5% высушенного материала уносится из слоя и улавливается фильтром (рис.1).

Процесс сушки, кроме температуры, времени и высоты слоя, зависит от скорости газа  $U$ , его начальной влажности  $\varphi_0$  и начальной влажности материала  $C_0$  [5]. Последние две величины для данного процесса постоянны ( $\varphi_0 = 0,6, C_0 = 0,14$ ).

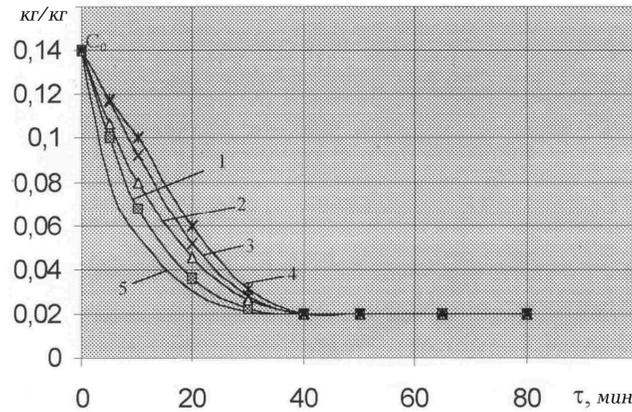


Рис. 2. Кинетические кривые сушки каолина: 1 -  $t = 150^\circ \text{C}$ ,  $h = 8 \text{ см}$ ; 2 – 150; 10; 3 – 130; 8; 4 – 130; 10; 5 – непрерывный процесс сушки

Скорость газа  $U$ , обеспечивающая устойчивый гидродинамический режим псевдооживления твердых частиц, должна находиться в пределах скорости начала псевдооживления  $U_n$  и скорости витания частиц  $U_v$ . Если соотношение  $U_v:U_n > 30$ , то  $U = (18(22) U_n$  [1]. Скорость  $U_n$  определяется по уравнению Тодеса [1, 2]:

$$Re_4 = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (1)$$

где  $Re_4$  – критерий Рейнольдса для твердых частиц;  $Ar$  – критерий Архимеда:

$$Re_4 = \frac{U_n d_p}{\mu}, \quad Ar = \frac{d^3 \rho g \rho_T}{\mu^2}, \quad (2)$$

В этих уравнениях  $\rho$  – плотность газа,  $кг/м^3$ ;  $\mu$  – вязкость газа,  $Па \cdot с$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $м/с^2$ .

По рис. 2 определяется необходимое время сушки ( $\tau = 40 \text{ мин}$ ), после которого влажность каолина практически не уменьшается. Показано также [1, 2, 6], что при непрерывных процессах, хотя кривая располагается ниже (кривая 5, рис.2), необходимое время сушки  $\tau$  такое же, что и при периодическом процессе.

Для сушки каолина предлагается промышленная однокамерная сушилка непрерывного действия (рис.3). Влажный материал из бункера 1 питателем 2 подается в псевдооживленный слой материала в камере сушилки 3. Сушительный агент (воздух или дымовые газы) вентилятором 4 через нагреватель 5 подается в сушильную камеру 3. Высушенный материал ссыпается через штуцер 6 и удаляется транспортером 7. Отработанные газы очищаются от пыли в циклонах 8 и 9.

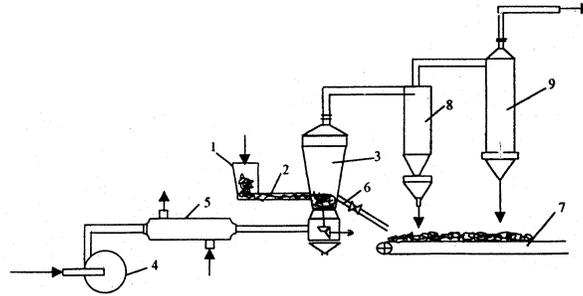


Рис. 3. Схема промышленной сушильной установки

Покажем принцип расчета промышленной сушилки.

Исходные данные: производительность по высушенному материалу  $G_2=0,5 \text{ т/ч}=0,1389 \text{ кг/с}$ , диаметр частиц  $d=0,08954 \text{ мм}$ , начальная влажность материала  $w_0=25,8\%$ , конечная влажность  $w_k=1\%$ , начальная температура мокрого каолина  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ , плотность каолина  $\rho_T=2525 \text{ кг/м}^3$ , порозность псевдооживленного слоя  $\varepsilon = 0,8$ , время пребывания частиц в слое  $\tau = 40 \text{ мин}$ .

Определяется количество испаряемой влаги:

$$w = G_2 \frac{w_0 - w_k}{100 - w_k} = 0,0348 \text{ кг/с.}$$

Расход воздуха (сухого) составляет

$$I = \frac{w}{x_2 - x_0} = 1,349 \text{ кг/с,}$$

где  $x_0$  и  $x_2$  – влагосодержание воздуха до и после сушилки.

Объемный расход воздуха  $V=L/\rho = 1,43 \text{ м}^3/\text{с}$ , где  $\rho$  – плотность воздуха.

Критерий Архимеда определяется по (2):  $Ar = 34,63$ ,

а критерий Рейнольдса по (1):  $Re_4 = 0,0242$ .

Скорость начала псевдооживления  $U_H$  определяется по (2):

$$U_H = \frac{Re_4 \mu}{d\rho} = 0,0063 \text{ м.}$$

Скорость витания  $U_B$ , при которой частицы уносятся из псевдооживленного слоя, определяется экспериментально:  $U_B = 0,25 \text{ м/с}$ . Так как  $U_B : U_H = 40$ , принимаем скорость газа в аппарате  $U = 0,12 \text{ м/с}$ .

Диаметр сушилки  $D = \sqrt{4V/\pi U} = 3,9 \text{ м}$ .

Расход поступающего влажного материала  $G_1=G_2+W=0,1737 \text{ м/с}$ .

Количество твердого материала в слое  $G = G_1 \cdot \tau = 416,88 \text{ кг}$ . Объем твердого материала в слое  $V_T=G/\rho_T=0,1651 \text{ м}^3$ . Объем псевдооживленного слоя  $V_c=V_T/(1-\varepsilon)=0,8255 \text{ м}^3$ . Высота псевдооживленного слоя  $h=4V_c/(\pi D^2)=$

= 0,069 м. Рабочая высота слоя, необходимая для гидродинамической устойчивой работы сушилки, принимается 10 см.

По предложенному методу можно рассчитать и спроектировать промышленные сушильные установки при других производительностях каолина, а также для высушивания других материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. **Сушка во взвешенном состоянии.**-Л.: Химия, 1979.- 272 с.
2. **Псевдооживление / Под ред.** И.Ф. Девидсона и Д.М. Харрисона.- Л.: Химия, 1974.- 728 с.
3. Гюльзаян А.А., Мирзаханян Р.М. **Оптимальные условия химической переработки гематит-каолининовой руды // Хим. ж. Армении.-1999.- Т. 53, 1 4.- С. 70-74.**
4. Мирзаханян Р.М., Гюльзаян А.А., Ваганян А.Х. **Кислотная обработка гематит-каолининовой руды в вертикальном аппарате переменного сечения // ЖПХ Армении.- 1999.- 1, 2.- С. 17-21.**
5. Ойгемблик А.А. и др. **Хим. пром.- 1989.- 1 11.- 866 с.**
6. Акопян Р.Е., Мирзаханян Р.М., Хачатрян Г.Г. **Исследование кинетики сушки активированного бентонита // Арм. хим. ж.- 1992.- Т. 45, 1 1-2.- С. 26-31.**

ГИУА.           Материал поступил в редакцию 28.12.2000.

