

ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ
ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ
СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

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

Կ Ր Ա Յ Ր Ա Կ Ա Ն Գ Ո Ւ Ե Յ Ի Ա

Կառլյան Մ. Վ. (պատմ. խմբագիր), Աղոնց Հ. Տ. (պատմ. խմբագրի տեղակալ),
Ալեքսեևսկի Վ. Վ., Զաղոյան Մ. Ա., Հակոբյան Խ. Ն.,
Սարգսյան Յու. Ա., Ստակյան Մ. Գ., Տեր-Ազատի Ի. Ա.,
Փինադջյան Վ. Վ. (պատմ. խմբագրի տեղակալ),
Գլխավոր խմբագիր Ստեփանյան Չ. Կ.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

В. Л. КАСЬЯН, К. Р. ТАТАЛЯН

О ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

При электроэрозионной обработке алмазных кругов на их рабочей поверхности под действием тепловых потоков электрических разрядов последовательно образуется множество мелких лунок, в результате чего происходит послойное удаление связки и обнажение алмазных зерен. В условиях аддитивности процесса интегральная величина эрозии может быть выражена через суммы объемов, удаляемых под действием единичных разрядов [1] $V = \sum_{i=1}^N V_i$. Площадь обработан-

ной поверхности при этом определится отношением $S = V/h_{\text{ср}}$, где $h_{\text{ср}}$ — средняя глубина лунки. При обычной электроэрозионной обработке размеры лунок с достаточной точностью определяются параметрами электрических разрядов (энергией W_{11} и длительностью τ_{11}). В условиях электроэрозионной обработки алмазных кругов, осуществляемой при межэлектродных промежутках в несколько десятков микрометров, размеры лунок зависят также от случайных факторов, имеющих статистическую природу и вероятностные закономерности [2, 3].

В данной работе закономерности электроэрозионной обработки алмазных кругов рассмотрены с вероятностных позиций с учетом случайного распределения электрических разрядов по всей поверхности круга. При решении поставленной задачи приняты следующие допущения

1. Электрический разряд моделируется действием плоского круглого источника тепла радиусом r , плотность которого принимается постоянной во времени и равномерной по радиусу. Объем единичной лунки приравнивается объему цилиндра, образующая которого равна глубине лунки Δ .
2. При прохождении разряда через данную площадь поверхности удаляется металл с лунки глубиной h_1 , при прохождении повторного разряда в том же месте — глубиной $h_2 < h_1$, а при i -ом разряде — $h_i < h_{i-1}$. При этом, начиная с $k+1$ -ого разряда, глубина лунки уменьшается настолько, что ею можно пренебречь [4].
3. Так как расстояние между электродом-инструментом и поверхностью круга гораздо больше суммарной толщины удаляемой связки за N разрядов $h_1 + h_2 + \dots + h_N$ [4], электрический разряд на всех участках поверхности равномерен.

Рабочую поверхность круга представим областью Ω , а $\Omega(NT)$ — ту часть поверхности, которая после N разрядов, т. е. в момент времени $t = NT$ (T — период следования разрядов) будет находиться на

глубине $h_1 + h_2 + h_3 + \dots + \Delta_i$ от условной нулевой поверхности связи Ω_0 (рис.); $S_i(NT)$ — площадь поверхности $\Omega_i(NT)$, а $S = 2\pi Rb$ (R — радиус круга, b — ширина круга) площадь поверхности Ω . Среднее количество металла, удаляемого с поверхности i -ого слоя при одном разряде: $V_{\text{уд}} = \pi r^2 h_i \frac{S_i}{S}$, следовательно, среднее уменьшение площади поверхности i -ого слоя — $\Delta S_{i, \text{н}} = \pi r^2 \frac{S_i}{S}$.

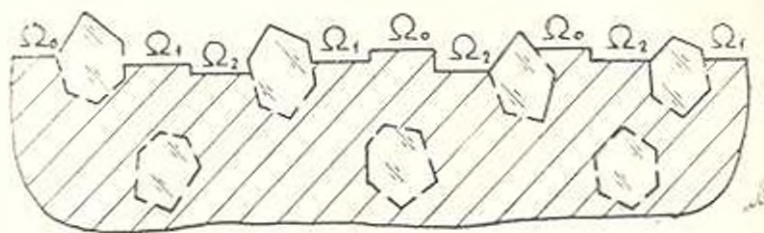


Рис.

Для доказательства введем две индикаторные функции $I(x)$ и $J(x, y)$, $[x \in \Omega, y \in \Omega]$

$$I(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in \Omega_i, \\ 0, & \text{если } x \in \Omega_j, \end{cases}$$

$$J(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{при } |x - y| > r, \\ 0 & \text{при } |x - y| \leq r, \text{ если } y \in \Omega_j, \\ 1 & \text{при } |x - y| \leq r, \text{ если } y \in \Omega_i. \end{cases}$$

$V_i(x)$ — объем удаляемого металла с поверхности i -ого слоя, если центр круга находится в точке x . Так как $b \gg r$, влияние границы области Ω можно не учитывать. Тогда

$$V_i(x) = \iint_{\Omega} I(x, y) dy h_i.$$

Найдем математическое ожидание $V_{i, \text{н}}$ величины $V_i(x)$, при условии, что случайная величина x равномерно распределена на поверхности Ω .

Плотность этого распределения $\left(\iint_{\Omega} 1 dx \right)^{-1} = S^{-1}$ и поэтому

$$V_{i, \text{н}} = \iint_{\Omega} V_i(x) \frac{1}{S} dx = \frac{h_i}{S} \iint_{\Omega} \left[\iint_{\Omega} I(x, y) dy \right] dx =$$

$$= \frac{h_i}{S} \iint_{\Omega} \left[\iint_x J(x, y) dx \right] dy,$$

где $\iint_x J(x, y) dx = \pi r^2 I(y)$.

Это следует из того, что при $y \in |\Omega$, интеграл равен нулю. Если же $y \in \Omega_r$, то при $|x - y| > r$ и $|x - y| < r$ $J(x, y) = 0$ и $J(x, y) = 1$, а $\int_{|x-y|<r} 1 dy = \pi r^2$. Продолжив цепочку равенств, получим

$$V_{i, \text{ср}} = \frac{h_i}{S} \int \left| \int \int J(x, y) dx \right| dy = \frac{h_i}{S} \int \int \pi r^2 I(y) dy = \frac{\pi r^2}{S} h_i S_i,$$

$$\text{т. к. } \int \int I(y) dy = S_i.$$

Основываясь на этом положении, запишем рекуррентные соотношения для поверхностей различных слоев связки, если их исходными поверхностями являются $S_0(0) = p_0 S, \dots, S_{k-1}(0) = p_{k-1} S$, где $p_0, \dots, p_{k-1}$ — соответствующие коэффициенты, учитывающие наличие алмазных зерен в связке;

$$S_0((N+1)T) = S_0(NT) - \frac{\pi r^2 S_0(NT)}{S}; \quad (1)$$

$$S_i((N+1)T) = S_i(NT) - \frac{\pi r^2 S_i(NT)}{S} + \frac{\pi r^2 S_{i-1}(NT)}{S},$$

где $\frac{\pi r^2 S_i(NT)}{S}$ — среднее уменьшение площади поверхности i -ого слоя после $(N+1)$ -го разряда из-за удаления части поверхности этого слоя; $\frac{\pi r^2 S_{i-1}(NT)}{S}$ — среднее приращение площади поверхности i -ого слоя за счет удаления части поверхности $i-1$ -ого слоя $(N+1)$ -ым разрядом.

Представим рекуррентные соотношения (1) в виде

$$\frac{S_0(t+T) - S_0(t)}{T} = -\frac{\pi r^2}{ST} S_0(t), \quad (2)$$

$$\frac{S_i(t+T) - S_i(t)}{T} = -\frac{\pi r^2}{ST} S_i(t) + \frac{\pi r^2}{ST} S_{i-1}(t), \quad i = 1, \dots, k-1.$$

Вследствие малости T выражения (2) можно записать дифференциальными уравнениями

$$S'_0(t) = -\frac{\pi r^2}{ST} S_0(t), \quad S'_i(t) = -\frac{\pi r^2}{ST} S_i(t) + \frac{\pi r^2}{ST} S_{i-1}(t). \quad (3)$$

Решая уравнение (3), получаем величину площади поверхности нулевого слоя, оставшейся по истечении времени t от начала обработки

$$S_0(t) = p_0 S e^{-\frac{\pi r^2}{ST} t}. \quad (4)$$

Решением уравнения (3) является

$$S_i(t) = \left[p_i + \left(\frac{\pi r^2}{ST} \right) p_{i-1} \frac{t}{1!} + \dots + \left(\frac{\pi r^2}{ST} \right) p_{i-1} \frac{t^j}{j!} + \dots + \left(\frac{\pi r^2}{ST} \right)^i p_0 \frac{t^i}{i!} \right] S_0 e^{-\frac{\pi r^2}{ST} t} \quad (5)$$

При начальных условиях ($p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p_{i-1} = 0$), соответствующих исходной поверхности круга, решение уравнений (3) примет вид

$$S_i(t) = p_0 S \left(\frac{\pi r^2}{ST} \right)^i \frac{t^i}{i!} e^{-\frac{\pi r^2}{ST} t} \quad (6)$$

С учетом того, что после k -ого разряда в одном и том же месте удаление связи практически не происходит, площадь поверхности k -ого слоя можно представить

$$S_k(t) = p_0 S - S_0(t) - S_1(t) - \dots - S_{k-1}(t). \quad (7)$$

Порядок k определяется из выражения $k = h_1 + h_2 + \dots + h_n$, где h — суммарная величина линейного съема связи, определяемая из условия обеспечения оптимальной величины вскрытия зерен [5].

Таблица
Расчетные и экспериментальные данные t и S_k/S
при различных межэлектродных промежутках δ ,
 $n = 10$ мкм

Источник	δ , мкм	t , с	S_k/S
[1]	20	50	1
	40	90	
	60	150	
(4), (6), (7)	20	90	0,85
	40	175	
	60	320	
Эксперимент	20	90	0,82
	40	175	0,8
	60	320	0,75

Выражения (4), (6), и (7) позволяют вычислить время, необходимое для вскрытия поверхности k -го слоя или определить величину площади поверхности k -го слоя, вскрытой за время t , и тем самым оценить состояние поверхности алмазосодержащего слоя и проследить за динамикой развития рабочей поверхности. Для проверки полученных зависимостей расчетные данные интегральной величины эрозии сравнивались с экспериментальными данными электроэрозионной обработки алмазного круга АПП 250×15 марки алмаза АС 15 зернисто-

сти 125/100 на связке М 1 50%-ной концентрации электрическими импульсами, используемыми при правке кругов ($W_{\text{д}}=0.04$ Дж, $\tau_{\text{д}}=10$ мкс, частотой 10 кГц, межэлектродный промежуток 20, 40, 60 мкм). Относительная величина площади обработанной поверхности k -го слоя определялась статистическим методом путем измерения величины линейного съема связки на 48 участках поверхности круга, расположенных в два ряда равномерно по образующей. Для определения величины линейного съема связки был использован метод, описанный в [5]. Сравнительные данные приведены в таблице. При расчетах по (4), (6) и (7) брали $S_1/S=0.85$, время обработки круга в экспериментах было равно расчетному.

Анализ полученных результатов показывает, что на интегральную величину эрозии при электроэрозионной обработке алмазных кругов значительное влияние оказывает случайное распределение электрических разрядов на рабочей поверхности круга. Оно возрастает с увеличением межэлектродного промежутка.

ВрПН им. К. Маркса

10. IX. 1986

Վ. Լ. ԿԱՍՅԱՆ, Վ. Բ. ԿԱՍՅԱՆ

ԱՐԱՍՏԵ ԶԿԱԶԱՐԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐՈՆՈՎՈՆ ՄԵԾԱԿՄԱՆ ՀԱՎԱՅՈՒԿԱՆ ՕՐԻՆԱԶԱՓՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա Վ Ի Ս Ի Ս Ի Վ

Ուսումնասիրված են պատահական գործոնների ազդեցությունը արմատի հզկաքարերի էլեկտրաէրոզիոն մաքրման օրինաչափությունների վրա: Դուրս են բերված արատահայտություններ, որոնք հնարավորություն են տալիս որոշել հզկաքարի բանվորական մակերևույթի մաքրման տևողությունը: Առաջված արդյունքները վկայում են, որ հզկաքարի էլեկտրաէրոզիոն մաքրման ուժգնությունը կախված է բանվորական մակերևույթի վրա էլեկտրական պարպումների պատահական բաշխումից և միջէլեկտրոդային հեռավորության մեծացման հետ այդ կախվածությունը աճում է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Золотых Б. Н. Физические основы электроискровой обработки металлов—М: Гостехтеориздат, 1953.—108 с.
2. Некрашевич Н. Г., Мицкенич М. К., Бакуто Н. А. О характере закономерностей в явлении электрической эрозии//Сб. науч. тр. физ.тех. ин-та АН БССР.—Минск, 1955.—Вып. 2.—С. 179—180.
3. Яницкий Ю. В. Расчет интегральной величины эрозии при электроискровой обработке материалов—1969.—№ 1—С. 5—10.
4. Касьян М. В., Касьян В. Л. Исследование возможности электроэрозионной обработки алмазных кругов в воздушной среде // Электрошпательная обработка материалов.—1981.—№ 5—С. 10—13.
5. Мартirosян Р. Б., Касьян В. Л. Алмазное шлифование труднообрабатываемых материалов при электроэрозионном воздействии на рабочую поверхность круга // Сб. «Прогрессивные методы финишной обработки изделий сложной формы».—Павлод, 1979—С. 68—70.

А. М. АЛОЯН

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СООРУЖЕНИЯ ТИПА КРУГОВОЙ КОНСОЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Рассматриваются колебания круговой цилиндрической оболочки, одним концом жестко заделанной и другим—свободным, подвергающейся горизонтальным сейсмическим нагрузкам (рис.). Считается, что основание совершает только горизонтальные колебания по закону $y_0(t)$.

