

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ 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.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ), Զ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ, Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԿՍՅԱՆ, Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), А.А. ТЕРЗЯН (зам. глав. редактора),
З.К. СТЕПАНЯН (ответственный секретарь), С.Г. АГБАЛЯН,
Р.В. АТОЯН, В.В. БУНИАТЯН, Ж.Д. ДАВИДЯН, С.П. ДАВТЯН, С.М. КАЗАРЯН,
В.З. МАРУХЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, В.С. САРКИСЯН,
С.О. СИМОНЯН, М.Г. СТАКЯН, В.С. ХАЧАТРЯН

EDITORIAL BOARD

R.M. MARTIROSSYAN (Editor-in-Chief), H.A. TERZYAN (Vice-Editor-in-Chief),
Z.K. STEPANYAN (Secretary - in - Chief), S.G. AGHBALYAN,
R.V. ATOYAN, V.V. BUNIATYAN, Zh.D. DAVIDYAN, S.P. DAVTYAN,
S.M. GHAZARYAN, V.Z. MARUKHYAN, YU.L. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN,
S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN, V.S. KHACHATRYAN

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Համակարգչային շարվածքը
և ձևավորումը՝

ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ
ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА
Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2007

Р.П. ДЖАВАХЯН, Н.А. МАХСУДЯН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СФЕРИЧЕСКИХ И ПЛОСКИХ КРИВОШИПНО-КОРОМЫСЛОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С СИММЕТРИЧНЫМ ЗАКОНОМ ДВИЖЕНИЯ КОРОМЫСЛА

Рассматриваются семейства плоских и сферических кривошипно-коромысловых механизмов, коэффициент изменения средней скорости коромысла которых равен единице. Выполнен их сравнительный анализ по безразмерным коэффициентам кинематического и динамического характера, характеризующим движение коромысла. Получены корреляционные зависимости для определения наибольших значений этих безразмерных коэффициентов. Приведены два примера синтеза указанных механизмов.

Ключевые слова: рычажный механизм, плоский четырехзвенный механизм, сферический механизм, коэффициент изменения средней скорости, безразмерный коэффициент динамической мощности, корреляционная зависимость.

Цель работы - исследовать семейства плоских и сферических кривошипно-коромысловых механизмов с коэффициентом изменения средней скорости коромысла, равным единице; выполнить их сравнительный анализ по кинематическим и динамическим безразмерным коэффициентам, характеризующим движение коромысла; получить корреляционные зависимости для определения наибольших значений этих коэффициентов и с их помощью осуществить синтез механизмов рассматриваемых семейств.

Из сферических кривошипно-коромысловых механизмов взято выявленное Вилле семейство механизмов [1], у которых экстремумы угловой скорости коромысла имеют место в одном и том же положении его прямого и обратного ходов. Это свойство характерно тем, что межосевые углы вращательных пар коромысла и стойки (рис.1) равны между собой, т.е. когда

$$\alpha = \alpha_3. \quad (1)$$

Четырехзвенный сферический рычажный механизм характеризуется четырьмя межосевыми углами между осями вращательных пар его звеньев, а именно, углами α_1 , α_2 , α_3 и α , показанными на рис.1, а его функцию положения в явном виде можно представить аналогично функции положения плоского четырехшарнирного механизма [2], приведенного на рис.2:

$$\varphi_3(\varphi_1) = \theta(\varphi_1) + k\beta(\varphi_1), \quad (2)$$

где φ_1 - входной угол; θ и β - промежуточные переменные углы, значения которых изменяются в пределах $0 \leq \theta \leq 2\pi$ и $0 < \beta < \pi$ и определяются по формулам

$$\cos \theta = \frac{(a_1 \sin \alpha + L_1 \cos \alpha \cos \varphi_1)}{\sqrt{(a_1 \sin \alpha + L_1 \cos \alpha \cos \varphi_1)^2 + (L_1 \sin \varphi_1 - L_0)^2}}, \quad (3)$$

$$\cos \beta = \frac{\cos \varphi_3 (a_1 \sin \alpha + L_1 \cos \alpha \cos \varphi_1) + \sin \varphi_3 (L_1 \sin \varphi_1 - L_0)}{\sqrt{(a_1 \sin \alpha + L_1 \cos \alpha \cos \varphi_1)^2 + (L_1 \sin \varphi_1 - L_0)^2}}. \quad (4)$$

Величина $k = \pm 1$ в (2) является коэффициентом сборки группы шатун-коромысло и определяется следующим образом:

если при $\varphi_1 = 0$ имеет место $0 < \varphi_3 < \pi$, то $k = +1$;

если при $\varphi_1 = 0$ имеет место $\pi \leq \varphi_3 \leq 2\pi$, то $k = -1$.