**Ա.Ա. ԳՅՈՒԼԶՅԱՆ, Ռ.Մ. ՄԻՐԶԱԽԱՆՅԱՆ, Ա.Խ. ՎԱՀԱՆՅԱՆ**

**ԿԵՂԾ ՀԵՂՈՒԿԱՑՎԱԾ ՇԵՐՏՈՒՄ ԿԱՈՒԻՆԻ ՉՈՐԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Ուսումնասիրվել է հեմատիտ-կաոլինիտային հանքանյութի համալիր մշակման ժամանակ ստացվող կաոլինի եռացող չորացման գործընթացը: Նյութը չորացվել է փորձնական սարքում, տարբեր պայմաններում, և ստացված տվյալներով կառուցվել են չորացման կորերը: Դրանց հիման վրա որոշվել է մասնիկների ապարատում մնալու անհրաժեշտ ժամանակը և առաջարկված է անընդհատ գործողության արդյունաբերական չորանոցի սխեման ու հաշվարկման կարգը:

**A.A. GYULZADYAN, R.M. MIRZAKHANYAN, A.KH. VAHANYAN**

**STUDY OF KAOLIN DRYING PROCESS IN FLUIDIZATION LAYER**

The drying process in kaolin fluidization layer formed in complex processing of hematite-kaolinite ore is studied. Kinetic curves in different drying conditions are constructed. The necessary time for staying the particles in the apparatus is defined. Continuously running commercial drying plant scheme and the order of its calculation are proposed.

Г.С. ОВСЕПЯН, А.С. МАРКАРЯН, Д.П. ПЕТРОСЯН, А.А. АМБАРЯН,  
А.Ж. ГАЛСТЯН

### ЭПОКСИДНЫЕ КЛЕИ ДЛЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Разработаны эпоксидные клеи с новыми наполнителями. Предложены технологии склеивания твердосплавных и стальных пластин на поверхности деталей сельскохозяйственных машин.

**Ключевые слова:** эпоксидный клей, наполнитель, прочность, сталь, склеивание.

В процессе эксплуатации сельскохозяйственных и промышленных деталей машин, наряду с разработкой новой конструкции высокопрочных деталей, приходится проводить и ремонт быстроизнашивающихся деталей (ножей, пластинок, резцов, молотков и т.д.). При исполнении этих работ в отдельных случаях используются высокопрочные клеи [1]. В связи с этим нами был разработан ряд высокопрочных, стойких к действию ударных нагрузок эпоксидных клеев с широким температурным диапазоном эксплуатации.

Эпоксидные клеи обладают универсальными адгезионными свойствами. Несмотря на то, что существует большое число марок этих клеев, непрерывно ведутся работы, направленные на дальнейшее повышение их технологических и эксплуатационных характеристик. Для склеивания деталей и инструментов (сталь-твердый сплав, сталь-сталь) был проведен ряд экспериментальных работ по изысканию наиболее эффективного клея [2]. Предлагаемые клеи состоят из трех компонентов (табл 1).

Таблица 1

Эпоксидные клеи с новыми наполнителями

№	Основа	Отвердитель	Наполнитель	Название клея
1	Эпоксидная смола, 100 вес.ч. ВТУ <sup>1</sup> 646-55	Триэтанолламин (NCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> , 10 вес.ч.	Графит пылевидный группы 0,005, 15-20 вес.ч.	Существующий, Д-21
2	Эпоксидная смола, 100 вес.ч.	Триэтанолламин, 10 вес.ч.	Туф пылевидный группы 0,005, 10-13 вес.ч.	ГАДА – 1
3	Эпоксидная смола, 100 вес.ч.	Триэтанолламин, 11-15 вес.ч.	ЖГР пылевидный группы 0,005, 11-15 вес.ч.	ГАДА – 2
4	Эпоксидная смола, 100 вес.ч.	Триэтанолламин, 13-18 вес.ч.	Бронза пылевидная группы 0,005, 13-18 вес.ч.	ГАДА – 3

Наполнитель, являющийся вспомогательным материалом, облегчает сглаживание неровностей склеиваемой поверхности, стабилизирует механические свойства клеевого соединения, уменьшает способность

растрескивания, повышает теплопроводность клеевого шва, сближает коэффициенты линейного расширения клея и склеиваемых материалов.

Смола нагревается до 120...160 °С и выдерживается до прекращения вспенивания и выделения газовых пузырьков. В нагретую смолу вводится подогретый до 120...160 °С пылевидный графит. Затем вводится триэтаноламин. Полученная смесь тщательно размешивается, и клей готов к употреблению. Чистота поверхностей склеиваемых деталей должна находиться в пределах Ra =1,0...6,0 мкм. Необходимо соблюдать плоскостность склеиваемых поверхностей, которые должны быть тщательно обезжирены, что рекомендуется производить органическими растворителями и электрохимическим методом.

После обезжиривания следует сначала промывка в теплой воде (60 °С) для удаления мыла с поверхности, затем в холодной воде. Процесс обезжиривания считается законченным, если при промывке вода смачивает всю обезжиренную поверхность и стекает с нее равномерно.

Очищенные и обезжиренные детали перед склеиванием нагревают до 120 °С, а затем наносят на них тонким слоем приготовленный клей. Склеиваемые поверхности притирают (2-3 раза одну относительно другой) для равномерного растекания клея по поверхностям. Склеенные детали, зажатые в зажимах, помещают в печь при 120...130 °С. Продолжительность термообработки 10 час. Только после полного остывания до комнатной температуры соединение принимает свою окончательную твердость и прочность.

Прочность соединения определяется с помощью испытательной машины УММ-5 по формуле  $\sigma=P/S$ , где P - усилие, при котором происходит разрушение шва; S - площадь контакта пластины со стержнем. Результаты экспериментов, определяющие разрушающее напряжение при растяжении, приведены в табл. 2.

Таблица 2

*Механические характеристики эпоксидных клеев*

Марка клея	Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	Прочность на растяжение, МПа
Д-21	10x10	35
ГАДА-1	10x10	39
ГАДА-2	10x10	38
ГАДА-3	10x10	41

Применение различных наполнителей связано как с теплопроводностью, так и с реальной экономической выгодой.

В эпоксидном клее ГАДА-1 в качестве наполнителя использован порошкообразный туф. Данный клей предназначен для склеивания деталей, работающих в основном при статических нагрузках. Он имеет низкую стоимость и невысокую теплопроводность. Так как клеи ГАДА-2 и ГАДА-3 имеют высокие показатели теплопроводности, то теплота передается от твердосплавной пластинки к металлическому основанию инструмента и рассеивается, вследствие чего температура клеевого шва не превышает предельно допустимую.

Одним из существенных факторов, влияющих на прочность шва, является степень шероховатости склеиваемых поверхностей.

В производственных условиях подготовка этих поверхностей осуществляется строганием, фрезерованием, шлифовкой и последующими доводкой и полированием.

С целью выяснения воздействия этого фактора была изготовлена партия образцов из стали 30, поверхность которых обработана с различной степенью шероховатости. Шероховатость обработанной поверхности измерялась профилограф-профилометром типа 201.

По результатам проведенного эксперимента определена зависимость прочности клеевых соединений от шероховатости обработанной поверхности (рис.).

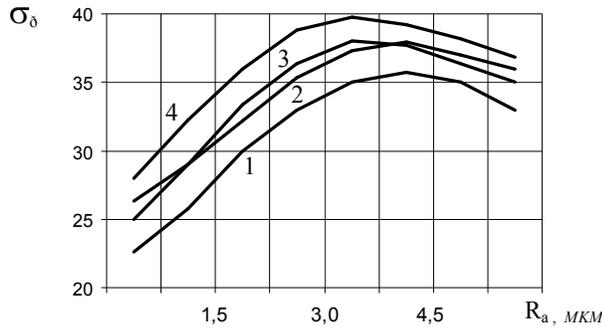


Рис. Прочность клеевых соединений в зависимости от шероховатости обработанной поверхности: 1 - Д-21; 2 - ГАДА -1; 3 - ГАДА -2; 4 - ГАДА -3

Более прочные швы получены на образцах с шероховатостью  $R_a=2,5 \dots 4,5$  мкм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кандаян Е.Г., Овсепян Г.С.** Применение твердосплавного режущего инструмента в деревообрабатывающей промышленности / АРМНИИИНТИ.- 1971. - 14 - 6 с.
2. **Петрова А.П.** Термостойкие клеи. - М.: Химия, 1977. - 200 с.

ГИУА, Арм.СХА. Материал поступил в редакцию 30.12.2000.