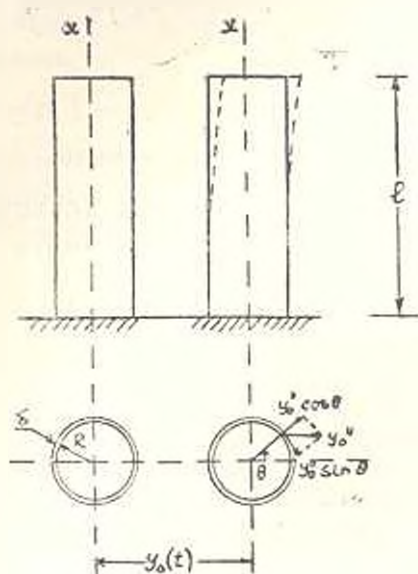


Рис.

Система уравнений колебания оболочки имеет вид [1]

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\nu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + \frac{\nu}{R} \frac{\partial w}{\partial x} &= -\frac{1-\nu^2}{E\delta} X, \\ \frac{1+\nu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} &= -\frac{1-\nu^2}{E\delta} Y, \\ \nu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 R}{12} w + \frac{w}{R} &= \frac{1-\nu^2}{E\delta} Z, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где X, Y, Z —компоненты внешней нагрузки;

$$X = 0; \quad Y = \frac{\gamma_0^2}{g} y_0''(t) \sin \theta; \quad Z = -\frac{\gamma_0^2}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\gamma_0^2}{g} y_0''(t) \cos \theta;$$

$y_0''(t)$ — ускорение основания.

Из первых двух уравнений системы (1) выражая u , v через w и подставляя в третье уравнение, получаем дифференциальное уравнение движения оболочки

$$\frac{\partial^2 R}{12} \nabla^4 w + \frac{1-v^2}{R} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\gamma R (1-v^2)}{Eg} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla^4 w = - \frac{2\gamma (1-v^2)}{Eg R^3} y_0''(t) \cos \theta. \quad (2)$$

Решение $w(x, \theta, t)$ уравнения (2) представим в виде

$$w(x, \theta, t) = \cos \theta \sum_{i=1}^{\infty} X_i(x) f_i(t), \quad (3)$$

где

$$X_i(x) = \sin \mu_i \frac{x}{l} - \operatorname{sh} \mu_i \frac{x}{l} - \frac{\sin \mu_i + \operatorname{sh} \mu_i}{\cos \mu_i + \operatorname{ch} \mu_i} \left(\cos \mu_i \frac{x}{l} - \operatorname{ch} \mu_i \frac{x}{l} \right),$$

а базисные фундаментальные функции А. Н. Крылова удовлетворяют следующие крайние условия [2]:

$$X_i(0) = X_i'(0) = X_i'(l) = X_i''(l) = 0;$$

$$\mu_1 = 1,875; \quad \mu_2 = 4,694; \quad \mu_i = \frac{2i-1}{2} \pi, \quad \text{при } i > 2.$$

Пользуясь методом Б. Г. Галеркина и учитывая ортогональность базисных функций А. Н. Крылова, получаем бесконечную систему дифференциальных уравнений для определения $f_i(t)$

$$a_j f_j''(t) + b_j f_j(t) + \sum_{i=1}^{\infty} a_{ij} f_i''(t) + \sum_{i=1}^{\infty} b_{ij} f_i(t) = e_j y_0''(t), \quad (4)$$

где

$$a_j = \frac{\gamma R (1-v^2)}{Eg} \left[\left(\frac{\mu_j}{l} \right)^4 + \frac{1}{R^4} \right] \int_0^l X_j^2(x) dx,$$

$$b_j = \left[\frac{\gamma^2 R}{12} \left\{ \left(\frac{\mu_j}{l} \right)^8 + \frac{6}{R^4} \left(\frac{\mu_j}{l} \right)^4 + \frac{1}{R^8} \right\} + \frac{1-v^2}{R} \left(\frac{\mu_j}{l} \right)^4 \right] \int_0^l X_j^2(x) dx,$$

$$a_{ij} = - \frac{2\gamma (1-v^2)}{Eg R} \int_0^l X_i'(x) X_j(x) dx,$$

$$b_{ij} = - \frac{\gamma^2}{3R} \left[\left(\frac{\mu_i}{l} \right)^4 + \frac{1}{R^4} \right] \int_0^l X_i'(x) X_j(x) dx,$$

$$e_j = - \frac{2\gamma (1-v^2)}{Eg R^3} \int_0^l X_j(x) dx.$$

Для описания закона колебаний почвы при землетрясении Дж. Сноуденом предложена следующая формула [3]:

$$y_0(t) = y_{\text{стат}} \frac{t^2}{4} \chi^2 e^{-\chi t}, \quad (5)$$

где χ — характеристика продолжительности.

Если довольствоваться вторым приближением, общее решение (4) будет

$$f_1(t) = A_1 \sin(p_1 t + \alpha_1) + A_2 \sin(p_2 t + \alpha_2) + e^{-\lambda_1 t} (h_1 t^2 + m_1 t + n_1), \quad (6)$$

$$f_2(t) = \lambda' A_1 \sin(p_1 t + \alpha_1) + \lambda'' A_2 \sin(p_2 t + \alpha_2) + e^{-\lambda_2 t} (h_2 t^2 + m_2 t + n_2),$$

где p_1, p_2 — собственные частоты колебаний оболочки. Значения $h_1, m_1, n_1, h_2, m_2, n_2, \lambda', \lambda''$ определяются из (4), а произвольные постоянные $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ должны быть выбраны так, чтобы удовлетворялись начальные условия: $w(x, 0; 0) = 0, w_t(x, 0; 0) = 0$, откуда следует, что

$$f_1(0) = f_1'(0) = f_2(0) = f_2'(0) = 0.$$

Радialное перемещение точек срединной поверхности оболочки по второму приближению будет

$$w(x; \theta; t) = X_1(x) f_1(t) \cos \theta + X_2(x) f_2(t) \cos \theta. \quad (7)$$

Из первых двух уравнений системы (1), выражая значения u, v через w , получаем

$$\nabla^4 w = \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta^2} - \frac{\nu}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = F_1(x; t), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \nabla^4 w &= \frac{\nu(1+\nu)-2}{R^2(1-\nu)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial \theta^2} - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \\ &= \frac{\nu(1-\nu^2)}{EgR^2} y_0(t) \sin \theta = F_2(x; t). \end{aligned} \quad (9)$$

Решения уравнений (8) и (9) имеют вид

$$u = \left[c_1 e^{\frac{x}{R}} + c_2 x e^{\frac{x}{R}} + c_3 e^{-\frac{x}{R}} + c_4 x e^{-\frac{x}{R}} + \right. \\ \left. + \frac{R^2}{2} \int_0^x F_1(y, t) \left(\frac{x-y}{R} \operatorname{ch} \frac{x-y}{R} - \operatorname{sh} \frac{x-y}{R} \right) dy \right] \cos \theta, \quad (10)$$

$$v = \left[-c_1 e^{\frac{x}{R}} - \frac{4}{1+\nu} c_2 x e^{\frac{x}{R}} + c_3 e^{-\frac{x}{R}} - \frac{4}{1+\nu} c_4 x e^{-\frac{x}{R}} + \right. \\ \left. + \frac{R^2}{2} \int_0^x F_2(y, t) \left(\frac{x-y}{R} \operatorname{ch} \frac{x-y}{R} - \operatorname{sh} \frac{x-y}{R} \right) dy \right] \sin \theta, \quad (11)$$

а постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 определяются из граничных условий: при $x = 0, u = v = 0; x = l, T_1 = S = 0$, где

$$T_1 = \frac{E\delta}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) = \frac{E\delta}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\nu}{R} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + w \right) \right],$$

$$S = \frac{E\delta}{2(1+\nu)} w = \frac{E\delta}{2(1+\nu)} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial x} \right).$$

Когда известны все три компоненты перемещений, можно найти внутренние усилия и определить напряжения в оболочке.

Расчеты, выполненные для оболочки с размерами $R = 2,5$ м, $l = 50$ м, $\delta = 0,2$ м и параметрами $\nu = 0,2$ (бетон), $\gamma = 2200$ кг/м³, $E = 29000$ МПа при $t = 0,1$ с, дали следующие результаты: частоты свободных колебаний во втором приближении: $p_1 = 36,1$ с⁻¹, $p_2 = 84,3$ с⁻¹, а в первом приближении: $p_1 = 36,13$ с⁻¹.

Перемещение на свободном конце в радиальном направлении: I приближение— $w = -2,1$ мм; II приближение— $w = -1,9$ мм. Максимальные значения напряжений на высоте $l = 50$ м и $x = 40$ м: $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = -23,2$ МПа, $\tau = 0$; $\sigma_1 = -3,7$ МПа, $\sigma_2 = -18,3$ МПа, $\tau = 2,4$ МПа. Максимальные значения усилий моментной группы при $x = 0$: $M_1 = -0,63$ Нм, $M_2 = -0,13$ Нм, $H = 0$.

Расчетные данные оболочки соответствуют данным ядра жесткости шестнадцатиэтажных зданий, осуществляемых методом подъема этажей. Результаты расчетов можно использовать при расчетах и проектировании цилиндрических силосов, градирн, резервуаров и др.

ЕрПМ им. К. Маркса

30. VIII 1986

2. ԾԱՆԿԱԿԱՆ

ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԱԿԱՆ ԱԶԳԻՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՇՐՋԱՆԱՅԻՆ ԿՈՆՍՈՎԱՅԻՆ
ՂԱՆԱՅԻՆ ԹԱՂԱՆԹԵՆԵՐԻ ՏՆՍԵՐ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾԵՆԵՐԻ ՎՐԱ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Դիտարկված են մի ծայրով ամրակցված շրջանային գլանային թաղանթի տատանումները, որոնք առաջանում են երկրաշարժի ազդեցություներից, ընդ որում դիտարկված են հիմքի միայն հորիզոնական տատանումները: Թաղանթի տատանման դիֆերենցիալ հավասարումը լուծվում է Ք. Գ. Դալյորկիների մեթոդով: Դրանով են գլանային թաղանթի տատանման սեփական հաճախությունները, աեղափոխումների երկր բաղադրիչները, ճիգերը և լարումները լուծված է թվային օրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вольмир А. С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек.—М.: Наука, 1972.—432 с.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний.—М.: Гостехиздат, 1958.—628 с.
3. Хачиян Э. Е., Амбарцумян В. А. Динамические модели сооружений и теории сейсмостойкости.—М.: Наука, 1981.—203 с.

А. Р. ПАХЛЕВАНИ

К ВОПРОСУ О ЦИФРОВОМ МОДЕЛИРОВАНИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В СОСТАВЕ АВТОНОМНЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работах по цифровому моделированию автономных электро-энергетических систем (АЭЭС) трехфазного тока проблема экономии машинного времени цифровых ЭВМ рассматривается, как правило, с точки зрения упрощения математических моделей АЭЭС за счет упрощения уравнений, входящих в состав АЭЭС синхронных генераторов (СГ) и асинхронных двигателей (АД) [1, 2]. При этом для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих АЭЭС, используются сложные методы численного интегрирования, имеющие высокую степень достоверности. Например, для моделирования АЭЭС традиционным является метод Рунге-Кутты 4-го порядка [1, 2].

В данной работе рассмотрена возможность экономии машинного времени за счет упрощения уравнений СГ и АД и использования более простых и «быстрых» методов численного интегрирования. Первоначально в качестве базового варианта рассматривается численный эксперимент на наиболее полной модели АЭЭС (модель СГ описана полными уравнениями Парка-Горева с учетом насыщения по раздельным характеристикам статора и ротора, а модель АД—полными уравнениями Парка-Горева [1]). Система дифференциальных уравнений решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом 10^{-4} . Выбор указанного шага обеспечивает 25 точек на периоде (при частоте сети АЭЭС 400 Гц), что считается оптимальным для достижения высокой точности расчетов [1].

Затем, при последовательном переборе методов интегрирования и принятых упрощениях моделей СГ и АД сравниваются экономленное машинное время и вносимые погрешности по отношению к базовому варианту. В качестве методов интегрирования сравниваются методы Эйлера, трапеций, Адамса и Симпсона. Упрощение уравнений, описывающих СГ, сводится к последовательному пренебрежению трансформаторными э. д. с., демпферными контурами и насыщением магнитных цепей. Упрощение модели АД осуществляется за счет перехода к Т- и Г-образным электрическим схемам замещения АД. Вносимые погрешности оцениваются по максимальному перерегулированию напряжения в АЭЭС и вычисляются как среднее значение расхождения по исследуемым режимам работы.

Для проведения указанных экспериментов используется пакет прикладных программ «ДИНАМИКА» [3], который обеспечивает воз-

возможность автоматизации моделирования различных структур АЭЭС с изменяющимся составом элементов, параметрами и режимами работы. Это достигается за счет применения принципа структурного моделирования, согласно которому модели АЭЭС формируются из совокупности информационно и функционально согласованных моделей отдельных элементов, включенных в библиотеку моделей ППП. Таким образом, упрощение модели АЭЭС сводится к упрощению отдельных моделей СГ и АД. Кроме того, применение ППП «ДИНАМИКА» обеспечивает возможность использования пяти указанных выше методов с фиксированным шагом и двух методов с переменным шагом (Рунге-Кутты 4-го порядка и Милна 5-го порядка).

К преимуществам использования ППП «ДИНАМИКА» можно отнести также специальный проблемный входной язык, ориентированный на пользователей, не являющихся специалистами по программированию; возможность получения выходной информации в удобной и наглядной форме: в виде таблиц и графиков на печатающем устройстве и на графопостроителе. ППП функционирует на ЭВМ ЕС под управлением ОС ЕС 4.1 и выше. Ввод задания на моделирование осуществляется с перфокарт или дисплея с использованием диалоговых средств.