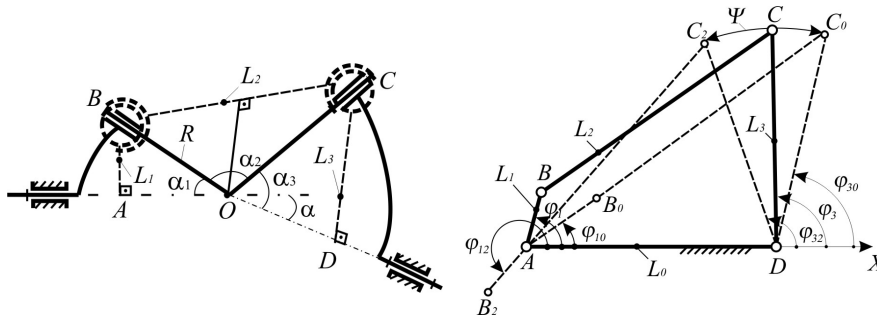


Рис.1. Сферический четырехзвенный кривошипно-коромысловый механизм

Дважды дифференцируя по φ_1 выражения (2)-(4), получим формулы для определения аналогов угловой скорости и ускорения коромысла и производных $\theta^n = \theta^n(\varphi_1)$, $\beta^n = \beta^n(\varphi_1)$, $n = 1; 2$ промежуточных углов θ и β , входящих в (5) (см. [2]):

$$\varphi'_3 = \omega_3 / \omega_1 = \theta' + k\beta', \quad \varphi''_3 = \varepsilon_3 / \omega_1^2 = \theta'' + k\beta''. \quad (5)$$

Для рассматриваемых сферических механизмов (рис.1) назовем следующие области изменения и значения их постоянных параметров:

$$\alpha_1 = 10 \dots 30^\circ, \quad \alpha_2 = 50 \dots 90^\circ, \quad (6)$$

$$\alpha = \alpha_3 = 90^\circ. \quad (7)$$

Анализ семейства сферических механизмов показывает, что при выполнении условия (7) коэффициент изменения средней угловой скорости коромысла имеет значение

$$K = 1. \quad (8)$$

Исходя из этого, для плоских кривошипно-коромысловых механизмов (рис.2) назовем следующие области изменения длин звеньев:

$$L_1 = 1, \quad L_2 = 2 \dots 7, \quad (9)$$

а длины двух других звеньев определим по формулам

$$L_0 = \sqrt{L_3^2 + L_2^2 - L_1^2}, \quad L_3 = L_1 / \sin(\Psi/2), \quad (10)$$

гарантирующим выполнение условия (8).

Движение выходного коромысла сферического механизма характеризуется безразмерными коэффициентами его скорости (K_{ω}), ускорения (K_{ε}) и динамической мощности (K_p), значения которых для кривошипно-коромысловых механизмов определяются по формулам [3]

$$K_{\omega} = \varphi'_3 \cdot \varphi_{\Psi} / \Psi, \quad K_{\varepsilon} = \varphi''_3 \cdot \varphi_{\Psi}^2 / \Psi, \quad K_p = K_{\omega} K_{\varepsilon}, \quad (11)$$