**Գ.Ս.ՀՈՎՍԵՊՅԱՆ, Ա.Ս. ՄՈՒՐԱՂՅԱՆ, Դ.Պ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Հ.Ա.ԱՄԲԱՐՅԱՆ, Հ.Ժ. ԳԱԼՍՏՅԱՆ  
ԷՊՈՔՍԻԴԱՅԻՆ ՍՈՍԻՆՉՆԵՐ ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ԵՎ ՀԱՄԱՁՈՒՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ**

Մշակված է նոր լցանյութերով էպօքսիդային ստաինձ և գյուղատնտեսական տեխնիկայի մեքենամասերի մակերևույթների վրա կարծր համաձուլվածքե և պողպատե թիթեղիկներ ստանձելու տեխնոլոգիա:

**G.S. HOVSEPYAN, A. S. MARKARYAN, D.P. PETROSSYAN,  
H.A.AMBARYAN, H. ZH. GALSTYAN  
EPOXIDE GLUES FOR STEELS AND ALLOYS**

Epoxide glues with new fillers are elaborated along with technologies of gluing the hard alloys and steel plates on the surfaces of parts of agricultural machines.

Г.Е. АЙВАЗЯН

## ПЛАНАРНОЕ ГЕТТЕРИРОВАНИЕ СЛОЕМ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

Продемонстрирована возможность эффективного геттерирования структурных дефектов и быстродиффундирующих примесных атомов слоями пористого кремния при высокотемпературном отжиге.

**Ключевые слова:** кремний, поры, примеси, дефекты, геттерирование, время жизни.

Проблема создания бездефектной поверхностной зоны полупроводниковых пластин, в которой формируются элементы интегральных схем, в современной микроэлектронной технологии решается путем использования различных методов геттерирования. При этом широкое распространение получили методы, основанные на создании интенсивных геттерных стоков на нерабочей поверхности пластин посредством абразивных и лазерных обработок, осаждения пленок двуокиси кремния или нитрида кремния, имплантации ионов и диффузии примесей, формирования слоя пористого кремния (ПК) и др. [1-4]. В последнем случае считается, что геттерирование быстродиффундирующих примесных атомов, зародышей дефектов и самих дефектов происходит за счет их адсорбции в развитую поверхность ПК [2].

В настоящее время значительное развитие получили методы создания геттера на локальных областях рабочей поверхности полупроводниковых пластин, например, на дорожках скрайбирования или изоляции (планарное геттерирование). В [1,3] продемонстрирована высокая эффективность планарного геттерирования в кремнии ионно-имплантированными слоями при последующем высокотемпературном окислении. Показано, что дальное действие геттерирования локальной бомбардировкой ионами аргона составляет 10-30 мм и обеспечивается повышенной скоростью генерации примесей и точечных дефектов вблизи поверхности, а также передвижением фронта механических напряжений вдоль поверхности от имплантированной области в процессе термообработки.

Цель настоящей работы - изучение возможности планарного геттерирования быстродиффундирующих примесных атомов и структурных дефектов слоем ПК.

**Образцы и методы исследования.** Исходными образцами служили полированные пластины бездислокационного кремния с удельным сопротивлением 35 Ом.см (легирующая добавка - фосфор). Кремний с кристаллографической ориентацией в плоскости (111) был выращен методом Чохральского. Половина каждой пластины закрывалась химически стойким лаком (ХСЛ), а в незащищенных областях анодной обработкой формировали геттерные слои ПК толщиной 10...15 мкм. Анодирование осуществляли в 48%-ом водном растворе плавиковой кислоты при плотностях анодного тока 10...50 мА/см<sup>2</sup> в условиях интенсивного освещения источником белого света. После удаления ХСЛ

и последующих химических обработок образцы отжигали в атмосфере очищенного азота при температуре 1100 °С в течение 160 мин.

Объемную плотность ПК находили из гравиметрических данных на основе расчета общего объема пор, пропорционального количеству растворившегося кремния при анодировании. Для выявления структурных дефектов использовали метод селективного травления кремния в травителе Сиртля. Структуру ПК исследовали на поверхности и поперечных сколах пластин с помощью растрового электронного микроскопа.

Для оценки эффективности геттерирования на монокристаллических участках образцов были изготовлены тестовые МОП-конденсаторы. Пленку двуокиси кремния толщиной 0,2 мкм получали термическим окислением в “мягких режимах” в атмосфере сухого кислорода при температуре 1100 °С. Затвор конденсаторов создавали напылением алюминия на пластину с последующей фотолитографией таким образом, что ряды сформированных конденсаторов были параллельны границе между пористым и монокристаллическим участками. Площадь затворов составляла 1 мм<sup>2</sup>, шаг между ними – 0,5 мм. На каждом из сформированных МОП-конденсаторов измерялись величины времени релаксации неравновесной емкости, из которых по методике работы [4] были рассчитаны значения генерационного времени жизни  $\tau$ , характеризующие эффективность планарного геттерирования на месте расположения МОП-конденсатора.

**Результаты исследования.** На рисунке приведена зависимость  $\tau$  (в нормированных единицах) от расстояния до границы с пористым участком  $d$  для трех значений объемной плотности ПК ( $\rho = 1,18; 1,19$  и  $1,21$  г/см<sup>3</sup>). Видно, что наибольшие величины времени жизни и дальное действие достигаются при  $\rho = 1,21$  г/см<sup>3</sup>. При этом характерно наличие максимума, положение которого при увеличении  $\rho$  сдвигается дальше от границы с пористым участком.

Электронно-микроскопический анализ показал, что на поверхности слоя ПК поры имеют нечеткую треугольную форму и выстраиваются в правильный геометрический рисунок. Они расположены преимущественно по кристаллографическим направлениям типа  $\langle 110 \rangle$ , соответствующим наикратчайшим векторам трансляции в решетке монокристаллического кремния. На сколе по плоскости скольжения {111} каналы пор направлены в глубину пластины под углом к поверхности 70°. Диаметр пор составляет 0,1...0,3 мкм. В результате высокотемпературного отжига происходит фундаментальная перестройка структуры и уменьшение объема слоя ПК. Увеличивается диаметр микропор (до 1,0 мкм) и наблюдается тенденция их изоляции друг от друга и от поверхности. Эти изменения усиливаются с уменьшением  $\rho$  слоя ПК и сопровождаются образованием растягивающих механических напряжений в слое ПК [5,6].

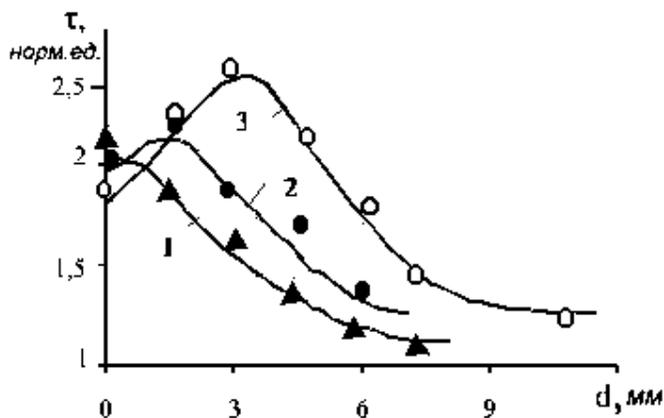


Рис. Зависимость генерационного времени жизни  $\tau$  от расстояния  $d$  до границы с пористым участком для трех значений объемной плотности ПК (1 – 1,18; 2 – 1,19; 3 – 1,21 г/см<sup>3</sup>)

Представленные данные свидетельствуют о том, что геттерирование слоем ПК, скорее всего, происходит за счет взаимодействия примесных атомов и дефектов с полями упругих напряжений. Наибольший эффект геттерирования и его дальное действие (6...8 мм) достигаются в случае, когда структура ПК претерпевает наибольшие изменения, т.е. при максимальных механических напряжениях в слое ПК. Наблюдаемый в экспериментах факт уменьшения значений  $\tau$  вблизи границы с пористым участком, приводящий к появлению максимума на полученных зависимостях, обусловлен, по всей видимости, образованием дополнительных структурных дефектов в приграничной с ПК зоне за счет частичной релаксации механических напряжений. Действительно, металлографические исследования показали, что после отжига в кремнии обнаруживаются следы единичных дислокаций, дислокационных петель и дефектов упаковки, концентрация которых изменяется в широком пределе (от  $10^1$  до  $10^4$  см<sup>-2</sup>) и хорошо коррелирует с величиной механических напряжений в слое ПК. Образующиеся микродефекты приводят к уменьшению значений  $\tau$  при приближении к пористому участку. Как видно из рисунка, зона, где наблюдается уменьшение  $\tau$ , составляет менее 3 мм.