Таблица

№	Пути экономии процессорного времени моделирования АЭЭС на ЭВМ	Вносимая погрешность, %	Сэкономленное время, %
1	Вариирование методами интегрирования:		
1.1	Адамса	10	40
1.2	Эйлера	6	40
1.3	трапеций	5	25
1.4	Симпсона	4	10
2	Упрощение уравнений СГ пренебрежением		
2.1	н. д. с. трансформации	5	6
2.2	н. д. с. трансформации и демпферными контурами	6	9
2.3	н. д. с. трансформации демпферными контурами и насыщением магнитных цепей	50	21
3	Упрощение уравнений АД по схемам замещения:		
3.1	Т-образная	8	9
3.2	Г-образная	23	16

В составе исследуемой одноканальной АЭЭС рассмотрены СГ типа ГТ40 и регулятор напряжения с широтноимпульсным модулятором [4]. В качестве нагрузки рассмотрен АД типа АДС-6000. Получение результатов моделирования режимов включения возбуждения СГ, пуска АД и отключения АД для базового варианта на ЭВМ ЕС 1010 требует 2,5 мин процессорного времени. Анализ результатов, приве-

денных в таблице, показывает, что пренебрежение влиянием э. д. с. трансформации и демпферными контурами СГ (пп 2.1 и 2.2), э. д. с. трансформации АД за счет перехода к Т-образной схеме замещения АД (п. 3.1) существенного влияния на переходные процессы в рассматриваемых режимах не оказывает (погрешность до 8% вполне приемлема и составляет менее 1.5 В при номинальном напряжении 120 В). Но при этом и сэкономленное время (6—9%) также не существенно. Расчеты, проведенные на основании упрощенных уравнений СГ без учета насыщения, демпферных контуров и э. д. с. трансформации (п. 2.3), а также по Г-образной схеме замещения АД (п. 3.2), дают большую погрешность (до 50%), что не позволяет использовать их при расчетах, несмотря на существенную экономию процессорного времени. При варьировании методами интегрирования наиболее предпочтительными являются методы Эйлера и трапеций (пп 1.2 и 1.3), которые при допустимой вносимой погрешности (5—6%) обеспечивают значительную экономию процессорного времени (25—40%).

Таким образом, анализ результатов цифрового моделирования АЭЭС, в состав которых входят СГ и АД, при моделировании различными методами интегрирования показывает, что для сохранения приемлемой точности расчетов машинное время целесообразно экономить за счет простых и «быстрых» методов численного интегрирования, а не упрощения уравнений СГ и АД.

Полученный результат может быть принят за основу при разработке систем моделирования АЭЭС, СГ и АД, его целесообразно учесть при проведении многочисленных исследований на цифровых моделях, при оптимизационных расчетах и т. п.

НИИЭлектромаш

29 VIII. 1986

Ա. Ի. ՓԱՆՈՎԱՆՅԱՆ

ԻՆՔՆԱՎԱՐ ԷԼԵԿՏՐՈՒԴՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄԵԿՆԱՆՆԵՐԻ ԹՎԱՅԻՆ ՄՈՒԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Գիտարկված է թվային էՀՄ-ի մեքենայական ժամանակի տնտեսման հնարավորությունը եռաֆազ ինքնավար էլեկտրաէներգետիկական համակարգերի մոդելավորման ժամանակ սինխրոն գեներատորների և ասինխրոն շարժիչների հավասարումների պարզեցման և թվային ինտեգրման մեթոդների տարափոխման հաշվին: Ցույց է տրվում, որ հաշվարկների ընդունելի ճշտության պահպանման համար մեքենայական ժամանակի նպատակահարմար է տեսնել պարզ և «արագ» ինտեգրման մեթոդների հաշվին և ոչ թե գեներատորների (անտեսում են արտեֆորմացիայի էլ. շ. ու-ն, մարիչային պժաշկթաները, մագնիսական շղթաների հագեցումը) և շարժիչների (անցում գեպի Դ- և Գ- տիպի տեղակայման սխեմաներին) հավասարումների պարզեցման հաշվին: Մեքենայական ժամանակի տնտեսման համար առաջնային ձևաչափ են էլիբի (տնտեսման 40% սխալի 6^{-րդ}-ի դեպքում) և սեղանների (համապատասխանաբար՝ 25% և 5%) մեթոդները:

- 1 Литкенс Н. В., Салихова В. П., Шелухина Т. М. Электромагнитические переходные процессы в системах электроснабжения—М., МЭИ, 1977—78 с.
- 2 Веретенников Л. П. Исследование процессов в силовых электроэнергетических системах. Теория и методы.—Л.: Судостроение, 1975.—375 с.
- 3 Пакет прикладных программ для моделирования динамических процессов в системах генерирования электроэнергии летательных аппаратов/Гос. фонд алгоритмов и программ, ВЦТИЦентр; Авторы: Аветисян Л. А., Пикленаян А. Р., Винаский О. В.—№ ГРП007020.—М., 1984—450 с.
- 4 Савалов С. В. и др. Математическая модель электронного регулятора напряжения с широтноимпульсным модулятором. // Тр. МИИТ.—М.: Изд-во МИИТ, 1983.—Вып. 710.—С. 15—27.

Изв. АН АрмССР (сер. ФН), т. XLII, № 1, 1988

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

П. А. МАТЕВОСЯН, В. Г. ХАЧАТУРЯН

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Затраты на сооружение и эксплуатацию газотранспортных систем (ГТС) весьма значительны. Вопросам оптимизации параметров ГТС посвящен ряд работ [1, 2], однако известные методики можно применить при проектировании отдельных газопроводов и они рассчитаны на большие ЦВМ серии ЕС.

В настоящей работе предлагаются методика, математическая модель и алгоритмы, а также способы технической реализации задачи оптимизации параметров проектируемой ГТС с помощью средств аналоговой и микропроцессорной вычислительной техники.

Задача проектирования ГТС с учетом двойного топливоснабжения пунктов газопотребления относится к категории больших (нелинейных) многопараметрических задач. Проектирование усложняется при наличии в ГТС нескольких источников подачи газа и второго вида топлива, а также кольцевых участков газопровода (УГ). В качестве критерия оптимизации принимается минимум приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию газотранспортной системы.

Согласно предлагаемому алгоритму при проектировании развития ГТС на первом этапе с помощью микро-ЭВМ предусматривается осуществить расчет оптимальных технико-экономических характеристик (ТЭХ) для всех УГ, входящих в рассматриваемую ГТС. На втором этапе на основе ТЭХ УГ, используя специализированное аналоговое вычислительное устройство (САВУ), осуществляется расчет оптимальных потоков газа по УГ в ГТС. На третьем этапе с помощью микро-ЭВМ на основе полученных оптимальных потоков газа проводится расчет технических параметров развиваемых газопроводов. Решение каждой из указанных задач может иметь и самостоятельное значение.

Для решения рассматриваемой задачи ГТС может быть представлена состоящей из отдельных УГ, включающих линейные отрезки газопроводов и компрессорные станции (КС). Разделение ГТС на УГ делается в узловых точках ГТС, к которым могут быть подключены три и более УГ, либо крупные газопотребители [ГП].

Целевая функция математической модели для расчета оптимальных потоков газа в развиваемой ГТС, удобная для реализации с помощью САВУ, имеет вид:

$$Z^{ГТС} = \sum_{k=1}^K C_k^{УГ}(Q_k) Q_k - \sum_{m=1}^M C_m^n |q_m^n - (q_m^n)^{min}| \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $Z^{ГТС}$ — приведенные затраты на развитие и эксплуатацию ГТС, *т. руб. год*; $C_k^{УГ}(Q_k) = \frac{Z_k^{УГ}}{Q_k}$, $Z_k^{УГ}$ — удельные и приведенные затраты на строительство и эксплуатацию k -го УГ, *т. руб. т. у. т.*; Q_k — поток газа через k -ый УГ, *т. у. т. год*; C_m^n — эффективность от использования газа в m -ом пункте газопотребления, *т. руб./т. у. т.*; q_m^n — поток газа в m -ый пункт ГП, *т. у. т. год*; K — число участков газопровода; M — число выделенных газопотребителей в ГТС.

Математическая модель включает также:

ограничения на потребление газа в m -ом ГП и на его поступление

$$(q_m^n)^{min} \leq q_m^n \leq (q_m^n)^{max}, \quad m = (\overline{1, M}); \quad (2)$$

$$(q_k^I)^{min} \leq q_k^I \leq (q_k^I)^{max}, \quad k = (\overline{1, M}); \quad (3)$$

баланс топливопотребления ГП и в узловых точках ГТС

$$q_m^n + T_m^n = B_m^n, \quad m = (\overline{1, M}); \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K Q_k + q_k^I - q_k^n = 0, \quad k = (\overline{1, N}), \quad (5)$$

где T_m^n , B_m^n — второй вид топлива, поставляемый в m -ый ГП, и общее потребление топлива *т. у. т.*; N — число узловых точек в ГТС; q_k^I — поток газа, поступающего извне в k -ую узловую точку системы.

При составлении условия (5) предполагается, что каждая узловая точка может иметь не более одного источника поступления газа. При отсутствии в узловой точке одной из компонент соответствующее слагаемое равно нулю.

Для решения задачи (1) — (5) с помощью микро-ЭВМ рассчитываются ТЭХ УГ — $Z_k^{УГ} = f(Q_k)$ для различных потоков газа на входах и выходах УГ и аппроксимируемые полиномом второго порядка [2, 6]. На втором этапе для расчета оптимальных потоков использован принцип распределения тока по путям наименьшего сопротивления в сети, обеспечивающий минимум электрических потерь в цепи [3, 7]. Электрическая схема САВУ, предназначенная для реализации математиче-

ской модели (1) — (5), включает источники тока, моделирующие потоки газа, объемы добычи и газопотребления [4], а также источники напряжения, моделирующие удельные приведенные затраты и эффективность от использования газа в ГП [5]. Условия баланса реализуются в соответствующих узловых точках, а ограничений — с помощью динотных схем ограничений. После расчета оптимальных значений потоков по УГ с помощью микро-ЭВМ по (1) — (5) рассчитываются оптимальные технические параметры УГ.

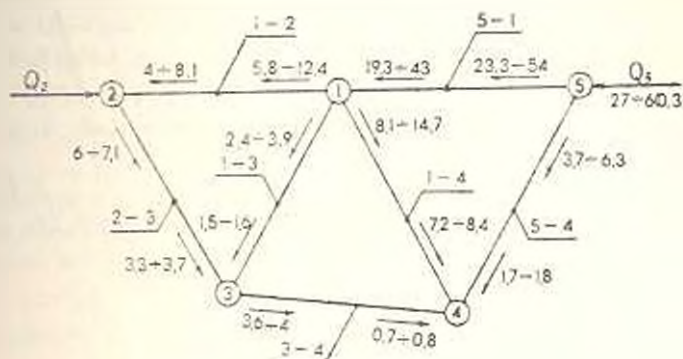


Схема сети ГТС (потоки указаны в млрд.м³/год).

Расчеты по данной методике проводились для гипотетической ГТС, аналогичной ГТС Закавказья, структура которой приводится на рисунке. В процессе расчета были использованы нормативные показатели на строительство и эксплуатацию газопроводов. Значение оптимальных потоков газа на входах и выходах соответствующих УГ приводятся в таблице.

Таблица

Обозначение УГ	Оптимальные потоки газа по УГ	
	вход	выход
1 — 2	5,9	4
2 — 3	6	3,3
1 — 3	2,4	1,5
3 — 4	3,6	0,7
1 — 4	13,5	7,2
5 — 1	28,8	24,8
5 — 4	3,7	1,8

Осуществление предлагаемого метода решения рассматриваемой задачи проектирования с помощью САВУ в сочетании с микро-ЭВМ дает возможность облегчить проектирование развития территориальных ГТС и отдельных газопроводов в условиях проектных организаций.

ЕрПИИ К. Маркса

20. VI 1986.

**ԳԱԶԱՄԻՐՎԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԿԵՐԻ ԶԱՐԿԱՑՄԱՆ
ՆԱԽԱԳԻՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄԸ**

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Առաջարկվում է նախադժվո՞ղ ԳՀՄ-ի պարամետրերի օպտիմալացման խնդրի մեթոդիկան, մաթեմատիկական մոդելը, ալգորիթմները և նրա տեխնիկական իրականացման էղանակներն անալոգային և միկրոպրոցեսորային տեխնիկայի կիրառմամբ: ԳՀՄ-ի սպախմալ հոսքերի հաշվարկի մաթեմատիկական մոդելն իրականացվում է անալոգային մասնագիտացված հաշվողական սարքի կիրառմամբ, իսկ զարգացող ԳՀՄ-ի զազամուղերի օպտիմալ տեխնիկական պարամետրերի հաշվարկի մաթեմատիկական մոդելը՝ միկրոէՀՄ-ի օգնությամբ:

Քերվում է Անդրկովկասի զազամուղին համարժեք պայմանական զազամուղային համակարգի օպտիմալ տեխնիկական և ռեժիմային պարամետրերի հաշվարկի սրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Трубопроводный транспорт газа / С. А. Бобровский, С. Г. Щербакоч, Е. Н. Яковлев и др.—М.: Наука, 1976.—495 с.
2. Методические указания по расчету оптимальных параметров разветвляемых газо-транспортных систем в условиях ресурсных ограничений / П. А. Матвеев, Ю. А. Орбелян, А. Г. Мациканян и др.—М. ВНИИЭгазпром, 1981.—84 г.
3. Пухов Г. Е., Кулик М. Н. Гибридное моделирование в энергетике. Киев. Наукова Думка, 1977.—150 с.
4. Хачатурян В. Г. Моделирование потребителей и источников газа в оптимизируемой аналоговой модели транспортной системы / ЕрИИ им. К. Маркса.—Ереван, 1984.—8 с.—Доп. в АрмНИИПИ 1985, № 34 Ар-85.
5. Хачатурян В. Г. Устройство для моделирования удельных затрат на транспорт газа / ЕрИИ им. К. Маркса.—Ереван, 1984.—7 с.—Доп. в АрмНИИПИ 1985, № 36—Ар 85.
6. Орбелян Ю. А. Построение технико-экономических характеристик участков газопровода.—М. ВНИИЭгазпром, 1983.—Вып. 4.—9 с.
7. Пухов Г. Е. Избранные вопросы теории математических машин.—Киев: Изд-во АН УССР, 1964.—264 с.