где Ψ - угол размаха коромысла, значение которого определяется по формуле

$$\Psi = |\varphi_3(\varphi_{10}) - \varphi_3(\varphi_{12})|, \quad (12)$$

$\varphi_3(\varphi_{12})$ и $\varphi_3(\varphi_{10})$ - наибольшее и наименьшее значения угла φ_3 , координирующего коромысло; φ_{Ψ} - угол поворота кривошипа, соответствующий углу размаха Ψ коромысла. Величина угла φ_{Ψ} определяется разностью значений входного угла φ_1 в крайних положениях коромысла, обозначенных вторыми индексами 0 и 2:

$$\varphi_{\Psi} = |\varphi_{12} - \varphi_{10}|. \quad (13)$$

Коэффициент изменения средней угловой скорости коромысла определяется как отношение значений углов поворота кривошипа, соответствующих рабочему и холостому ходам коромысла:

$$K = \varphi_{\Psi} / (2\pi - \varphi_{\Psi}). \quad (14)$$

Графики перемещения $\varphi_3(\varphi_1)$ коромысел рассматриваемых механизмов имеют осевую симметрию относительно оси $\varphi_1 = 180^\circ$, т.е. для них имеет место условие $\varphi_3(\varphi_1) = \varphi_3(2\pi - \varphi_1)$, а для графиков изменения аналога $\varphi'_3(\varphi_1)$ их угловых скоростей относительно точки $(\pi, 0)$ - условие $\varphi'_3(\varphi_1) = -\varphi'_3(2\pi - \varphi_1)$ центральной симметрии. Следовательно, рассматриваемые сферические механизмы реализуют возвратное движение выходного звена по *симметричному* закону, предопределяющему лучшие динамические характеристики, поскольку в этом случае имеем наименьшие значения ускорения, сил инерции и моментов от сил инерции.

Для рассматриваемых четырехзвенных рычажных механизмов с геометрическими параметрами (6) и (7) на рис.3 приведены графики изменения наибольших значений безразмерных коэффициентов (11):

$$\max K_{\omega} = f_1(\alpha_2), \quad \max K_{\varepsilon} = f_2(\alpha_2), \quad (15)$$

а в табл. 1 - корреляционные зависимости, приближенно описывающие функции (15), и значения коэффициентов корреляции r_{ab} и r_{cd} .

Таблица 1

$\alpha_1 = 10^\circ \dots 30^\circ, \alpha_2 = 50^\circ \dots 90^\circ, \alpha = \alpha_3 = 90^\circ$						
Корреляционная зависимость	a	b	r_{ab}	$10^3 c$	d	r_{cd}
$\max K_\omega = (a\alpha_2^{-2} + b)\alpha_1^2 + (c\alpha_2^6 + d) \quad (16)$	0,72	0,26	0,99	-2,5	1,56	0,98
$\max K_p = (a\alpha_2^{-2} + b)\alpha_1^2 + (c\alpha_2 + d) \quad (17)$	7,39	1,35	0,99	-450	4,49	0,99

Корреляционные зависимости (16) и (17), приведенные в табл. 1, с высокой точностью описывают зависимость наибольших значений безразмерных коэффициентов от геометрических параметров любого сферического механизма семейства (6), (7).