Таким образом, при высокотемпературном отжиге возможно эффективное планарное геттерирование локальными слоями ПК на расстоянии до 8 мм. При этом вблизи границы с пористым участком формируется зона шириной до 3 мм, где происходит заметное уменьшение значений  $\tau$ . Это необходимо учесть при выборе мест и размеров локальных геттерных слоев ПК.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ А-431.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жолудев Г.Л., Хрипко С.Л.** Исследование геттерирования в кремниевых транзисторных структурах // Микроэлектроника.- 1996. - Т. 25, вып.6. - С. 436-441.
2. **Tsuo Y.S., Xiao Y. and Moore C.A.** Porous Silicon. World Sci. Publ., NY, 1994, 412 p.
3. **Литовченко В.Г., Шаповалов В.П.** Исследование процессов геттерирования в кремнии // Микроэлектроника.- 1988. - Т.17, вып.4. - С. 305-312.
4. **Nassibian A.G., Browne V.A. and Perkins K.D.** Generation life-time investigation of ion-damage gettered using MOS structure // J. Appl. Phys.- 1976. - V. 47, N3.- P. 992-997.
5. **Айвазян Г.Е., Варданиян А.А., Чомоян А.А., Бахпециян А.Г.** Деформация кремниевых пластин с приповерхностным пористым слоем // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 1998.-Т. 51, <sup>1</sup> 1.- С.29-33.
6. **Ayvazyan G.E.** Anisotropic Warpage of Wafers with Anodized PS Layers // Phys. Stat. Sol. (a).- 1999.- 175, N2.- R7-R9.

*ЗАО “Виасфер Технопарк”. Материал поступил в редакцию 05.06.2001.*

**Գ. Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ**

**ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՇԵՐՏՈՎ ՊԼԱՆԱՐ ՀԵՏԵՐԱՑՈՒՄ**

Ցուցադրված է բարձրջերմաստիճանային թրժման դեպքում ծակոտկեն սիլիցիումի շերտերով արագ դիֆուզվող խառնուրդային ատոմների և կառուցվածքային արատների արդյունավետ հետերացման հնարավորությունը:

**G. E. AYVAZYAN**

**PLANAR GETTERING BY THE POROUS SILICON LAYER**

**The possibility of efficient gettering of structural defects and rapidly diffusing impurity atoms by layers of porous silicon during high-temperature annealing is demonstrated.**

## АРЕШЯН ГЕОРГИЙ ЛЕВОНОВИЧ

### К 75 - ЛЕТИЮ

Исполнилось 75 лет выдающемуся ученому в области электромеханики и автоматики, академику Национальной Академии наук Армении, профессору Государственного инженерного университета Армении *Аресяну Георгию Левоновичу*.



Свой путь в науку он начал в аудиториях ЕрПИ, который с отличием окончил в 1949 году. Уже в 27 лет, будучи аспирантом Московского энергетического института, он блестяще защищает кандидатскую диссертацию.

С 1953 года начинается его карьера педагога, ученого и организатора науки в Ереванском политехническом институте. Научная и практическая деятельность Г.Л. Арешяна охватывает многие направления в области электротехники и автоматики. Он является пионером в разработке и производстве многих типов электрических машин и систем их управления.

Работая в тесном научном контакте с таким выдающимся ученым, как академик А.Г. Иосифьян, Георгий Левонович принимал участие в научных изысканиях, имеющих основополагающее теоретическое и практическое значение.

В 1958 году, когда в Армении намечался резкий скачок в развитии машиностроительной, электронной и приборостроительной отраслей, Г.Л. Арешян возглавил основанную им в ЕрПИ кафедру “Автоматика и вычислительная техника”, на базе которой в дальнейшем образовались кафедры “Электронная техника”, “Вычислительная техника”, “Автоматизированные системы управления”, а исходная стала кафедрой “Автоматики и телемеханики”. На базе всех этих кафедр были организованы факультеты технической кибернетики, вычислительной техники и радиотехники.

В 1976 году Г.Л. Арешян успешно защищает докторскую диссертацию, а в 1978 году ему присваивают звание профессора. Он подготовил плеяду кандидатов и докторов наук, создал свою школу в области электромеханики и автоматики. Г.Л. Арешян - автор более 160 научных работ, в том числе двух монографий и первого учебника для вузов на армянском языке “Теория автоматического управления”. Сфера научных интересов ученого достаточно широка и разнообразна. Он разработал и предложил вероятностный и энтропийный критерии вероятностных автоматов; энергетические передаточные матрицы многосвязных систем автоматики и их критерии; матрицы преобразования Ляпунова для многофазных (больше трех) электрических машин; системы дифференциальных уравнений синхронных и асинхронных емкостных электрических машин. Развил теорию установившихся и переходных процессов однофазных индукторных машин с пульсирующим потоком. Получил критерий боковой устойчивости левитирующего линейного синхронного двигателя со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Исследовал переходные процессы при

набросе и сбросе нагрузки на синхронные генераторы. Запустировал интеграл действия и на его основе получил тензорные и векторные дифференциальные и интегральные уравнения электромагнитодинамики при наличии электрических и магнитных зарядов. Определил величину постоянной взаимодействия электромагнитодинамики, выразив ее через фундаментальные постоянные физики. Предложил метод инверсии поверхностей.

Г. Л. Арешян – ученый и гражданин, признанный как в Армении, так и далеко за ее пределами. Академик Национальной Академии наук Республики Армения, действительный член Инженерной академии Армении, академик Международной инженерной академии. Неоценим вклад Арешяна Г.Л. в развитие науки в Ереванском политехническом институте и в Академии наук Армении. С 1961 по 1986 гг. он являлся проректором ЕрПИ по научной части, а с 1986 по 1991 гг. – академиком-секретарем отделения физико-технических наук и механики Академии наук Армении. При его непосредственном содействии защитили докторские диссертации ряд сотрудников возглавляемой им ранее кафедры “Автоматика и телемеханика”. В настоящее время его наставническая деятельность продолжается в должности профессора департамента электротехники Государственного инженерного университета Армении. Отрадно подчеркнуть, что и в этом зрелом возрасте Г.Л. Арешян полон сил и творческой энергии.

*В год его славного юбилея редакционная коллегия, его многочисленные коллеги и ученики желают Г.Л. Арешяну доброго здоровья, благополучия и дальнейших успехов в его плодотворной научной деятельности на благо нашей страны.*

## ԿՈՍՏԱՆ ԱՐՏԱՎԱԶԴԻ ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

# 75 - ԱՄՅԱԿԻ ԿԱՊԱԿՑՈՒԹՅԱՄԲ

Լրացավ նշանավոր գիտնական, տեխնիկական գիտությունների դոկտոր, պրոֆեսոր, ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս ԿՈՍՏԱՆ ԱՐՏԱՎԱԶԴԻ ԿՈՍՏԱՆՅԱՆԻ ծննդյան 75 և



մանկավարժական գործունեության 50-ամյակը:

Կ. Կոստանյանը ծնվել է 1926 թվականի սեպտեմբերի 1-ին, Էջմիածին քաղաքում: 1948-ին ավարտել է ԵրՊԻ-ի քիմիկատեխնոլոգիական ֆակուլտետը, ապա ընդունվել Գիտությունների ակադեմիայի ասպիրանտուրան: Ուսուցումն անցկացրել է ականավոր գիտնականներ, ԽՍՀՄ ԳԱ թղթակից-անդամ Ն. Կաչալովի և պրոֆեսոր Կ. Եվատրոպևի ղեկավարությամբ, Լենինգրադի տեխնոլոգիական ինստիտուտում, որտեղ և 1952 թվականին պաշտպանել է «Նատրիում - կալցիում - մագնեզիում - ալյումինասիլիկատային ապակիների էլեկտրահաղորդականության կախումը ջերմաստիճանից և բաղադրությունից» թեմայով թեկնածուական ատենախոսությունը:

սությունը:

Այնուհետև երիտասարդ գիտնականն աշխատանքի է անցել ՀՀ ԳԱԱ քիմիայի ինստիտուտում և ամբողջությամբ նվիրվել ինստիտուտի առջև դրված կարևորագույն հարցերին՝ հանրապետության նոր զարգացող ապակու արդյունաբերությունը տեղական հումքով ապահովելու և էլեկտրաէներգիան ապակու եփման համար օգտագործելու խնդիրների լուծմանը, որոնք նրա թեկնածուական ատենախոսության տրամաբանական շարունակությունն էին:

Հետազոտությունների արդյունքները երկար սպասել չտվեցին. սկսած 50-ական թվականներից՝ Կ. Կոստանյանը համամիութենական խորհրդակցություններում բազմիցս հանդես է եկել հավված ապակիների էլեկտրահաղորդականությանը, ապակեկերպ նյութերի և ապակիների էլեկտրական հատկություններին նվիրված զեկուցումներով՝ արժանանալով լայն ճանաչման և մասնագետների բարձր գնահատականին:

Կ. Կոստանյանի գործունեությանը բնորոշ են գիտական բարձր մակարդակն ու գործնական նպատակաուղղվածությունը: Ապակու էլեկտրաեփման ուղղությամբ հանրապետությունում դեռևս 30-ական թվականներից տարվող աշխատանքներն ամփոփվեցին 1962-ին լույս տեսած «Ապակու էլեկտրաեփումը»

մենագրության մեջ, որը համաշխարհային տեխնիկական գրականության մեջ ապակու  
լեկտրաեփմանը նվիրված առաջին գիրքն էր:

ՀՀ ԳԱԱ քիմիայի ինստիտուտի անօրգանական քիմիայի սեկտորի հիման վրա 1957-  
ին կազմակերպված Ժողտնտխորհի քիմիայի գիտահետազոտական ինստիտուտում 1959  
թվականին ձևավորվեց ապակու քիմիայի և տեխնոլոգիայի լաբորատորիան, որի վարիչը  
դարձավ երիտասարդ, բայց արդեն լայն ճանաչում գտած գիտնականը:

Ապակու էլեկտրաեփման հայկական խմբի աշխատանքները 60-ական թվականների  
սկզբներին արդեն միջազգային ճանաչում էին ստացել. այդ հետազոտություններին ու  
դրանց իրականացմանը ծանոթանալու համար բազմիցս Երևան են եկել նախկին  
Խորհրդային Միության, Չեխոսլովակիայի, Գերմանիայի և այլ երկրների հետազոտողներ,  
ինժեներ-մասնագետներ: Պատահական չէ, որ այդ տարիներին հատկապես Երևանում էին  
կազմակերպվում մի շարք հանրապետական և միութենական նշանակության  
գիտաժողովներ:

Ամփոփելով հաված ապակիների էլեկտրահաղորդականության ուսումնա-  
սիրություններին նվիրված իր գիտահետազոտական աշխատանքները՝ Կ. Կոստանյանը,  
1968-ին պաշտպանեց □Հաված սիլիկատային և բորատային ապակիների  
էլեկտրահաղորդականության կախումը ջերմաստիճանից և բաղադրությունից□ թեմայով  
դոկտորական ատենախոսությունը:

60-ական թվականների վերջերին քիմիայի հետազոտական ինստիտուտը, մի շարք  
գերատեսչական փոփոխությունների ենթարկվելով, կրկին անցավ ՀՀ ԳԱԱ-ի  
ենթակայությանը, և ինստիտուտի մի քանի լաբորատորիաների հիման վրա  
կազմակերպվեց ԽՍՀՄ էլեկտրոնային արդյունաբերության նախարարության  
էլեկտրավակուումային ապակու գիտահետազոտական ինստիտուտի Երևանի  
մասնաճյուղը, որի տնօրեն նշանակվեց Կ.Կոստանյանը: Մասնաճյուղի առջև դրված  
բազմաբնույթ և կարևոր խնդիրները զգալիորեն ընդլայնեցին գիտնականի  
հետազոտությունների շրջանակները. նոր գերմանատային և խալկոգենիդային,  
կապարային և այլ ապակիների բաղադրությունների ու տեխնոլոգիաների մշակում,  
սիտալների, ապակու ներկերի, թաղանթների, բյուրեղական նյութերի, մենաբյուրեղների  
ստացում և, որ ամենագլխավորն է, գիտական արդյունքների ներդրում արտադրության  
մեջ: Տեսական ուսումնասիրություններն առավել կարևորվեցին, երբ մասնաճյուղի  
կազմում 1981-ին կազմակերպվեց փորձնական գործարան: Կարճ ժամանակում Կ.  
Կոստանյանի ղեկավարությամբ մասնաճյուղն իր փորձնական գործարանով դարձավ  
Միության՝ ապակու քիմիայի և տեխնոլոգիայի ուղղությամբ կատարվող աշխատանքների  
իրականացման հետազոտական կենտրոններից մեկը:

Դեռևս 1955-ից Կ. Կոստանյանը կապված էր Երևանի պոլիտեխնիկական  
ինստիտուտի հետ, որտեղ կարդում էր «Սիլիկատների ֆիզիկական քիմիա» դասընթացը:  
Այդ դասախոսությունների հիման վրա 1967-ին հրատարակվեց «Սիլիցիումի քիմիա և  
սիլիկատների ֆիզիկական քիմիա» ուսումնական ձեռնարկը, որով կրթվել է սիլիկատային  
տեխնոլոգիայի մասնագետ-ինժեներների մի ողջ սերունդ: 1977-ին Կ.Կոստանյանը  
ընտրվել է ՀԽՍՀ ԳԱԱ-ի թղթակից-անդամ:

Աշխատանքների կատարման հետ մեկտեղ, Կ.Կոստանյանի կողմից դաստիարակվում էր բարձր որակավորում ունեցող հետազոտողների մի խումբ, որոնցից շատերն արդեն առաջատար մասնագետներ էին: Կ.Կոստանյանի ղեկավարությամբ պաշտպանվել են 25 թեկնածուական ատենախոսություններ:

1984-1992 թվականներին անվանի գիտնականը եղել է ԽՍՀՄ ԳԱԱ-ի «Физика и химия стекла» ամսագրի խմբագրական կոլեգիայի անդամ, 1989-ին՝ Ապակու միջազգային XV կոնգրեսի կազմկոմիտեի, իսկ 1989-1992 թվականներին՝ ԽՍՀՄ Նախարարների խորհրդին առընթեր գիտության և տեխնիկայի բնագավառում Լենինյան և Պետական մրցանակներ շնորհող կոմիտեի անդամ:

1986-ից Կ.Կոստանյանն անցնում է մանկավարժական աշխատանքի, որպես ԵրՊի-ի քիմիկատեխնոլոգիական ֆակուլտետի «Միլիկատների տեխնոլոգիա» ամբիոնի վարիչ, իսկ 1992-ից՝ ամբիոնի պրոֆեսոր:

Այս տարիներին նա գրել և տպագրության է պատրաստել մի շարք մենագրություններ և դասագրքեր, այդ թվում՝ «Վենետիկյան ապակի» մենագրությունը և «Միլիկատների և ոչ մետաղական դժվարահալ նյութերի ֆիզիկական քիմիա» դասագիրքը: Կ.Կոստանյանը 1996-ից ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս է, ավելի քան 300 գիտական հոդվածների, գրքերի, հեղինակային վկայականների հեղինակ, միջազգային ճանաչում ունեցող սկանավոր գիտնական, գիտության կազմակերպիչ և գիտական ղեկավար:

Այսօր էլ վաստակաշատ գիտնականն ու մանկավարժն իրեն հատուկ եռանդով ու նվիրումով շարունակում է հայրենանվեր գործունեությունը: Ներկայումս նա «ՄՀԿ»-ի շրջանակներում կատարվող երկու աշխատանքների գիտական ղեկավար է, ՀՊՃՀ-ի՝ գիտական աստիճաններ շնորհող 057 մասնագիտական խորհրդի նախագահը:

*Տեղեկագրի խմբագրական կոլեգիան և բազմաթիվ գործընկերները, շնորհավորելով սկանավոր գիտնականին ծննդյան 75-ամյակի առթիվ, մաղթում են նրան քաջառողջություն, երկար տարիների բեղմնավոր ու հայրենանվեր գործունեություն:*

## КАСЬЯН МАРТЫН ВАГАНОВИЧ (1905 - 1995)

### *К 95 - ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ*

С именем Мартына Вагановича Касьяна неразрывно связаны развитие промышленности Армении, фундаментальные исследования в области технологии машиностроения, получения каменного литья, металлов, а также резания камней.