Изв. АН АрмССР, (сер. III), т. XLI, № 4, 1988

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Լ. Ա. ՄԱՆԱՅԱՆ

**НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМИ
СИСТЕМАМИ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

Управление территориальными системами газоснабжения (ТСГ) является сложной задачей, осуществляемой диспетчерскими службами. Сложность заключается в многомерности управляющих парамет-

ров, ясечткости целей и ограничений задач управления, имеющих, как правило, субъективный характер. Положение усложняется частичным или полным отсутствием необходимой информации или наличием информации с большой погрешностью. В настоящее время для решения задач в сложных системах развивается подход теории нечетких множеств [1]. В рамках этой теории предложен ряд новых, более простых и эффективных методов решения задач оптимизации [2—4].

В статье рассматривается одна из основных задач по управлению ТСГ, возникающих в периоды дефицита газа. Она может быть сформулирована следующим образом: требуется наилучшим образом распределить поступающее в систему количество газа для обеспечения потребностей и давлений газа в узлах системы.

Пусть $\mu_{ir}(Q_r)$, $\mu_{il}(P_l)$ — известные функции принадлежности r -го потребителя ($r = \overline{1, M}$) системы по объему газопотребления Q_r и l -го узла ($l = \overline{1, N}$) системы по давлению газа P_l ; M и N — соответственно количества потребителей и узлов системы. Обозначим: $x = (Q_1, \dots, Q_M, P_1, \dots, P_N)$. Тогда задача управления сводится к нахождению такого доступного вектора решений x , который максимизирует $\mu_D(x)$ [2]:

$$\max_x \mu_D(x), \quad (1)$$

где под $\mu_D(x)$ понимается либо алгебраическое произведение рассматриваемых функций принадлежности

$$\mu_D(x) = \prod_{r=1}^M (\mu_{ir}(Q_r))^{\alpha_r} \prod_{l=1}^N (\mu_{il}(P_l))^{\beta_l}, \quad (2)$$

либо их пересечение

$$\mu_D(x) = \bigwedge_{r=1}^M (\mu_{ir}(Q_r))^{\alpha_r} \bigwedge_{l=1}^N (\mu_{il}(P_l))^{\beta_l}, \quad (3)$$

где α_r ($r = \overline{1, M}$) и β_l ($l = \overline{1, N}$) — коэффициенты относительной влажности соответствующих переменных.

Допустимость вектора x определяется следующими условиями, наложенными на его координаты: заданными диапазонами потреблений газа

$$\underline{Q}_r \leq Q_r \leq \overline{Q}_r, \quad r = \overline{1, M} \quad (4)$$

и узловых давлений

$$\underline{P}_l \leq P_l \leq \overline{P}_l, \quad l = \overline{1, N}, \quad (5)$$

а также равенством между суммарным поступлением газа в систему и его потреблением

$$\sum_{r=1}^M Q_r \leq \sum_{l=1}^N Q_{il}. \quad (6)$$

где Q_{in} — объем поступающего газа из i -го источника системы; K — количество источников.

Задачу (1), (4) — (6) можно решить одним из известных методов оптимизации.

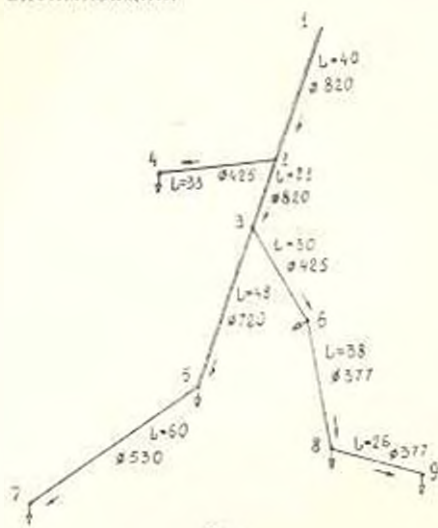


Рис.

Пример. Рассмотрим газотранспортную сеть, представленную на рисунке. Газ в систему поступает через узел 1 и транспортируется к потребителям, расположенным в узлах 4—9. Параметры газопроводных участков (длины L , км и диаметры $\varnothing$, мм) указаны на схеме. Кроме двух потребителей, расположенных в узлах 6 и 9, для которых объемы газопотреблений фиксированы и соответственно равны $42 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ и $21 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$, остальные потребители допускают варьирование объемов газопотреблений в диапазонах, описанных ниже. Функции принадлежности по

объемам газопотреблений были выбраны следующего вида:

$$f_1(z, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{если } z \leq a; \\ \frac{2(z-a)^2}{(b-a)^2}, & \text{если } a < z < \frac{a+b}{2}; \\ 1 - \frac{2(b-z)^2}{(b-a)^2}; & \text{если } \frac{a+b}{2} < z < b; \\ 1, & \text{если } z \leq b. \end{cases} \quad (7)$$

и по давлениям —

$$f_2(z, a, b, c) = \begin{cases} f_1(z, a, b), & \text{если } z < b; \\ 1, & \text{если } b \leq z \leq c; \\ 1 - f_1(z, c, c+b-a), & \text{если } z > c. \end{cases} \quad (8)$$

где под z принимаются текущие значения Q_i и P_i . Значения параметров a , b , c приведены в табл. 1. По объемам газопотреблений допустимым пределам $\underline{Q}_i$ и $\bar{Q}_i$ соответствуют a и b (столбцы 2, 3 табл. 1), а по давлениям газа пределам $\underline{P}_i$ и $\bar{P}_i$ — a и c (столбцы 4, 6 табл. 1). Объем поступающего газа в систему через узел 1 был принят равным $613 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ с давлением $3,09 \text{ МПа}$. Все коэффициенты важности α_r ($r = \overline{1, M}$) и β_l ($l = \overline{1, K}$) были приняты тождественно равными единице.

Минимизация (1) при условиях (4)–(6) была произведена по программе, осуществляющей метод покоординатного спуска. При этом поиск оптимального решения осуществляется по переменным, представляющим объемы газопотреблений в узлах 4, 5, 7, 8. Узловые давления газа определялись гидравлическим расчетом для каждой комбинации объемов газопотреблений. Были рассмотрены оба варианта целевой функции (2), (3). Результаты расчетов приведены в табл. 2, где целевой функции (2) соответствуют верхние строки, а (3)—нижние. Близость результатов свидетельствует о допустимости как (2), так и (3).

Таблица 1

Номер узла	По объемам газопотреблений, тыс. м ³ /ч		По давлениям газа, МПа		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
2	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—
4	83	125	0,2	0,61	1,01
5	250	370	0,4	0,81	1,21
6	—	—	—	—	—
7	33	42	0,15	0,3	0,61
8	17	21	—	—	—
9	—	—	0,15	0,4	0,61

Таблица 2

Номер узла	Объем газопотреблений тыс. м ³ /ч	Давление газа МПа
2	—	2,305
	—	2,309
3	—	1,975
	—	1,978
4	124,6	0,85
	122,5	0,945
5	362,5	0,802
	363,3	0,798
6	42	1,358
	42	1,362
7	41,3	0,548
	41,7	0,541
8	20,8	0,68
	20,8	0,686
9	21	0,476
	21	0,484

Коэффициенты важности отражают субъективные предпочтения диспетчерского персонала, которые могут меняться в зависимости от конкретной ситуации, поэтому в реальных условиях необходимо решение рассмотренной задачи осуществить человеко-машинной процедурой, при которой в зависимости от результатов расчетов корректируются значения этих коэффициентов.

ЕрПН ям. К. Маркса

2. VII. 1966

1. 2. ՀԱՅԱՍՏԱՆ

ԳԱՐԱՄԱՏԱԿԱԿՈՐԹՈՐԱԿԱՆ ՏԵՐԵՏԱՐԻԱԿ ՀԱՄԱԿԱՐԳՆԵՐԻ ԱԶ ՀՈՏԱԿ ՂԵԿԱՎԱՐՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Գրտարկվում է գաղի պակասության ժամանակամիջոցներում գազա-
պատման ծավալների և գաղի հանգույցային ճնշումների վերաբերյալ տրված
առ հատակ ինֆորմացիայի պայմաններում ակրիտորիալ գազամատակարար-
ման համակարգերի օպտիմալ ղեկավարման խնդիրը: Գրտարկվում է հաշ-
վարկային օրինակ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию при-
ближенных решений.—М.: Мир, 1976.—168 с.
2. Белляин Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы ава-
лиза и процедуры принятия решений.—М.: Мир, 1976.—С. 172—215.
3. Zimmerman H. J. Fuzzy programming and linear programming. With Several objec-
tive functions // Fuzzy Sets and Systems. — 1978. — V. 1. №1. — P. 45—56.
4. Пегойце К. Применение теории систем к проблемам управления.—М.: Мир, 1981—
180 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 4, 1988

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

С. Б. ОГАНДЖАНИАН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО СНАБЖЕНИЯ СЖИЖЕННЫМ ГАЗОМ

Наряду с развитием газотранспортных сетей, предназначенных
для транспортировки природного газа, в настоящее время осуществ-
ляется дальнейшее увеличение производства и потребления сжижен-
ного углеводородного газа. Сжиженный газ в коммунально-бытовом
хозяйстве используется главным образом в населенных пунктах, дале-
ко отстоящих от магистральных газопроводов, а также в районах, не
имеющих плотной и многоэтажной застройки [1]. Сырье из газового

или нефтяного месторождения поступает на нефтеперерабатывающий завод (НПЗ), который может находиться вне территории экономического района. Из НПЗ сжиженный газ транспортируется на газонаполнительные станции (ГНС), которые являются основными поставщиками сжиженного газа в экономическом районе. В свою очередь, доставка потребителям осуществляется либо через газонаполнительные пункты (ГНП), где происходит хранение сжиженного газа, наполнение баллонов и доставка наполненных баллонов потребителям, либо через промежуточный склад баллонов (ПСБ), где производится хранение и доставка наполненных баллонов потребителям. Возможен и комбинированный вариант снабжения потребителей сжиженным газом [1].

Настоящая работа посвящена разработке математической модели оптимального снабжения сжиженным газом в экономическом районе. Требуется определить: производственные мощности действующих, вновь строящихся или реконструируемых ГНС, ГНП и ПСБ; объемы транспортировки сжиженного газа по цепочке «ГНС—потребитель». В качестве критерия оптимальности принимается «минимум приведенных затрат» на развитие и эксплуатацию системы снабжения сжиженным газом.

Введем следующие индексы и обозначения для: n — НПЗ ($n = \overline{1, N}$); m — ГНС ($m = \overline{1, M}$); i — ГНП ($i = \overline{1, I}$); k — ПСБ ($k = \overline{1, K}$); j — потребителя ($j = \overline{1, J}$); Z — приведенные затраты на систему баллонного снабжения сжиженным газом экономического района; c^p — удельные затраты на транспортировку одной тонны сжиженного газа, p -ым видом транспорта на один километр; α, β — поправочные коэффициенты: соответствующий экономическому району и учитывающий сложность трассы экономического района; $L_{nm}, L_{mi}, L_{mk}, L_{mj}, L_{ik}, L_{ij}, L_{jk}$ — заданная матрица расстояний по цепочке „НПЗ—потребитель“; $x_{nm}, x_{mi}, x_{mk}, x_{mj}, x_{ik}, x_{ij}, x_{jk}$ — оптимизируемая величина транспортируемого объема сжиженного газа по цепочке „НПЗ—потребитель“; $K(X_n), K(X_i), K(X_k)$ — капиталовложения на строительство или реконструкцию ГНС, ГНП и ПСБ, зависящие от оптимизируемых мощностей; $\Theta(X_n), \Theta(X_i), \Theta(X_k)$ — соответствующие годовые эксплуатационные расходы; E_n — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Математическая модель оптимального снабжения сжиженным газом в экономическом районе включает целевую функцию

$$Z = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \alpha L_{nm} x_{nm} + \sum_{n=1}^N \alpha_1 [K(X_n) E_n + \Theta(X_n)] + \\ + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \beta_1 c^p L_{mi} x_{mi} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \beta_2 c^p L_{mj} x_{mj} + \sum_{i=1}^I \alpha_2 [K(X_i) E_i + \Theta(X_i)] +$$

$$+ \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \beta_{ij} c_{ij} l_{ij} x_{ij} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \beta_{mk} c_{mk} l_{mk} x_{mk} + \sum_{i=1}^K \alpha_i [K(X_i) E_K + \Theta(X_i)] + \\ + \sum_{i=1}^J \sum_{l=1}^L \beta_{il} c_{il} l_{il} x_{il} + \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \beta_{ij} c_{ij} l_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

и ограничения:

а) потребление сжиженного газа j -м потребителем—

$$\sum_{m=1}^M x_{mj} + \sum_{i=1}^K x_{ki} + \sum_{l=1}^L x_{li} = q_j \quad (j = \overline{1, J}); \quad (2)$$

б) поступления сжиженного газа в ГНС, ГНП и ПСБ—

$$X_m - \sum_{n=1}^N x_{nm} \geq 0; \quad X_i - \sum_{m=1}^M x_{mi} \geq 0;$$

$$X_k - \left(\sum_{m=1}^M x_{mk} + \sum_{l=1}^L x_{lk} \right) \geq 0 \quad (m = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, I}, \quad k = \overline{1, K}); \quad (3)$$

в) диапазоны типовых мощностей ГНС, ГНП и ПСБ—

$$X_m^{\min} \leq X_m \leq X_m^{\max}, \quad X_i^{\min} \leq X_i \leq X_i^{\max}; \quad X_k^{\min} \leq X_k \leq X_k^{\max}; \quad (4)$$

г) условие неотрицательности—

$$X_m, X_i, X_k, x_{nm}, x_{mi}, x_{mj}, x_{ij}, x_{mk}, x_{ik}, x_{kj} \geq 0. \quad (5)$$

Для реализации разработанной модели требуется иметь следующую исходную информацию: места расположения действующих ГНС, ГНП, ПСБ и их существующие производственные мощности; места возможного строительства новых ГНС, ГНП и ПСБ; существующие и предполагаемые новые трассы перевозок сжиженного газа по цепочке «ГНС—потребитель»; рекомендуемые виды транспорта газа; удельные затраты на транспортировку сжиженного газа; потребность в сжиженном газе газопотребителей.