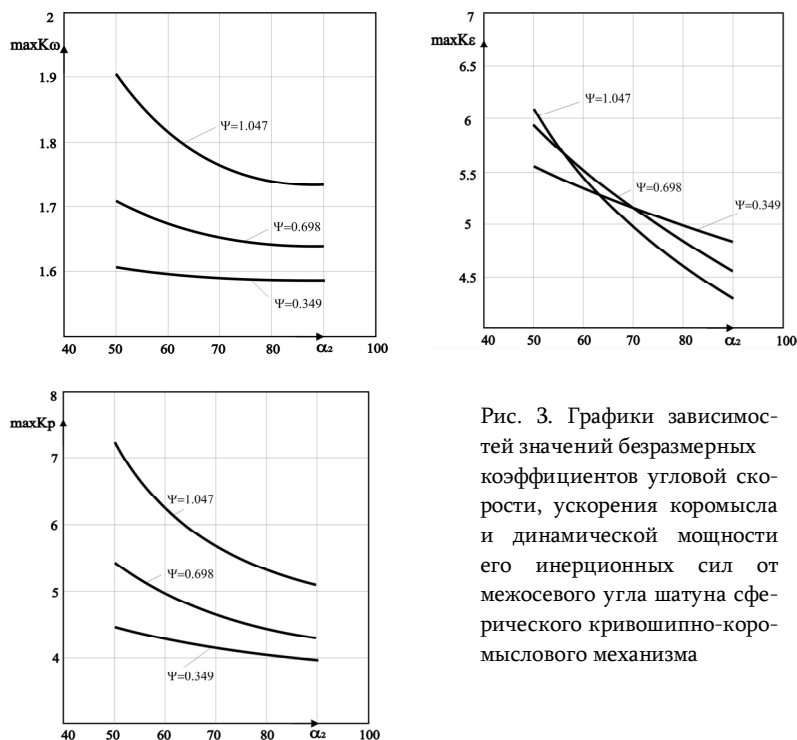


Рис. 3. Графики зависимостей значений безразмерных коэффициентов угловой скорости, ускорения коромысла и динамической мощности его инерционных сил от межосевого угла шатуна сферического кривошипно-коромыслового механизма

Результаты исследования основных параметров семейства (9), (10) плоских кривошипно-коромысловых механизмов представлены графиками (рис. 4) и корреляционными зависимостями (табл.2).

С помощью корреляционных зависимостей (16)-(20), приведенных в табл. 1 и 2, можно при известных геометрических параметрах сферических и плоских кривошипно-коромысловых механизмов определить наибольшие значения характеризующих закон движения коромысла безразмерных

коэффициентов (11), а также осуществить синтез механизмов по указанным коэффициентам.

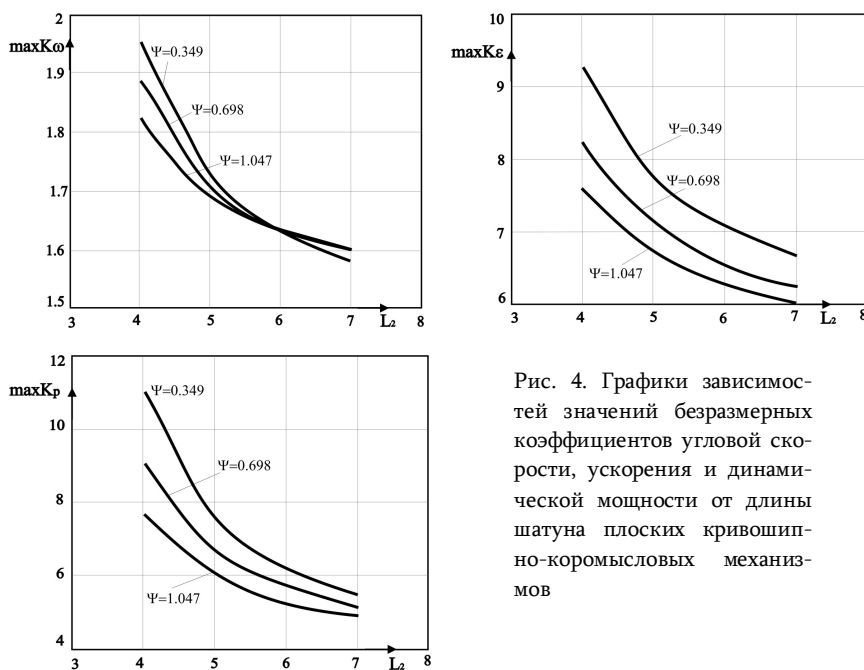


Рис. 4. Графики зависимостей значений безразмерных коэффициентов угловой скорости, ускорения и динамической мощности от длины шатуна плоских кривошипно-коромысловых механизмов

На рис. 5 для плоских и сферических четырехзвенных кривошипно-коромысловых механизмов приведены графики зависимости максимальных значений безразмерных коэффициентов угловой скорости (рис. 5а), ускорения (рис 5б) и динамической мощности (рис. 5в) коромысла от угла размаха коромысла¹ и области их изменения.