М.В. Касьян родился в сентябре 1905 года в Грузии (г. Абастуман). По окончании средней школы поступил на механический факультет Грузинского политехнического института (ГПИ). Учился отлично и был оставлен на кафедре как студент, имеющий наклонности к научной и педагогической деятельности. С 1927 г. работал на производстве инженером-механиком, где прошел большую практику на предприятиях машиностроения, и одновременно преподавал на кафедре механической технологии ГПИ. Такое умелое сочетание теории и практики стало основой для создания им технологической лаборатории, где изучались основные вопросы резания и закономерности деформации металлов, температурных, динамических и износных явлений при контактировании режущего инструмента с обрабатываемым материалом. Лаборатория, созданная М.В. Касьяном при кафедре технологии машиностроения ГПИ, стала одним из очагов машиностроительной мысли Советского Союза. Итогом работ стали блестящие защиты сначала кандидатской (1937), а затем докторской (1943) диссертаций, а также многочисленные научные труды ученого. М.В. Касьян – большой ученый-практик, опытный педагог, воспитавший тысячи студентов, аспирантов и докторантов.

С 1949 года жизнь ученого неразрывно связана с Арменией. Он работает заместителем директора Ереванского политехнического института и избирается заведующим кафедрой технологии машиностроения. Одновременно в Академии наук Армении разрабатывает основы теории резания камней, создает гамму камнеобрабатывающих станков.

Производство этих станков за короткий срок освоил завод строительных машин г. Ленинакана.

Комплексные исследования ученого стали мощным стимулом для научно-технического прогресса в области добычи и обработки каменных материалов, привлекли к сотрудничеству работников Института камня и силикатов. Именно тогда М.В. Касьян подготовил десятки кандидатов и докторов наук для Армении, Украины и других республик.

Исследовательские работы М.В. Касьяна проходили в институтских и заводских лабораториях, где велись поиски новых режущих материалов, эффективных конструкций инструментов и технологических процессов.

В 1953 г. М.В. Касьян был избран членом-корреспондентом АН Армении по машиностроению, академиком-секретарем отделения технических наук, а в 1956 г. – академиком. В 1957 г. его назначили председателем Государственного научно-технического комитета Совета министров Армянской ССР.

За 25 лет работы в Армении он подготовил более 4000 инженеров-машиностроителей. 120 специалистов под его руководством защитили кандидатские и докторские диссертации. У него 15 авторских свидетельств на изобретения в станкостроении, 175 научных статей, монографий и учебников.

С 1955 г. он являлся председателем НТО “Машпром” Армении.

Мартын Ваганович Касьян обладатель орденов “Дружбы народов”, “Трудового Красного знамени”, “Знак почета”, медали Вавилова, грамоты Верховного Совета ВЦСПС, почетной грамоты “Мецарман гир”, почетного звания заслуженного деятеля науки и техники. Он лауреат премии им. Тиме, почетный член общества “Знание”. Долгие годы был ответственным редактором журнала “Известия АН Армении”, серия Технические науки, организатором журнала “Гитутюн ев техника”. М.В. Касьян был истинным интеллигентом, человеком разносторонних интересов – отлично знал и любил музыку, особенно Чайковского, театр, поэзию (вдохновенно читал сонеты Шекспира, стихи Пушкина, Есенина) и всегда щедро делился своими увлечениями и знаниями с друзьями и студентами, которые его очень любили и уважали.

Сегодня образ рыцаря науки, вся долгая и яркая жизнь которого была посвящена служению науке на благо родной стране, особенно дорог и значителен для нас – его современников, как ученого, имя которого в ряду самых светлых и благородных корифеев армянской науки XX века.

*Редколлегия*

## **PRESS RELEASE**

*Brussels, 20 December 2001*



### **INTAS Call for Young NIS Scientists Fellowships is now open with a deadline on 26 April 2002**

NIS scientist under 35 can apply for a fellowship within the INTAS Young NIS Scientists Programme that offers four different types of grants: project-linked, PhD (equivalent to studying for a candidate degree), newly qualified postdoctoral and experienced postdoctoral fellowships.

INTAS grants provide young scientists with additional funding during their early years in research in their NIS institute plus the opportunity to develop international contacts or undertake training in an INTAS member state.

The duration of the fellowships ranges from six months to two years depending on the type of grant. The financial support varies from € 3,500 per year for a project-linked fellowship to € 6,000 for an experienced postdoctoral fellowship. As INTAS actively encourages young scientists to develop contacts with their Western peers, training periods and/or short-term visits in an INTAS member state are compulsory for all fellowships, except the project-linked fellowships.

Built on the experience of its Call for Fellowships closed in August 2001, INTAS has improved its electronic submission system called IDES for Young Scientists. Interested candidates are invited to submit their application for a fellowship through the IDES (Intas Data Entry System) by 26 April 2002, after which they will be assessed by peer review. INTAS expects the successful young scientists to start their fellowship early November 2002.

In parallel, INTAS will continue to accept, four times a year, applications for conference grants from scientists involved in its projects. The next deadlines are 15 January, 15 April, 15 July and 15 October 2002.

The rules and application forms for all fellowships and project-linked conference grants are available on the website ([http://www.intas.be/Funding Opportunities](http://www.intas.be/FundingOpportunities)) or from [ys@intas.be](mailto:ys@intas.be).

For more information about INTAS in general, please contact the Publicity department by e-mail: [intas@intas.be](mailto:intas@intas.be)

**Notes:** "Bioecomed" NGO, representing INTAS Information Desk in Armenia may provide you with the rules, application forms, assistance and practical advice you need to participate in this call. Consultation days on INTAS calls: every Thursday from 16:00 to 18:00 at Bioecomed NGO office.

Address: Bioecomed NGO, 7 Hasratyan St., 375014, Yerevan RA  
Tel: 3741 282061  
Fax: 3741 538340  
E-mail: [bioecom@mb.sci.am](mailto:bioecom@mb.sci.am)  
URL: <http://www.bioecomed.am>

**ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ**

**ՄՏԱԿՅԱՆ Մ.Գ., ՂԱԼԵՉՅԱՆ Ն.Ա.**  
 ԼԻՍԵՆՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԿՈՏՐՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՄԱԼԻՐ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ ԵՎ ԱՐԱՏԱՈՐՈՇՈՒՄԸ ..... 325

**ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Մ.Ա.**  
 ՈՒՂՂՄԱՆ ՊՐՈՑԵՍԻ ՀՊՄԱՆ ՄԻ ՇԱՐՔ 334  
 ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ.....

**ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Ս.**  
 ԷՔՍՏՐՈՒԶԻԱՅՈՎ ԱՄՐԱՅՎԱԾ ԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱՆ ..... 341

**ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Հ.Ա.**  
 ԼԵԳԻՐՈՂ ՏԱՐԲԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՊՂՆՁԻ ՀԱՄԱԶՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԵՂՈՒԿԱՀՈՍՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ..... 347  
 ԱԴԻԼԽԱՆՅԱՆ Հ.Ա., ԱԴԻԼԽԱՆՅԱՆ Ա.Հ.

**ԳՐՈՒՆՏԱՅԻՆ ՇԵՊԵՐԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈԴՆԵՐ ..... 352**

**ԲՈՒՌՆԱՉՅԱՆ Հ.Ա., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Ա.Գ.**  
 ՀԱԷԿ-Ի ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆԸ՝ ՎԵՐԻՆ 360  
 ԱՎԱԶԱՆԻ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՌՄԱՄԲ .....