Разработанная математическая модель отображает задачу частично-целочисленного линейного программирования и может быть приведена к виду

$$Z = \{c'x + f(v)\} \rightarrow \min \quad (6)$$

при ограничениях

$$Ax + F(v) \geq P, \quad x \geq 0, \quad v \in S, \quad (7)$$

где X — n -мерный вектор; A —постоянная матрица размерности $(m \times n)$; C — n -мерный вектор констант; $f(v)$ —функция p -мерного вектора; $F(v)$ —вектор функция; S —произвольная величина подмножества E^p [2].

Исходная математическая модель реализована применительно к снабжению сжиженным газом в Арм ССР.

ՀԵՂՈՒԿԱՑՎԱԾ ԴԱՋԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ՄԱՏՆԱԿԱՐԱՐՄԱՆ ՆԱԽԱԳԾՎՈՂ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՒԻՆԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Մշակված է մաթեմատիկական մոդել գաղաղցիչ կայանների և կենտրոնի հզորությունների օպտիմալ բաշխման համար, նվազագույն տրանսպորտային ծախսերի հաշվառմամբ:

Հարցի լուծման արդյունքով որոշվում է օպտիմալ տարրերակ սպառիչներին հեղուկացված գազով ապահովելու համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Берхман Е. И. Экономика систем газоснабжения.—Л.: Наука, 1975—253 с.
2. Ласдон Л. С. Оптимизация больших систем.—М.: Наука, 1977—431 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLII, № 4, 1988

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А. А. МАРКОВ, М. В. МАРКОСЯН, А. С. СЛЯДЯН, С. С. ТОРКОСЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Исследование многофазных систем массового обслуживания (СМО) по частям дает возможность намного сократить временные затраты формализованного представления модели СМО и получать выходные характеристики ее отдельных частей, представленных в виде узлов.

В данной статье приведены аналитические выражения для расчета начальных моментов функции распределения времени пребывания в выделенном участке многофазной СМО или во всей СМО, методика преобразований модели и краткое описание программных средств, позволяющих выделять части многофазной СМО, обобщать по отношению к ней входные потоки и получать выходные результаты.

Рассматривается система, имеющая m входов и n выходов. Сообщение, поступившее на вход, проходит некоторый маршрут, его обработка осуществляется узлами и носит случайный характер. Общее число узлов в системе — N . Считаем заданными функции распределения времени пребывания требования, вошедшего через i -й вход ($i = 1, \dots, m$) в j -м узле $F_{ij}(x) = P\{\text{время пребывания} \leq x\}$, т. е. требования, вошедшие через вход i , обладают одинаковыми вероятностными характеристиками E_i , и с вероятностью π_{ik} могут перейти в k -й узел ($k = 1, \dots, N$), причем, эта вероятность не зависит от предыдущего маршрута обработки. Кроме того, с вероятностью $\pi_{i,n+1}$ ($i = 1, \dots, m$) тре-

бование может покинуть систему через любой из I выходов. Очевидно, что $\sum_{k=1}^{N+n} \pi_{jk}^I = 1$, поскольку эти переходы образуют полную группу событий. Вероятности π_{jk}^I считаем заданными.

Определим время пребывания требования на маршруте $I \rightarrow J$, где I, J — номера входа и выхода, и будем считать, что I задан. Для сокращения записи далее верхний индекс и обозначения π_{jk}^I будем опускать. Присвоим рассматриваемому входу I номер 0 и расширим пространство состояний

$$\{0, 1, \dots, N, N+1, \dots, n+N\}.$$

Рассмотрим нулевую строку матрицы π . Элемент π_{0k} есть вероятность того, что в момент входа требование попадает в k -й узел ($k=1, \dots, N+n$). Начальным состоянием всегда является нулевое, а конечным — $N+J$ — вопрос связности этих состояний будем считать решенным.

Некоторую проблему представляет наличие состояний, соответствующих другим выходам. При определении времени пребывания на маршруте заранее считаем условие о выходе требования через J — выход выполненным. Следовательно, от безусловных вероятностей π_{ij} необходимо перейти к условным — $\pi_{ij}^* = P$:

$$\pi_{ij}^* = \begin{cases} 0, & \text{если } \{i \leq N \wedge j > N+1 \wedge j \neq J \wedge i \neq J\}, \\ \pi_{ij} / \left(1 - \sum_{l=N+1}^{N+n} \pi_{il}\right), & \text{если } \{i \leq N \wedge j \leq N\}, \\ 1, & \text{если } \{i = j \wedge i > N\}. \end{cases}$$

При таком определении из матрицы $\pi = [\pi_{ij}]_{i=0, N+1}^{N+n, N+1}$ вычеркнем строки, соответствующие выходам, с номерами, не равными J , и столбцы с соответствующими вероятностями перехода в состояние с номерами $N+1$ ($i \neq J, i=1, \dots, n$). Состоянию, соответствующему J выходу в матрице $\pi^* = [\pi_{ij}^*]$, присвоим номер $N+1$. В результате проведенных преобразований получаем квадратную матрицу π^* размером $(N+2) \times (N+2)$.

Распределение времени пребывания на маршруте $I \rightarrow J$ найдем с простейшего случая, когда оно в каждом блоке одинаково: $F_{I,J}(x) = F(x)$. Установим, что время, затраченное на переход за один шаг из одного состояния в другое, имеет распределение $F(x)$ и время, проведенное в системе за k шагов, задается распределением $F_{I,J}^{(k)}$. Тождественно положим: $f^{(0)}(x) = \delta_{0,1}^{(0)}$.

Введем в рассмотрение два вектора, имеющие $N+1$ составляющих: $r_0 = |1, 0 \dots 0|$; $r_{k+1}^T = |0, 0 \dots 1|$ (T обозначает операцию транспонирования). Нетрудно заметить, что закон распределения времени пребывания на участке $I \rightarrow J$ задается суммой

$$P\{x \leq \text{вр. преб.} \leq x + \Delta x\} = W\{x\} = \sum_{k=0}^{\infty} r_0 \pi^{*k} r_{N+1}^T f_{(k)}^{(x)} \quad (1)$$

Перейдем к преобразованию Лапласа $W(x)$:

$$\bar{W}(s) = \sum_{k=0}^{\infty} r_0 \pi^{*k} r_{N+1}^T \hat{f}_{(k)}^{(s)} \quad (2)$$

и окончательно получим

$$\bar{W}(s) = r_0 (E - \pi^* \hat{f}(s))^{-1} r_{N+1}^T, \quad (3)$$

где E — единичная, а $(E - \pi^* \hat{f}(s))^{-1}$ — обратная по отношению к $(E - \pi^* \hat{f}(s))$ матрицы.

Соотношение (3) использовано для вычисления моментов времени пребывания. Для первых двух моментов получаем

$$\bar{W}_1 = r_0 (E - \pi^*)^{-1} [(E - \pi^*)^{-1} M \pi^* + M] \pi r_n,$$

$$\bar{W}_2 = r_0 [2(E - \pi^*)^{-2} (M \pi^*)^2 + (E - \pi^*)^{-2} (E_2 \pi^* + 2M \pi^* M) + + (E - \pi^*)^{-1} E_2] \pi r_n.$$

Аналогично можно получить формулы для высших моментов. Рассмотрим случай различных $f_{(k)}(x)$. Предварительно определим класс рассматриваемых распределений, которые могут быть аппроксимированы взвешенной суммой эрланговских распределений

$$f_{(k)}(x) = \sum_{k=1}^M C_k \frac{\lambda_k (\lambda_k x)^{n_k-1}}{n_k!} e^{-\lambda_k x} \quad (\sum C_k = 1, C_k \geq 0, k = 1, M). \quad (4)$$

Форма записи (4) представляет собой обобщенный прибор, который может быть заменен последовательно-параллельными эрланговскими этапами [1] (рис. 1).

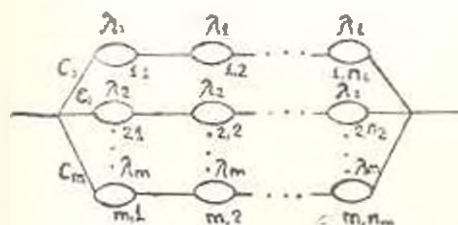


Рис. 1. Представление процесса массового обслуживания последовательно-параллельными эрланговскими этапами

Элементы $C_1, C_2, \dots, C_m$ в этом представлении трактуются как вероятности выбора соответствующей цепи, а этапы (i, k) ($i=1, M, k=1, n$) — дополнительные состояния. Введение последних увеличивает размерность решаемой задачи, но не сужает общность получен-

ных соотношений. Считаем, что матрица τ_1^* может быть расширена для введения дополнительных состояний. Таким образом, в каждый этап обработки можно, предварительно введя новое расширяемое пространство состояний, представить в виде связанной сети экспоненциальных этапов обслуживания. Единственным затруднением остается наличие различных значений интенсивностей в показательных законах распределения времени пребывания на этапе. Найдем закон с минимальной интенсивностью и обозначим ее λ без индексов. Покажем, что все остальные этапы могут быть выражены путем расширения пространства состояний через экспоненциальный закон с показателем λ . Действительно, справедливо соотношение

$$f(x, \lambda^*) = \lambda^* e^{-\lambda^* x} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n (e^{-\lambda^* x})^n, \quad C_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda^*}\right)^{n-1} \left(\frac{\lambda}{\lambda^*}\right). \quad (6)$$

Ограничиваясь $M\lambda$ членами ряда и пересчитывая коэффициенты

$$C_n^* = \frac{C_n (1 - \lambda/\lambda^*)}{(\lambda/\lambda^*)^{M+1}}, \quad (7)$$

приблизительно получим

$$f(x, \lambda^*) \approx \sum_{n=1}^M C_n^* (\lambda e^{-\lambda x})^n.$$

Последнее распределение относится к классу (4) и расширение пространства состояний происходит в виде, представленном на рис. 2 аналогичными методами. Оно эквивалентно следующему представлению этапа с интенсивностью λ^* (рис. 3). Такой переход можно осуществить без дальнейшего решения пространства состояний, путем введения дополнительных переходов.

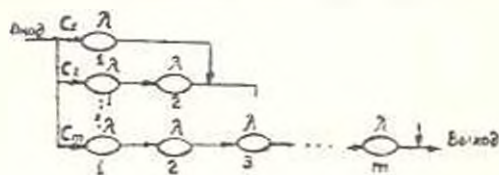


Рис. 2. Представление расширенного пространства состояний.

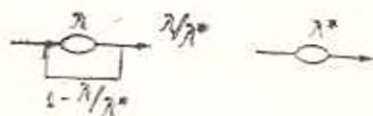


Рис. 3. Эквивалентное преобразование.

С помощью созданных программных средств определяются состояния, входящие в маршрут $I-J$, выбрасываются состояния пустых блоков, если они есть, и составляется матрица вероятностей переходов этого маршрута с учетом условных вероятностей. Далее вероятности переходов уточняются с учетом интенсивностей обслуживания блоков. Программа вычисляет общую загрузку системы, первые два момента времени пребывания и времени обслуживания по требованию пользователя и позволяет увеличить возможности оценки исследуемых систем.

**ՔԱՋՄԵԿՓՈՒԼ ԶԱՆԳՎԱԾԱՅԻՆ ՍՊԱՍԱՐԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ԸՆԴՀԱՆՐԱՅՎԱԾ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Ա Մ Ի Ռ Վ Ի Ո Ւ Մ

Առաջարկվում է առանձին բլոկների ժամանակային բնութագրերի կամայական բաշխման միջամիջուրում դանդաժային սպասարկման բազմափուլ համակարգի հետաքրքրող կառուցվածքի քնդհանրացված բնութագրերի ստացման մեթոդիկա: Բերված են առանձնացված տեղամասում կամ ամբողջ կառուցվածքում չափի գոտիներու մասանակի բաշխման ֆունկցիայի սկզբնական մոմենտների հաշվառման համար ստացված վերլուծական արտահայտությունները: Բերված է այդ մեթոդիկան իրականացնող ծրագրի համառոտ նկարագրությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания.—М.: Машиностроение, 1979.—100 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТИ), т. XLI, № 4, 1988

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Г. У. ТЕМ, Б. Н. ТЕՒ

**О ВЛИЯНИИ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ
ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ АДММ**

Факторы условий окружающей эксплуатационной среды, воздействующих при реальной работе трехфазных асинхронных двигателей малой мощности (АДММ), оказывают значительное влияние на срок службы и показатели надежности их подшипниковых узлов (ПУ). Однако расчеты надежности ПУ этих машин, производимые по существующим моделям надежности, ввиду неполноты в них влияющих на вероятность безотказной работы (ВБР) параметров-критериев воздействия эксплуатационных условий не дают достаточно достоверных результатов, приемлемых для общей оценки количественных показателей надежности (КНН) машин.