Таблица 2

$L_1 = 1, L_2 = 2 \dots 7, \Psi = 0,349 \dots 1,047$						
Корреляционная зависимость	a	b	r_{ab}	c	d	r_{cd}
$\max K_{\omega} = (a\Psi + b)L_2^{-2} + (c\Psi + d) \quad (18)$	1,06	0,65	0,99	-0,07	1,59	0,98
$\max K_{\epsilon} = (a\Psi + b)L_2^{-1} + (c\Psi^3 + d) \quad (19)$	4,24	3,74	0,99	0,09	4,93	0,99
$\max K_p = (a\Psi + b)L_2^{-1} + (c\Psi + d) \quad (20)$	12,02	4,37	0,99	1,53	3,73	0,99

¹ Для сравнения механизмов со значением коэффициента изменения средней угловой скорости коромысла $K = 1$ при одинаковых углах размаха коромысел

Сравнение результатов, полученных для плоских и сферических четырехзвенных кривошипно-коромысловых механизмов, показывает, что при прочих равных условиях наибольшие значения коэффициентов углового ускорения в 1,529...1,328 раза и динамической мощности коромысла в 1,526...1,14 раза в сферических механизмах меньше, чем в плоских механизмах, а экстремальные значения коэффициента угловой скорости практически не отличаются.

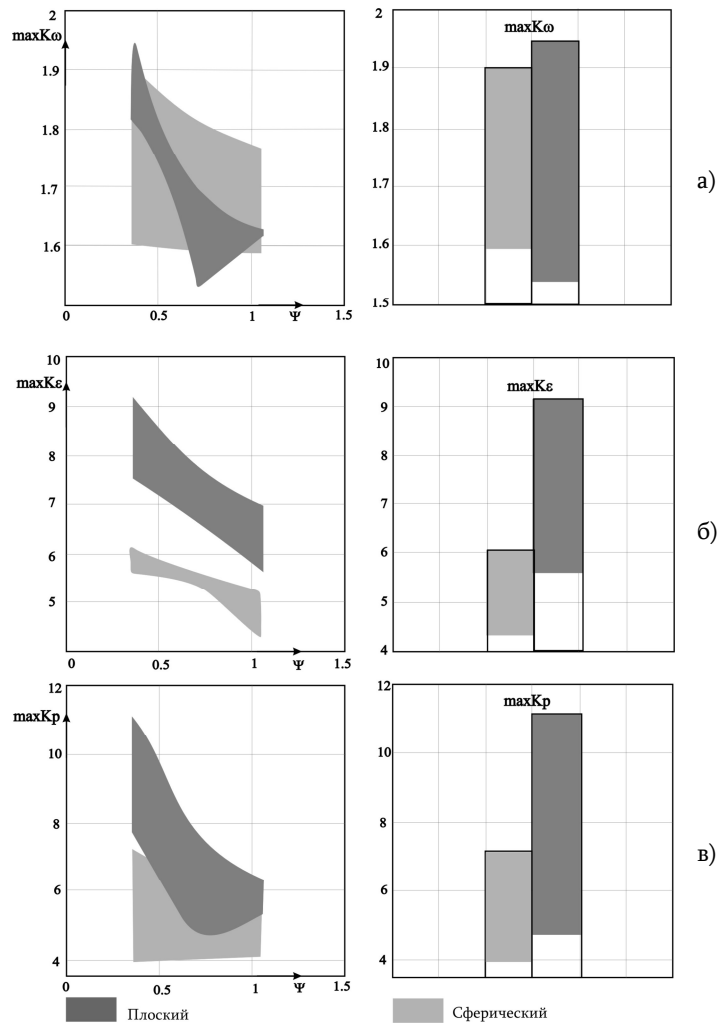


Рис. 5. Графики зависимостей наибольших значений коэффициентов угловой скорости (а), ускорения (б) и динамической мощности (в), характеризующих закон движения выходного звена сферических и плоских кривошипно-коромысловых механизмов от угла размаха и области их изменения

С помощью полученных корреляционных зависимостей (16)-(20) можно решить задачи синтеза плоских и сферических механизмов по наибольшим значениям безразмерных коэффициентов K_ω , K_ϵ и K_p , характеризующих наибольшие значения угловой скорости, ускорения выходного коромысла, а также входного динамического момента от его инерционных сил.

Пример 1. Требуется спроектировать сферический кривошипно-коромысловый механизм при следующих значениях входных параметров синтеза: $\alpha = \alpha_3 = 90^\circ$, $\max K_\omega = 1,6$, $\max K_p = 4,2$.