**ՄԱՏԱՐՅԱՆ Վ.Ս.**  
 ԷԼԵԿՏՐՈՎԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՆԱԽԱԿԱՆ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ՈՉ ԱՎԱՆԴԱԿԱՆ ՏՐՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ..... 366

**ԲԱԴԱՆՅԱՆ Ն.Պ.**  
 ԷԷՀ-Ի ԿԱՅՈՒՆԱՅՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ԾY-Z, P-Q Ծ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՍՈՂԵԼԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ ԵՎ ԻՐԱՑՈՒՄԸ ՄԻՆԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ ..... 372

**ՂԱՎԻԴՅԱՆ Ժ.Դ.**  
 ՓՈՔՐ ԿՈԳԵՆԵՐԱՑՆՈՂ ՋԵՐՄԱԷԼԵԿՏՐՈՎԱՅԱՆՆԵՐ ..... 379

**ԱՐԵՇՅԱՆ Գ.Լ., ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ Վ.Բ.**  
 ՀԱՂՈՐԴԻՉ ԺԱՊԱՎԵՆԻ ԳԼԱՆՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՄՐԿԱՀՈՍՏԱՆՔԱՅԻՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ..... 384

**ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Գ.Գ., ԱՐԱՍՅԱՆ Մ.Ա.**  
 ԱՆՀԱՄԱՍԵՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐՈՒՄ ՊՈՏԵՆՑԻԱԼԱՅԻՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ՄԻՋԻՆԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ ..... 395

**ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ Գ.Վ.**  
 ՈՒՏՈՐԻ ԲԵՎԵՆՆԵՐԻ ԸՆԴԳՐԿՈՂ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՁԵՎԻ՝ ՀԻՐՈՂԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՕԴԱՅԻՆ ԲԱՅՎԱԾՔԻ ԱՆՀԱՄԱՉԱՓՈՒԹՅՈՒՆ 400  
 ԱՌԱՋԱՑՆՈՂ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՄԱՆ ՄԱՍԻՆ .....

<b>ԲԱՂԴԱՍՄԱՐՑԱՆ Մ. Ք.</b>	
Էլեկտրոնային փոփոխությունների վերլուծությունների համակարգի լուծարարության և օգնության համակարգի մշակման արդյունքները մասնագիտական համակարգի մշակման արդյունքները .....	405
<b>ԿԻՐԱԿՈՍՑԱՆ Գ.Զ., ՄԱԿԱՐՑԱՆ Գ.Ա., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Վ.</b>	
Վերամշակման արդյունքների և արդյունքների արդյունքները ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ԲԱԶՄԱՍԻԼԻՑԻՆԻՄԱՅԻՆ ԷՍԻՏԵՐՈՎ ՏՐԱՆՁԻՍՏՈՐՈՒՄ .....	412
<b>ՄԻՍՈՆՅԱՆ Մ.Զ., ԱՂԱԶԱՆՅԱՆ Կ.Ս.</b>	
Օրգանիզմի արդյունքների և արդյունքների օգնության համակարգի մշակման արդյունքները .....	418
<b>ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ. ԳՅՈՒԼԲՈՒՂԱՂՅԱՆ Ռ.Ռ.</b>	
ՋՋԷՌ - 440 ԲԼՈՎԻ ԱԹԱԶՆՆԱԿԱՆ ԱՄՍՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ ԴԵՏԱԼԻ ՀԱՐՎԱԾԻ ԹԵՔՆՈԼՈԳԻԱՆ ԱՆԿՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄ .....	425
<b>ՄԿՐՏՅԱՆ Ս.Զ., ՄԿՐՏՅԱՆ Ա.Ա., ՋԱՀԱՆԳԻՐՅԱՆ Վ.Է., ԼԱԶԱՐՅԱՆ Ա.Ֆ.</b>	
2. Ինձիցի «Կենդանուհի» գրքի մասին .....	430
<b>ՄՈՒՐՄԱՆՅԱՆ Ա.Ժ., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ԱՂԻՔԵԿՅԱՆ Մ.Վ.</b>	
Ինտերնետի թեք զննարկման և օգնության համակարգի մշակման արդյունքները .....	434
<b>ԽԱԶԱՏՐՅԱՆ Ռ. Ս.</b>	
Պոստպրոցեսինգի արդյունքների և արդյունքների օգնության համակարգի մշակման արդյունքները .....	444
<b>ԲԱՐԵՂԱՍՅԱՆ Գ.Վ.</b>	
Երկրորդական և միջին - բարձրագույն մանկավարժական կրթության մշակման արդյունքները .....	450
<b>ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ Վ. Ս.</b>	
ԵԼՔԱՅԻՆ ԼԱՐՄԱՆ ՑԻԿԼԻԿ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՍԻ ԴԵԶՆԱՆԱՍՅԱՅԻՆ ԻՆՎԵՏՏՈՐ .....	457
<b>ԳՅՈՒԼԶԱՐՅԱՆ Ա.Ա., ՄԻՐԶԱԽԱՆՅԱՆ Ռ.Ս., ՎԱՀԱՆՅԱՆ Ա.Խ.</b>	
Կեղծ շեղումների և օգնության համակարգի մշակման արդյունքները .....	463
<b>ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ Գ.Ս., ՍՈՒՐՄԱՆՅԱՆ Ա.Ս., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Դ.Պ., ԱՍԲԱՐՅԱՆ Հ.Ա., ԳԱԼՍՅԱՆ Հ.Ժ.</b>	
ԷՊՕՔՄԻԴԱՅԻՆ ՍՈՍԻՆՏԵՐ ՊՈՂՈՂԱՏՆԵՐԻ ԵՎ ՀԱՄԱԶՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ .....	468
<b>ԱՅՎԱԶՅԱՆ Գ.Ե.</b>	
ԾԱԿՈՏԿԵՆ ՄԻԼԻՑԻՆԻՄԻ ՇԵՏՈՎ ՊԼԱՆԱՐ ՀԵՏԵՐԱՑՈՒՄ .....	471
<b>ԱՐԵՇՅԱՆ ԳԵՈՐԳԻ ԼԵՎՈՆԻ</b>	
ԾՆԱՅԱՆ 75-ԱՄՅԱԿԻ ԿԱՊԱԿՑՈՒԹՅԱՄԲ .....	475
<b>ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ ԿՈՍՏԱՆ ԱՐՏԱՎԱԶԴԻ</b>	
ԾՆԱՅԱՆ 75-ԱՄՅԱԿԻ ԿԱՊԱԿՑՈՒԹՅԱՄԲ .....	477
<b>ԿԱՍՅԱՆ ՄԱՐՏԻՆ ՎԱՀԱՆԻ</b>	
ԾՆԱՅԱՆ 95-ԱՄՅԱԿԻ ԿԱՊԱԿՑՈՒԹՅԱՄԲ .....	480

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СТАКЯН М. Г., ГАЛЕЧЯН Н. А.</b> КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ ВАЛОВ .....	325
<b>ГРИГОРЯН М.А.</b> НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРАВКИ .....	334
<b>ПЕТРОСЯН А.С.</b> МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭКСТРУЗИЕЙ .....	341
<b>КАРАПЕТЯН Г.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ МЕДНЫХ СПЛАВОВ .....	347
<b>АДИЛХАНИЯН Г.А., АДИЛХАНИЯН А.Г.</b> МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ И СКЛОНОВ .....	352
<b>БУРНАЧЯН Г.А., СТЕПАНИЯН А.Г.</b> ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГАЭС С УЧЕТОМ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ ВЕРХНЕГО БАССЕЙНА .....	360
<b>САФАРЯН В.С.</b> РАСЧЕТ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ НЕТРАДИЦИОННОЙ ФОРМЕ ЗАДАНИЯ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ .....	366
<b>БАДАЛЯН Н.П.</b> ПОСТРОЕНИЕ Y-Z, P-Q МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЭС И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОМ МИНИМИЗАЦИИ .....	372
<b>ДАВИДЯН Ж. Д.</b> МАЛЫЕ КОГЕНЕРИРУЮЩИЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ .....	379
<b>АРЕШЯН Г.Л., НЕРСИСЯН В.Б.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОКАТКИ ПРОВОДЯЩЕЙ ПОЛОСЫ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ .....	384
<b>КАРАПЕТЯН Г. К., АРАМЯН М. А.</b> ОБ УСРЕДНЕНИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ .....	395
<b>БЕРБЕРЯН Г.В.</b> К АНАЛИЗУ ВЛИЯНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ПОЛЮСОВ РОТОРА НА АСИММЕТРИЮ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ГИДРОГЕНЕРАТОРА .....	400
<b>М. К. БАГДАСАРЯН</b> АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ГОРНООБОГА- ТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ .....	405