Анализ опыта эксплуатации АДММ показывает, что эксплуатационные условия определяются в основном воздействием механических и климатических факторов внешней среды. Вибрационные нагрузки, многократные и одиночные удары, содержащиеся в ГОСТ 17516-72, определяют параметры воздействия механических факторов внешней эксплуатационной среды. Их влияние на надежность ПУ электриче-

ских машин выражено коэффициентом динамического перегрузения K_d , действие которого учтено при расчете приведенной эквивалентной нагрузки [1]

$$Q_{\text{пр}}^{\text{экв}} = (KK_d + m\lambda) K_0 K_1,$$

входящей в формулу расчетной долговечности [2]:

$$k = \frac{1}{n} \left(\frac{C}{Q_{\text{пр}}^{\text{экв}}} \right)^{3.33},$$

а расчетная долговечность является основой существующей модели ВБР подшипниковых узлов машин [1, 2]:

$$P_{\text{ну}}(t) = \exp \left[- \left(\frac{h}{6.64 t} \right)^{1.17} \right].$$

Данная расчетная модель не учитывает влияния воздействующих климатических факторов внешней среды на КПП ПУ машин. По данным обследования эксплуатационных условий АДМ общепромышленного назначения из параметров-критериев воздействия климатических факторов внешней среды, представленных ГОСТ 15543-73, как наиболее значимые, следует выделить влажность, тепловое состояние, запыленность и химическое загрязнение эксплуатационной среды. По перечисленным факторам путем их количественной оценки в зависимости от степени воздействия можно классифицировать условия эксплуатации АДМ на четыре категории: легкую, нормальную, жесткую и особо жесткую. При легких условиях эксплуатации один или несколько факторов отклоняются от номинальных значений в сторону их облегчения. Нормальные условия означают, что все воздействующие факторы имеют номинальные значения, на которые и рассчитывается при проектировании электродвигатель общепромышленного назначения. Жесткими считаются условия, при действии которых один из факторов превышает номинальные значения, оказывая значительное влияние на долговечность и надежную работу механизма. При особо жестких условиях эксплуатации два или более факторов из-за чрезмерно высокого отклонения от номинального уровня весьма ощутимо оказывают влияние на КПП механизма.

Изменение надежности подшипниковых узлов машин во времени, как известно [2], относят к распределению Вейбулла

$$P(t) = \exp(-\lambda t^a),$$

где λ — интенсивность отказов; t — наработка, на которую рассчитывается КПП, а a — параметр асимметрии распределения.

С учетом изношенных отказов, присущих в большинстве случаев ПУ АДМ [2], параметр a оказывается весьма близким единице. Тогда распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное

$$P(t) = \exp(-\lambda t) \quad \text{или} \quad P(t) = \exp\left(-\frac{1}{T_{\text{ср}}} t\right), \quad (1)$$

где $T_{cp} = \frac{1}{\lambda}$ — средняя наработка на отказ.

Если среднюю наработку на отказ ПУ АДММ, работающих соответственно в легких и жестких условиях эксплуатации, обозначить через T_1 и T_2 , то согласно [3] между ними устанавливается линейная зависимость

$$T_2 = K T_1, \quad (2)$$

где K — коэффициент, учитывающий влияние воздействующего фактора эксплуатационных условий.

Используя зависимости (1) — (2), после несложных преобразований получаем

$$T_2 = - \left| \frac{t}{\ln P_1(t)} \right| K \quad (3)$$

и соответственно

$$P_2(t) = P_1(t)^{\frac{1}{K}}. \quad (4)$$

Учитывая, что описанные выше климатические факторы могут воздействовать независимо друг от друга, модель расчета надежности подшипниковых узлов АДММ выразится формулой

$$P_{\Sigma}(t) = P_1(t)^{\frac{1}{K_1}} P_2(t)^{\frac{1}{K_2}} P_3(t)^{\frac{1}{K_3}} P_4(t)^{\frac{1}{K_4}}, \quad (5)$$

окончательный вид которой

$$P_{\Sigma}(t) = \exp \left[- \left(\frac{h}{6,84t} \right)^{1,17} \sum_{i=1}^4 \frac{1}{K_i} \right] \quad (6)$$

становится приемлемым для получения достоверных результатов расчета КРН подшипниковых узлов АДММ. Численные значения коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 и K_4 определяют методом «пассивных» экспериментов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Опоры осей и валов машин и приборов / И. А. Спичин, М. М. Машнев, А. С. Саверский и др. — Л.: Машиностроение, 1970 — 519 с.
2. Ермолин Н. П., Жерихин Н. П. Надежность электрических машин — Л.: Энергия, 1976. — 248 с.
3. Гербуз В. Н. Математические модели ускоренных испытаний на надежность и долговечность изделий // Стандарты и качество. — 1967. — № 3 — С. 29—33.

А. С. ПОГОСЯН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕПНОГО МЕХАНИЗМА
ШАГОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Из-за простоты конструкции и широких кинематических возможностей в последние годы для реализации одностороннего прерывистого движения в машинах-автоматах часто применяются цепные механизмы [1, 2]. Ниже приводится кинематический анализ и синтез нового цепного механизма шагового перемещения (рис. 1). Он состоит из установленного на каретке 6 входного водила 1 с двумя симметрично расположенными идентичными сателлитами-звездочками 3, 3', неподвижной относительно каретки центральной звездочкой 2, незамкнутой цепи 5 и двух направляющих звездочек 4, 4', установленных на каретке.

Механизм работает следующим образом. Непрерывно вращаясь, входное водило 1 посредством сателлита 3 последовательно выводит звенья цепи 5 из зацепления с центральной звездочкой 2. При этом каретка 6 получает принудительное движение, начиная с I положения водила. Движение каретки продолжается до того момента, когда выведенная из зацепления ветвь цепи вновь входит в зацепление с центральной звездочкой 2 (положение II). При дальнейшем повороте водила до момента, когда сателлит 3' займет положение I, каретка остается неподвижной. Сателлиты 3 и 3' не только обеспечивают два шага каретки за один оборот водила, но и натяжение цепи 5. Когда каретка перемещается с одного конца на другой, автоматически меняется направление вращения водила.

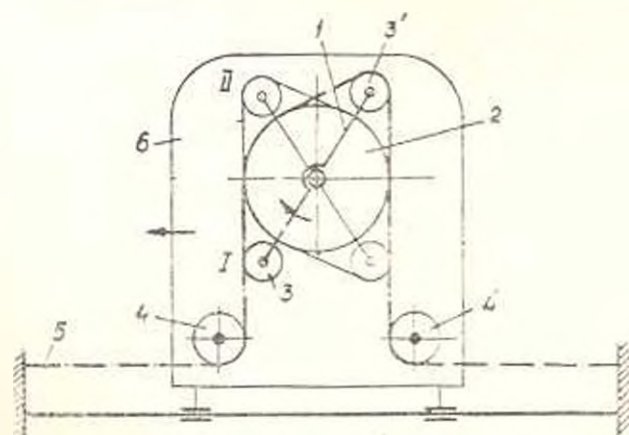


Рис. 1.

Кинематический анализ механизма. На рис. 2 изображена схема исследуемого механизма в начальном (I), текущем и конечном (II) положениях входного вала 1. Из рис. 2 следует

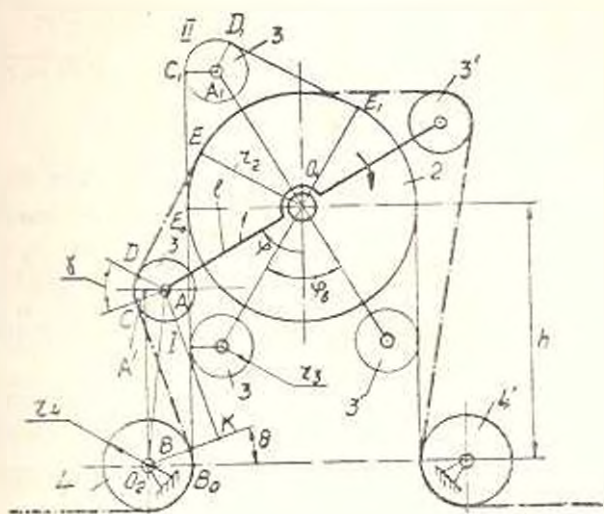


Рис. 2.

$$S = BC + \widetilde{CD} + DE + \widetilde{B_0B} - h - \widetilde{E_0E}, \quad (1)$$

где S —текущее значение перемещения каретки.

Выразим все переменные параметры, входящие в (1), через обобщенную координату φ (угол поворота входного вала):

$$\varphi_n/2 \leq \varphi < \pi - \varphi_n/2,$$

где φ_n —угол выстоя.

Из прямоугольных треугольников O_2KA и O_2AA_0 имеем

$$BC = l \sqrt{[l \sin \varphi - (r_2 - r_1)]^2 + (h - l \cos \varphi)^2 - (r_2 + r_1)^2}.$$

Длина дуги CD равна $\widetilde{CD} = r_3 \gamma$, где $\gamma = \varphi - \varphi_n/2 + b$.

$$\theta = \arctg \frac{l \sin \varphi - (r_2 - r_1)}{h - l \cos \varphi} = \arctg \frac{r_1 - r_2}{BC}.$$

Длины дуг $\widetilde{BB_0}$, $\widetilde{EE_0}$ и отрезка DE соответственно равны:

$$\widetilde{BB_0} = r_2 \theta, \quad \widetilde{EE_0} = r_2 (\varphi - \varphi_n/2), \quad DE = \sqrt{l^2 - (r_2 - r_1)^2}.$$

Подставляя полученные выражения в (1), получаем функцию перемещения $S = S(\varphi)$

$$S = a - r_1 \varphi + r_{21} \arctg \frac{r_{21}}{a} + \arctg \frac{l \sin \varphi - r_{21}}{h - l \cos \varphi} + A, \quad (2)$$

Дифференцируя функцию (2) по обобщенной координате, получаем функции аналогов скорости V и ускорения a каретки

$$V = \frac{l}{\delta^2} [ac + r_{21}(d - l) - r_{21}], \quad (3)$$

$$a_c = \frac{l}{b^2} \left\{ ad + \frac{lc^2}{a} - r_{34}c - \frac{2lc}{b^2} [ac - r_{34}(d-l)] \right\}. \quad (4)$$

В формулах (2)–(4) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} r_{23} &= r_2 - r_3; & r_{31} &= r_3 + r_4; & r_{21} &= r_2 + r_4; \\ A &= \sqrt{l^2 - r_{21}^2 + r_{23}^2} - 2 - h; & a &= BC = \sqrt{b^2 - r_{21}^2}; \\ b^2 &= (l \sin \varphi - r_{21})^2 + (h - l \cos \varphi)^2; \\ c &= h \sin \varphi - r_1 \cos \varphi; & d &= h \cos \varphi + r_1 \sin \varphi. \end{aligned}$$

Пример. Определить кинематические параметры выходного звена рассматриваемого механизма S , V , a , с размерами: $r_1 = 1$, $r_3 = 0,23$, $l = 1,48$, $h = 5$, обеспечивающего угол выстоя $\varphi_n = 60^\circ$. По результатам проведенных расчетов построены графики изменения вышеуказанных параметров (рис. 3).

Синтез механизма. Задача синтеза рассматриваемого механизма состоит в определении его размеров при заданных значениях угла выстоя φ , и хода каретки H . Величина хода каретки H определяется по выражению, следующему из рис. 2:

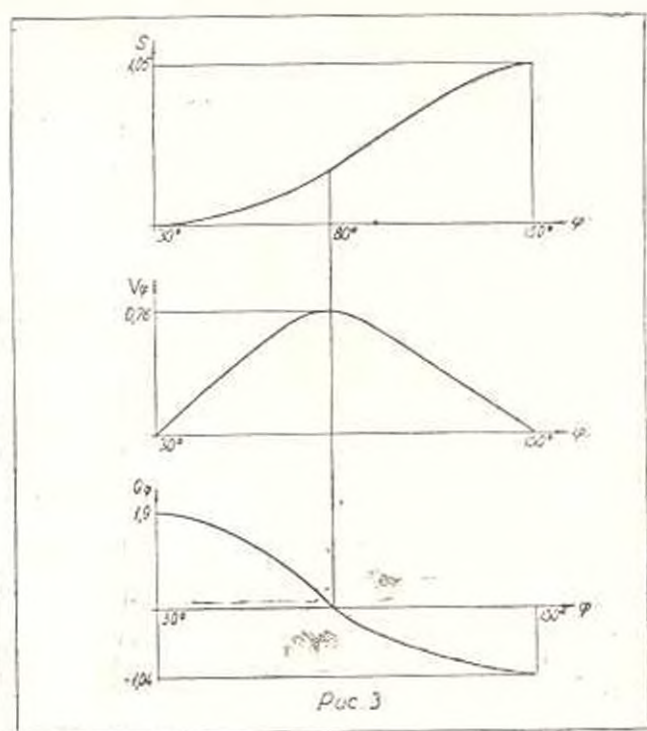


Рис. 3

$$H = E_0 C_1 + C_1 D_1 + D_1 E_1 - E_0 E_1, \quad (5)$$

где

$$E_0 C_1 = D_1 E_1 = (r_2 - r_1) \lg(-2 - \varphi_n/2);$$

$$\widetilde{C_1 D_1} = (\pi - \varphi_0) r_2, \quad \widetilde{E_0 E_1} = (\pi - \varphi_0) r_2. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем

$$H = 2(r_2 - r_3) \operatorname{inv}(\pi/2 - \varphi_0/2),$$

откуда

$$r_2 = r_3 + \frac{H}{2 \operatorname{inv}(\pi/2 - \varphi_0/2)}. \quad (7)$$

Из рис. 2 следует также

$$l = (r_2 - r_3) \cos(\pi/2 - \varphi_0/2). \quad (8)$$

Выбрав радиус r_2 (по числу зубьев звездочки 2 и шагу цепи), с помощью (7) и (8) для заданных φ_0 и H можно определить радиус делительной окружности r_3 звездочки 3 и длину l водила. Если длина l водила меньше суммы радиусов R_2 и R_3 окружностей головок зубьев звездочек 2 и 3, то необходимо выбрать двухрядную цепь.

Угол выстоя рассматриваемого механизма изменяется в пределах $0 < \varphi_0 < \pi$, причем, если $r_3 = r_2$, то $\varphi_0 = 0$ (механизм мгновенного выстоя). При этом выбором длины водила можно обеспечить любой ход H выходного звена ($l = H/2$, рис. 2). При $l = r_2 - r_3$, $\varphi_0 = \pi$ и $H = 0$.

По описанной методике разработан цепной механизм шагового перемещения, который был внедрен в ВНИРИ в механическом сканере для прерывистой подачи горизонтальной каретки.