<b>КИРАКОСЯН Г.Г., МАКАРЯН Г.А., ПЕТРОСЯН А.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕМПА РЕКОМБИНАЦИИ В ТРАНЗИСТОРЕ С ПОЛИКРЕМНИЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ .....	412
<b>СИМОНЯН С.О., АГАДЖАНИЯН К.С.</b> ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ .....	418
<b>ПЕТРОСЯН В.Г., ГЮЛБУДАГЯН Р.Р.</b> АЛГОРИТМ И ОЦЕНКА НАКЛОНА УДАРЯЮЩЕЙ ДЕТАЛИ В ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СОСП БЛОКОВ ВВЭР-440 .....	425
<b>МКРТЧЯН С.О., МКРТЧЯН А.С., ДЖАНГИРЯН В.Э., ЛАЗАРЯН А.Ф.</b> СООБЩЕНИЕ 2. КАК “ОЖИВИТЬ” СБИС? .....	430
<b>МУРАДЯН А.Ж., ПОГОСЯН А.А., АДИБЕКЯН М.В.</b> МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СДРВ ПРИ НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ .....	434
<b>ХАЧАТРЯН Р.М.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ m НЕОДИНАКОВЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ С n ОДИНАКОВЫМИ НАГНЕТАТЕЛЬНЫМИ ТРУБОПРОВОДАМИ .....	444
<b>БАРЕГАМЯН Г.В.</b> АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ИНВЕРТОРОВ С СИНУСОИДАЛЬНЫМ ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И ДВУХУРОВНЕВОЙ ШИРОТНО- ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ .....	450
<b>МОВСЕСЯН В.М.</b> РЕЗОНАНСНЫЙ ИНВЕРТОР С ЦИКЛИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....	457
<b>ГЮЛЬЗАДЯН А.А., МИРЗАХАНИЯН Р.М., ВАГАНЯН А.Х.</b> ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ КАОЛИНА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ .....	463
<b>ОВСЕПЯН Г.С., МАРКАРЯН А.С., ПЕТРОСЯН Д.П., АМБАРЯН А.А., ГАЛСТЯН А.Ж.</b> ЭПОКСИДНЫЕ КЛЕИ ДЛЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ .....	468
<b>АЙВАЗЯН Г.Е.</b> ПЛАНАРНОЕ ГЕТТЕРИРОВАНИЕ СЛОЕМ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ...	471
<b>АРЕШЯН Г.Л.</b> К 75-ЛЕТИЮ .....	475
<b>КОСТАНИЯН К.А.</b> К 75-ЛЕТИЮ .....	477
<b>КАСЬЯН М.В.</b> К 95-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ .....	480

## CONTENTS

<b>STAKYAN M. G., GHALECHYAN N. A.</b> COMPLEX RESEARCH AND DIAGNOSING OF THE FATIGUE FRACTURED SHAFTS .....	325
<b>GRIGORYAN M.A.</b> SOME DRESSING PROCESS PECULIARITIES OF GRINDING WHEELS.....	334
<b>PETROSSYAN H.S.</b> EXTRUDED COMPOSITE BODY DEFORMATION MECHANICS .. KARAPETYAN G.A. STUDIES OF DOPING ELEMENT INFLUENCE ON COPPER FLUIDITY .....	341  347
<b>ADILKHANYAN H.A., ADILKHANYAN A.H.</b>  GROUND SLOPE STABILITY CALCULATION METHOD .....	352
<b>BOURNACHYAN H.A., STEPANYAN A.G.</b>  OPTIMUM WORKING REGIME OF HAEPP IN VIEW OF UPPER RESERVOIR WATER-LEVEL FLUCTUATION .....	360
<b>SAFARYAN V. S.</b> <i>STEADY-STATE CONDITION CALCULATION OF ELECTRICAL SYSTEM IN NON- TRADITIONAL FORM OF INITIAL INFORMATION TASK</i> .....	366
<b>BADALYAN N.P.</b> Y-Z, P-Q MATHEMATICAL MODEL CONSTRUCTION OF STEADY STATE ELECTRIC POWER STATION AND ITS REALIZATION BY THE METHOD OF MINIMIZATION .....	372
<b>DAVIDYAN J.D.</b> SMALL COGENERATING THERMAL POWER PLANTS .....	379
<b>ARESHYAN G.L., NERSISSYAN V.B.</b> DEFINITION OF A ROLLING SPEED OF A CONDUCTIVE BELT USING EDDY- CURRENT METHOD .....	384
<b>KARAPETYAN G.K., ARAMYAN M. A.</b> ON AVERAGING POTENTIAL FIELDS IN INHOMOGENEOUS MEDIA .....	395
<b>BERBERYAN G.V.</b> ON THE ANALYSIS OF THE ROTOR POLE-PIECE ENVELOPE SURFACE IMPACT EXERTING ON THE HYDROGENERATOR AIR-GAP ASYMMETRY .....	400
<b>BAGHDASSARYAN M.K.</b> ELECTRIC POWER CONSUMPTION ANALYSIS AND OPTIMIZATION IN TECHNOLOGICAL REDUCING LINE ON MINING CONCENTRATING PLANT .....	405
<b>KIRAKOSSYAN G.H., MAKARYAN G.A., PETROSSYAN A.V.</b> EFFECTIVE RECOMBINATION RATE INVESTIGATION IN THE TRANSISTOR WITH POLYSILICON EMITTER .....	412

**SIMONYAN S.H., AGHAJANYAN K.S.**

ON ONE METHOD FOR LINEAR PROBLEM SOLVING OF OPTIMAL HIGH-SPEED .....	418
<b>PETROSSYAN V.G., GYULBUDAGHYAN R. R.</b> ALGORITHM AND EVALUATION OF IMPACTING PART'S SLOPE IN THE LDPMs OF VVER – 440 TYPE REACTORS .....	425
<b>MKRTCHYAN S.H., MKRTCHYAN A.S., JAHANGIRYAN V.E., LAZARYAN A.F.</b> 2. HOW TO PROVIDE THE “SURVIVABILITY” OF VLSI ? .....	430
<b>MOURADYAN A.ZH., POGHOSSIAN A.A., ADIBEKYAN M.V.</b> A TECHNIQUE FOR REVEALING ANOMALIES OF ELF PROPAGATION DURING SLOPE SOUNDING OF IONOSPHERE .....	434
<b>KHACHATRYAN R. M.</b> DETERMINATION OF PUMPING STATION CAPACITY IN PARALLEL OPERATION OF $m$ IDENTICAL CENTRIFUGAL PUMPS WITH $n$ IDENTICAL DELIVERY PIPELINES .....	444
<b>BAREGHAMYAN G.V.</b>  INVERTER CALCULATION WITH SINUSOIDAL OUTPUT VOLTAGE AND TWO-LEVEL PULSE-WIDTH MODULATION .....	450
<b>MOVSESYAN W.M.</b> RESONANT INVERTER WITH CYCLIC CONTROL OF OUTPUT VOLTAGE .....	457
<b>GYULZADYAN A.A., MIRZAKHANYAN R.M., VAHANYAN A.KH.</b> STUDY OF KAOLIN DRYING PROCESS IN FLUIDIZATION LAYER .....	463
<b>HOVSEPYAN G.S., MARKARYAN A. S., PETROSSYAN D.P., AMBARYAN H.A., GALSTYAN H. ZH.</b> EPOXIDE GLUES FOR STEELS AND ALLOYS .....	468
<b>AYVAZYAN G. E.</b>  PLANAR GETTERING BY THE POROUS SILICON LAYER .....	471
<b>ARESHYAN G.L.</b> ON THE 75-th ANNIVERSARY OF BIRTH .....	475
<b>KOSTANYAN K.A.</b> ON THE 75-th ANNIVERSARY OF BIRTH .....	477
<b>KASYAN M.V.</b> ON THE 95-th ANNIVERSARY OF BIRTH .....	480