10. IX. 1986

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаронян Г. Т., Аракелян А. С. Кинематический анализ и синтез регулируемого цепного механизма с выстоем // Изв. вузов. Машиностроение.—1984.—№ 8.—С. 44—47.
2. Азаронян Г. Т. Синтез планетарно-цепных механизмов шагового перемещения // Изв. вузов. Машиностроение.—1985.—№ 9.—С. 27—30.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XVI, № 4, 1988

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Г. Г. ШЕКЯЦ, Э. П. ХАЛЯТЯН

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИИ И ШУМА РОТОРНЫХ МАШИН ПУТЕМ ИСКЛЮЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ЛИНЕЙНО-ПОДАТЛИВЫХ ОПОР

В роторных машинах величина динамических реакций опор, обуславливающая уровень шума и вибрации машины, в значительной степени зависит от жесткостных характеристик системы. Пусть не-

уравновешенный ротор с массой m вращается на податливых опорах (рис. 1). Для определения добавочных динамических усилий, возникающих между ротором и опорами, отбросим ротор, заменив его действие на опоры искомыми реакциями. Дифференциальные уравнения для подшипниковых опор (левой и правой) имеют следующий вид [1]:

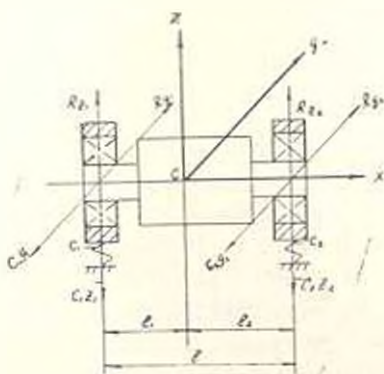


Рис. 1.

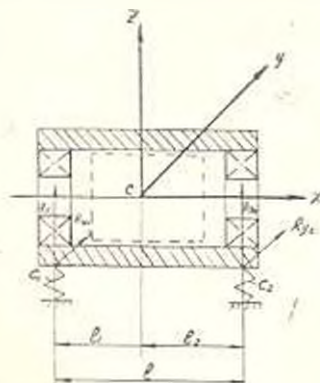


Рис. 2.

$$m_1 \ddot{Y}_1 = -C_1 Y_1 + R_{Y1}; \quad m_1 \ddot{Z}_1 = -C_1 Z_1 + R_{Z1}; \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{Y}_2 = -C_2 Y_2 + R_{Y2}; \quad m_2 \ddot{Z}_2 = -C_2 Z_2 + R_{Z2}, \quad (2)$$

где m_1, m_2 — доли массы ротора, приходящиеся на левую и правую опоры; Y_1, Z_1, Y_2, Z_2 — координаты центра подшипников; C_1, C_2 — жесткости опор; $R_{Y1}, R_{Z1}, R_{Y2}, R_{Z2}$ — проекции искоемых реакций.

Из решения (1) и (2) амплитудные значения реакции опор будут [2]:

$$R_{Y1} = R_{Z1} = C_1 - m_1 \omega^2; \quad R_{Y2} = R_{Z2} = C_2 - m_2 \omega^2. \quad (3)$$

Из этих уравнений следует, что если между массами подшипников, жесткостями опор и рабочей частотой вращений ω будут существовать зависимости

$$m_1 = C_1 / \omega^2, \quad m_2 = C_2 / \omega^2, \quad (4)$$

то радиальные усилия между ротором и подшипниками будут равны нулю при наличии статической и динамической неуравновешенностей. Следовательно, во всех случаях, когда рабочая частота вращения ротора является величиной постоянной или меняется в известных и ограниченных пределах, можно подобрать массу опоры и коэффициент жесткости опорой так, чтобы при заданной скорости усилия между ротором и опорой обращались в нуль, тогда из решения (1), (2) амплитуда колебаний будет иметь минимальное значение.

Рассмотрим случай, когда оба подшипника запрессованы в общей втулке (рис. 2). Отбросим ротор, заменив его действие на втулку искомыми радиально направленными реакциями.

Составим дифференциальные уравнения движения втулки согласно теореме о движении центра инерции системы материальных точек

и теореме об изменении главного момента количества движения материальных точек в относительном движении по отношению к центру инерции системы [3]

$$M\ddot{y}_c = F_Y, \quad M\ddot{z}_c = F_Z, \quad J_2\ddot{\varphi}_Z = L_Z, \quad J_1\ddot{\varphi}_Y = L_Y, \quad (5)$$

где M — масса втулки с подшипниками; J_Y, J_Z — моменты инерции втулки; φ_Y, φ_Z — углы поворота втулки вокруг осей Y и Z ; F_Y, F_Z — проекции главного вектора внешних сил; L_Y, L_Z — главные моменты сил относительно осей:

$$\begin{aligned} F_Y &= -C_1 Y_1 - C_2 Y_2 + R_{Y_1} + R_{Y_2}; \quad F_Z = -C_1 Z_1 - C_2 Z_2 + R_{Z_1} + R_{Z_2}; \\ L_Y &= R_{Z_1} l_1 + R_{Z_2} l_2 + C_1 Z_1 l_1 - C_2 Z_2 l_2; \\ L_Z &= R_{Y_1} l_1 + R_{Y_2} l_2 + C_1 Y_1 l_1 - C_2 Y_2 l_2, \end{aligned} \quad (6)$$

где l_1, l_2 — расстояния от центра инерции втулки до левой и правой опоры; l — расстояние между опорами.

Из решения системы (5) с учетом (6) относительно неизвестных R_{Y_i}, R_{Z_i} находим

$$[C_1 l^2 - M\omega^2 l_2^2 - J_2 \omega^2] r_1 \cos(\omega t - \alpha_1) + [J_2 \omega^2 - M\omega^2 l_1 l_2] r \cos(\omega t - \alpha_2) = R_{Y_1} l^2, \quad (7)$$

$$[J_2 \omega^2 - M\omega^2 l_2 l_1] r_1 \cos(\omega t - \alpha_1) + [C_2 l^2 - M\omega^2 l_1^2 - J_2 \omega^2] r_2 \cos(\omega t - \alpha_2) = R_{Y_2} l^2,$$

где z_1, z_2 — постоянные интегрирования; α_1, α_2 — фазовые углы.

Отсюда следует, что R_{Y_1} и R_{Y_2} обращаются в нуль, если удовлетворяются следующие равенства:

$$J_2 \omega^2 - M\omega^2 l_1 l_2 = 0; \quad (8)$$

$$C_1 l^2 - M\omega^2 l_1^2 - J_2 \omega^2 = 0; \quad C_2 l^2 - M\omega^2 l_2^2 - J_2 \omega^2 = 0.$$

Решая совместно эти уравнения, находим условия, при соблюдении которых обе реакции между ротором и опорами при наличии статической и динамической неуравновешенностей обращаются в нуль:

$$C_1/C_2 = l_2/l_1; \quad M = (C_1 + C_2) \omega^2; \quad J_2 = J_Y = (C_1 + C_2) l_1 l_2 / \omega^2. \quad (9)$$

Выбирая массу втулки и ее момент инерции в соответствии с (9), а также удовлетворив первому равенству данной системы, получаем условие отсутствия динамических реакции опор, что приводит к максимальному снижению уровня вибрации и шума подшипниковых узлов качения [4].

1. Кельзон А. С. Самоцентрирование и уравновешивание высокооборотного компрессора // Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение.—1963—№ 3.—С. 51—57.
2. Ильинский В. С. Защита аппаратов от динамических воздействий.— М.: Энергия, 1970.—320 с.
3. Кельзон А. С. Динамика роторов в упругих опорах.—М.: Наука, 1982.—279 с.
4. Шубов Н. Г. Шум и вибрация электрических машин.—Л.: Энергоатомиздат, 1986.—205 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLI, № 1, 1988

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

В. Л. МИНАСЯН

СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТИРИСТОРНЫХ МОДУЛЕЙ

Предназначен для экспериментального исследования переходных процессов переключения в высоковольтных тиристорных модулях [1, 2], состоящих из групп тириستоров, защищенных демпфирующими RC-цепями и насыщающимися реакторами. Он может быть использован также для исследования переходных процессов и в одиночных силовых полупроводниковых вентилеях (управляемых или неуправляемых) при их работе в комплекте с отмеченными защитными элементами или без них. Разработанный испытательный стенд допускает:

1. Реализацию обоих возможных коммутационных режимов работы тиристора—принудительного и естественного, а также возможность имитации нагрева силовых вентилей в схеме реального преобразователя.

2. Оперативное изменение структуры исследуемого тиристорного модуля, практически независимо от его конфигурации.

3. Возможность достаточно широкого варьирования электрическими параметрами: амплитудой I_{max} импульса прямого тока через прибор; длительностью T_1 и формой этого импульса; скоростью di/dt нарастания и спада тока; амплитудой U_{max} прямого и U_{mo} обратного напряжений на тиристорах и т. д.

Исходя из реально возможных условий работы силовых вентилей, стенд обеспечивает следующие значения электрических и временных параметров: $I_{max} < 3$ кА; $U_{max} = U_{mo} < 2$ кВ; $T_1 = 100 - 400$ мкс; $di/dt \leq 500$ А/мкс.

Блок—схема стенда показана на рис. 1, где исследуемый модуль ТМ для упрощения рисунка представлен в виде тиристора Т1, коммутирующий модуль КМ—тиристора Т2, ЦВ—цифровой вольтметр, а

L_1, C_1 и L_2, C_2 цепочки предназначены для формирования импульсов тока, соответствующих исследуемому режиму. Заряд конденсаторов C_1 и C_2 до необходимых уровней напряжения U_{01} и U_{02} производится высоковольтными блоками ВВБ1 и ВВБ2, собранными по мостовой схеме.

Система управления СУ предназначена для подачи сигналов как на КМ и ТМ, так и на соответствующий вход запоминающего осциллографа 30 в следующей последовательности: импульс 1 осуществляет запуск 30, импульс 2 — включение ТМ в момент t_1 , а импульс 3 — включение КМ в момент t_2 . При этом принято, что $t_1 = 10$ мкс, а момент подачи импульса 3 может варьироваться в пределах 50—200 мкс.

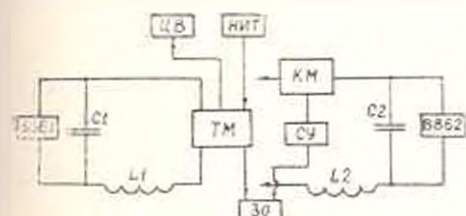


Рис. 1.

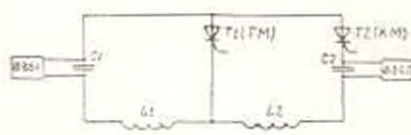


Рис. 2.

Имитация нагрева тиристоров производится с помощью низковольтного источника питания ИИТ, а температура измеряется дифференциальной термопарой хромель-копель в сочетании с цифровым вольтметром Ш68000.

Эквивалентная схема контура формирования импульсов с крутым задним фронтом (КЗФ) после отпирания тиристора Т2 (коммутирующего модуля КМ) в момент t_2 показана на рис. 2. Формирование импульса КЗФ, спадающего по близкому к линейному закону, является результатом взаимодействия левого (L_1, C_1) и правого (L_2, C_2) контуров, в которых осуществляется периодический разряд конденсаторов C_1 и C_2 , предварительно заряженных до уровней напряжения U_{01} и U_{02} , соответственно на индуктивности L_1 и L_2 , а также на собственные сопротивления r_1 и r_2 контуров. С момента t_2 (рис. 3) отпирания КМ через ТМ проходит ток $i = i_1 - i_2$, аппроксимирующий линейно спадающий ток $I = -kt^* + b$, где $b \approx I_{m1}$ — начальное значение тока I , $t^* = t - t_2$, $k = df/dt$.

Для обеспечения заданных I_{m1} , T_2 и df/dt необходимо иметь значения $L_1, L_2, C_1, C_2, U_{01}, U_{02}$, расчет которых производится по известным выражениям [3]:

$$L_{1,2} = r_{1,2}^2 / 2\delta_{1,2}, \quad C_{1,2} = 1 / (L_{1,2}(\delta_{1,2}^2 + \omega_{1,2}^2)), \quad U_{01,02} = I_{m1,02} \omega_{1,2} L_{1,2},$$

где δ_1, δ_2 — коэффициенты затухания, а ω_1, ω_2 — собственные частоты левого и правого колебательных контуров (рис. 2).

Для определения неизвестных величин разработана специальная методика, по которой получены следующие выражения:

$$\delta_1 = \frac{1}{L_1} \ln 2 \cos(\varphi_0 - \varphi_1), \quad \delta_2 = -\frac{1}{L_2} \ln \frac{\cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{\cos \varphi},$$

Наибольшая относительная погрешность δ_i аппроксимации тока / током i связана с базовым параметром аппроксимации q следующим выражением:

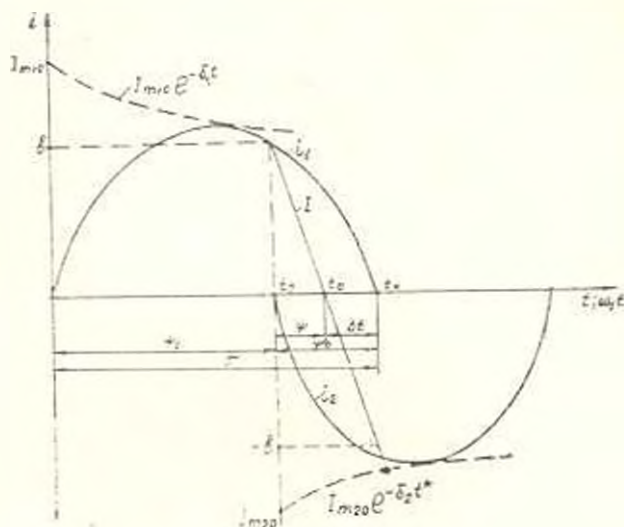


Рис. 3.

$$(\delta_k - 1) \cos \psi = \cos (3\psi - 2\psi_T). \quad (1)$$

Решение соотношения (1) можно свести к решению квадратного уравнения вида

$$A\psi^2 + B\psi + C = 0, \quad (2)$$

где $A = 8 + \varepsilon_1$, $B = 12\varepsilon_1$, $C = 2\varepsilon_1 - 4\varepsilon_2$.

Задаваясь величиной погрешности δk , по уравнению (2) можно определить значения q , соответствующие приемлемым энергетическим и схемным параметрам стенда. Для схемы вырабатывания импульса тока с крутым передним фронтом (КПФ), согласно разработанной методике получено

$$\beta_1 = \frac{1}{t_1} \ln 2 \cos \omega_3 \Delta t, \quad \beta_2 = \frac{1}{\Delta t} (t_1 t_2 - \ln 2), \quad I_{m10} = qb, 2\pi, \quad I_{m20} = \frac{1}{2} I_{m10}.$$

где $t_3 = \Delta t + t_2$, $\omega_3 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}$.

Расчет параметров колебательного контура, предназначенного для получения синусоидального импульса тока $i = I_{mo} e^{-\lambda t} \sin \omega t$ через испытуемый модуль ТМ (режим естественной коммутации), производится по соотношениям: $I_{mo} = k \omega$; $\lambda = -\frac{4}{T} \ln \frac{\omega / m_1}{k}$, где $T = 2\pi \omega$, $k = -di/dt$, а первая амплитуда $I_{mo} = I_{\text{эмп}}$ тока i является заданной.

Высоковольтные тиристорные модули различной структуры и конфигурации находят все более широкое применение в мощных высокочастотных преобразователях электрической энергии. В связи с этим рассмотренный испытательный стенд в сочетании с разработанным методом расчета, допускающим обоснованный выбор номиналов и электрических параметров стенда при различных формах тока через исследуемый модуль, позволяет сократить сроки и стоимость проектирования и экспериментальной доработки готовых образцов преобразователей различного назначения.

ЕрIII им. К. Маркса

29. I. 1986

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Минасян В. Л. Цифровое моделирование переходных процессов и подтемах «тиристор-защитная цепь» // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.—1980.—Т. XXXIII, № 1.—С. 13—20.
2. Мустафа Г. М., Минасян В. Л., Рудыцкий Р. Ш. Моделирование тиристора и наемшающихся реакторов при анализе процессов переключения // Электротехника—1982.—№ 10.—С. 40—43.
3. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники: Ч. 1.—М.: Энергия, 1970.—592 с.

Изв. АН АрмССР (сер. ТН), т. XLI, № 4, 1986

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

С. О. МКРТЧЯН, С. Ж. ЕСЯН, М. Г. АБГАРЯН

КИНЕТИКА ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЕ СИСТЕМЫ НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЙ

Двухкомпонентные металлические системы широко применяются в микроэлектронике, например, в качестве многослойной металлизации микросварных соединений и т. д.

Для исследования кинетики фазообразования в диффузионной зоне никель-алюминий были изготовлены биметаллические образцы путем последовательного напыления на подложку пленок никеля и алюминия, толщина которых составляет около 7 мкм. Пленки были получены электронно-лучевым методом на установке марки УВН—82П-1. Отжиг образцов проводился на воздухе, в печи, обеспечивающей диапазон температур 50—900°C. На полученных биметаллических образцах были выполнены шлифы поперек зоны контакта. Исследование шлифов с целью определения размера и состава выросших фаз в диффузионной зоне проводилась на металлографическом микроскопе ММУ-3 и рентгеновском микроанализаторе JXA-4. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Отсутствие фазы NiAl, по-видимому, может быть обусловлено малой областью гомогенности фазы на диаграмме состояний и низкой вели-

чиной коэффициента взаимной диффузии в данной фазе. Подобный выбор режимов отжига обеспечивает адекватность режимов изготовления, где $T_1=350^\circ\text{C}$ —температура микросварки, а $T_2=125^\circ\text{C}$ —температура испытания и эксплуатации реальных приборов.

Таблица

Температура отжига, $^\circ\text{C}$	Время отжига, ч	Фазы в диффузионной зоне	Толщина фазы, мм
350	60	Ni_2Al_3	1,3
		NiAl	1,5
		Ni_3Al	0,7
125	500	Ni_3Al_2	0,7
		NiAl	1
		Ni_3Al	0,6

Эффективный коэффициент диффузии в фазе, образующейся в диффузионной зоне, описывается формулой [1]

$$D_i = \frac{1}{2t} \frac{\Delta x_i}{\Delta C^{(i)}} \sum_{j=1}^N z_{ij} \Delta x_j \quad (1)$$

где z_{ij} — коэффициент, определяющийся составом исходных образцов C , C^* , образующих диффузионную пару, граничными концентрациями фаз на равновесной диаграмме состояний ($C^{(1)}$, $C^{(2)}$, ..., $C^{(N)}$):

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{4} (C^{(i)}(1 - C^{(j)}) + C^{(j)}(1 - C^{(i)}) + 2C^{(j)}(1 - C^{(i)})) & \text{при } i = j, \\ C_{cp}^{(i)}(1 - C_{cp}^{(j)}) & i < j, \\ C_{cp}^{(j)}(1 - C_{cp}^{(i)}) & i > j; \end{cases}$$

Δx_i , Δx_j — увеличение ширины фаз i , j после изотермического отжига, см; t — время отжига, с; $\Delta C^{(i)} = \frac{C^{(i)} - C^{(i*)}}{C^* - C}$ — приведенная концентрация.

В случае взаимодействия в исходном состоянии чистых металлов: $C = 0$; $C^* = 1$; $\Delta C^{(i)} = 1 - C^{(i)}$.

Когда в диффузионной зоне образуются три фазы, формула (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{\Delta x_1}{2t} \frac{1}{\Delta C^{(1)}} (\Delta x_2 z_{12} + \Delta x_3 z_{13} + \Delta x_4 z_{14}), \\ D_2 &= \frac{\Delta x_2}{2t} \frac{1}{\Delta C^{(2)}} (\Delta x_3 z_{23} + \Delta x_4 z_{24} + \Delta x_1 z_{12}), \\ D_3 &= \frac{\Delta x_3}{2t} \frac{1}{\Delta C^{(3)}} (\Delta x_4 z_{34} + \Delta x_1 z_{13} + \Delta x_2 z_{23}). \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя значения $\Delta C^{(2)} = 0,035$, $\Delta C^{(3)} = 0,15$, $\Delta C^{(4)} = 0,045$ [2], а также

$$\begin{aligned} \varepsilon_{12} &= 0,231, & \varepsilon_{22} &= 0,185, & \varepsilon_{24} &= 0,097 \\ \varepsilon_{32} &= 0,185, & \varepsilon_{33} &= 0,232, & \varepsilon_{34} &= 0,13, \\ \varepsilon_{42} &= 0,097, & \varepsilon_{43} &= 0,14, & \varepsilon_{44} &= 0,183, \end{aligned}$$

получаем: $D_2 = 8,3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$; $D_3 = 1,66 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$; $D_4 = 1,74 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{с}$. Значения констант скоростей роста фаз определялись по формуле

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_{ii} K_i K_j = h_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

где $h_i = 2D_i \Delta C^{(i)}$; $K_i = \Delta x_i / \sqrt{t}$; $K_j = \Delta x_j / \sqrt{t}$.

Задача решена методом итерации по Зейделя на ЭВМ ЕС-1022. Точность метода итерации задавалась следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \text{mod} (K_i^{(p)} - K_i^{(p-1)}) < \varepsilon, \quad \varepsilon = 10^{-10}.$$

В результате получены значения констант скоростей роста для фаз Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_3Al соответственно:

$$K_2 = 0,443 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}}, \quad K_3 = 0,280 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}},$$

$$K_4 = 0,148 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}}.$$

Временная зависимость толщины фаз, показывающая параболический закон роста, при $T = 350^\circ\text{C}$ представлена на рис. 1.

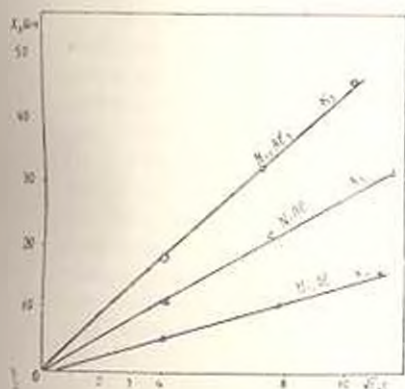


Рис. 1. Параболический закон роста интерметаллических фаз Ni_2Al_3 , NiAl , Ni_3Al при $T = 350^\circ\text{C}$.

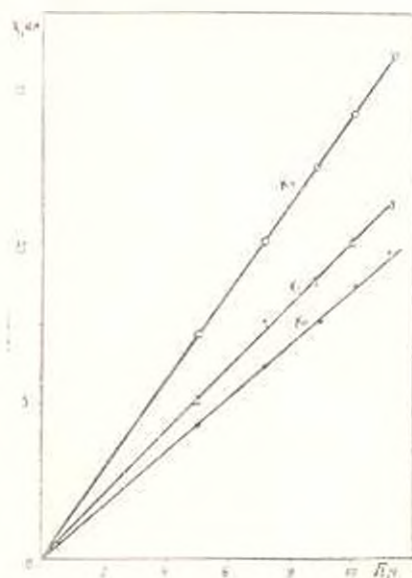


Рис. 2. Параболический закон роста интерметаллических фаз NiAl , NiAl , Ni_3Al при $T = 125^\circ\text{C}$.

Аналогичным образом были рассчитаны эффективные значения коэффициентов взаимной диффузии

$$D_1 = 2,2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad D_2 = 7,9 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad D_3 = 1,13 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

и константы скоростей роста фаз

$$K_1 = 0,51 \cdot 10^{-7} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}}, \quad K_2 = 0,72 \cdot 10^{-7} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}},$$

$$K_3 = 0,445 \cdot 10^{-7} \text{ см} \cdot \text{с}^{-\frac{1}{2}} \text{ при } T = 125^\circ \text{С.}$$

Временные зависимости толщины фаз приведены на рис. 2.

ЕрПН им. К. Маркса

22. IX. 1986

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гуров К. П., Карташкин Б. А., Югаста Ю. Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах — М.: Наука, 1981. — 350 с.
2. Хансен М., Андеренко К. Структура двойных сплавов. — М.: Металлургия, 1962. — 508 с.

ՄԱՐԿԱՆԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

- Վ. Լ. Կասյան, Կ. Ռ. Խառապյան: Այժմատե հղկարարների էլեկտրաէրոզիոն մշակման հա-
վանական օբյեկտների մասին 3

ՇՆԱԿԱՐԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾՆԵՐ

- Ա. Մ. Ալեյան: Շրկարարական ազդեցությունները շրջանային կոնսուլային դաշնային
թաղանթների տեսքի կառուցվածքների վրա 5

ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆԻԿԱ

- Ս. Ռ. Փառլեանյան: Ինքնավար էլեկտրաէներգետիկական համակարգերում էլեկտրական
մեքենաների թվային մոդելավորումը 12

ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄ ԵՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՆ

- Վ. Ս. Մաթևոսյան, Վ. Գ. Խաչատուրյան: Գազամուղային համակարգերի զուգադաշնան
նախագիծման ավտոմատացումը 15
Բ. Հ. Հունյան: Դաշնամատակարարման տերիտորիայի համակարգերի ոչ հստակ դե-
կլարացիա 18
Ս. Ս. Ոսանյան: Հեղուկացված գազի օպտիմալ մատակարարման նախագծվող հա-
մակարգի մաթեմատիկական մոդելը 22
Ա. Ա. Մարկով, Մ. Վ. Մարկոսյան, Հ. Ս. Սալայան, Ս. Ս. Խոստյան: Թաղամասի
զանգվածային սպասարկման համակարգերի ընդհանրավորված բնութագրերի որոշումը 25

ԳԻՏԱԿԱՆ ԵՌԹԻՐ

- Կ. Ու. Տեյն, Ռ. Ն. Տեյն: Շահագործման պայմանների գործոնների ազդեցությունը ՊՈՍՏ
տիպի էլեկտրաշարժիչների առանցքակալային հանդույցների նուազիումիան վրա 29
Ա. Ս. Պոզոսյան: Փայլային տեղափոխման շղթայական մեխանիզմի նախագծումը 32
Հ. Գ. Շեկյան, Է. Պ. Խալապյան: Էներգետիկ մեքենաների թրթռուցների և աղմուկի
մակարդակի նվազեցումը առավելագույն հեռավորությունների դիմադրական հակազ-
ուսման վերացման ուղիով 35
Վ. Լ. Միքայել: Ուրարտական տիրույթային մոդելների փորձարկման տեսող 38
Ս. Հ. Մկրտչյան, Ա. Հ. Սալայան, Ս. Բ. Արզարյան: Հազարամյակյան պոեզիաների կենե-
տիկան նիկել-ալյումին համակարգի դիֆուզիոն դադար 41

СОДЕРЖАНИЕ

Ст.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- В. Л. Касьян, К. Р. Таталян. О вероятностных закономерностях электроразрядной обработки алмазных кругов 3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- А. М. Алоян. Сенситивное воздействие на сооружения типа круговой консольной цилиндрической оболочки 8

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- А. Р. Пихлецини. К вопросу о цифровом моделировании электрических машин в составе автономных электроэнергетических систем 12

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- П. А. Матевосян, В. Г. Хачатрян. Автоматизация проектирования развития газотранспортных систем 15
Л. А. Унанян. Нечеткое управление территориальными системами газоснабжения 18
С. Б. Оганджанян. Математическая модель проектируемой системы оптимального снабжения с жидким газом 22
А. А. Маркян, М. В. Марксян, А. С. Сисян, С. С. Торосян. Определение обобщенных характеристик многофазных систем массового обслуживания 25

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

- Г. Х. Тев, Б. Н. Тев. О влиянии факторов воздействия эксплуатационных условий на надежность подшипниковых узлов АДММ 28
А. С. Погосян. Проектирование цепного механизма шагового перемещения 32
Г. Г. Шемян, Э. Н. Халатян. Снижение уровня вибрации и шума роторных машин путем исключения динамических реакции линейно-покатных опор 35
В. Т. Минисян. Стенд для испытания высоковольтных тиристорных модулей 38
С. О. Мкртчян, С. Ж. Есаян, М. Г. Абгарян. Кинематика фазообразования в диффузионной зоне системы никель-алюминий 41