Совместно решая нелинейные уравнения (16) и (17) относительно неизвестных углов α_1 и α_2 , находим искомые значения $\alpha_1 = 12^\circ$, $\alpha_2 = 72^\circ$ межосевых углов проектируемого механизма. Полученный механизм обеспечивает точные значения $\max K_\omega = 1,59$ и $\max K_p = 4,18$, ошибка которых от требуемых значений не превышает 0,287%.

Пример 2. Требуется спроектировать плоский кривошипно-коромысловый механизм при известном значении $\max K_p = 8$.

Принимая $L_1 = 1$ и решая нелинейное уравнение (20), находим $L_2 = 2,23$ ($\Psi = 0,349$). Полученный механизм обеспечивает значение $\max K_p = 7,9$, ошибка которого от требуемого значения не превышает 0,13%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wille Von F.** Raumliche Gelenkvierecke und Schubkurbeln und die identischen Lagen der extremen Übersetzungsverhältnisse // Feinwerktechn+Messtechn. - 1976. - 84, N6. - P. 285-287.
2. **Джавахан Р.П.** Структура и кинематика механизмов. - Ереван, 2003. - 391 с.
3. **Левитский Н.И.** Кулачковые механизмы. - М.: Машиностроение, 1964.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 24.12.2006.

Ռ.Պ. ԶԱՎԱԽՅԱՆ, Ն.Ա. ՄԱԽՍՈՒԴՅԱՆ

**ՃՈՃԱԼԾԱԿԻ ՇԱՐԺՄԱՆ ՀԱՄԱՉԱՓ ՕՐԵՆՔ ԱՊԱՀՈՎՈՂ ԳՆԴՈԼՈՐՏԱՅԻՆ ԵՎ ՀԱՐԺ
ՇՈՒՌՏՎԻԿ-ՃՈՃԱԼԾԱԿԱՅԻՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ
ՄԻՆԹԵԶ**

Դիտարկվում են հարթ և գնդաձևային շուտովիկ-ճոճալծակային մեխանիզմների ընտանիքներ, որոնց ելքի ճոճալծակի միջին արագության փոփոխման գործակիցը հավասար է մեկի, կատարվում է դրանց համեմատական վերլուծություն ըստ ելքի օղակի շարժումը բնորոշող կինեմատիկ և դինամիկ բնույթի չափագուրկ գործակիցների, ստացված են կոռելյացիոն բանաձևեր՝ այդ չափագուրկ գործակիցների առավելագույն արժեքների որոշման համար, բերված են մեխանիզմների սինթեզի երկու օրինակներ:

Առանցքային բառեր. լծակային մեխանիզմ, հարթ քառօղակ մեխանիզմ, գնդաձևային մեխանիզմ, միջին արագության փոփոխման չափագուրկ գործակից, դինամիկ հզորության չափագուրկ գործակից, հարաբերակցական կախում:

R.P. JAVAKHYAN, N.A. MAKHSUDYAN

COMPARATIVE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF PLANAR AND SPHERIC CRANK-AND-ROCKER MECHANISMS PROVIDING A SYMMETRIC LAW OF ROCKER MOTION

Planar and spheric crank-and-rocker mechanisms families have been studied. The coefficient of the output rocker average velocity is equal to one. Their comparative analysis has been made according to dimensionless coefficients of kinematic and dynamic nature describing the output link motion. Correlation functions have been obtained to determine maximum values of these dimensionless coefficients. Two examples of the mechanisms synthesis have been presented.

Keywords: lever mechanism, plane four-link mechanism, spherical mechanism, coefficient of average velocity change, dimensionless coefficient of dynamic power, correlation dependence.

А.Р. ПАПОЯН, А.С. ЧАХАЛЯН

ДИНАМИКА БЫСТРОХОДНОГО РОТОРНОГО УЗЛА С КОМБИНИРОВАННЫМИ ОПОРАМИ

Рассматривается динамика быстроходного ротора, установленного на комбинированные опоры: упругий поворотный шарнир с одного конца и дисковая опора в промежуточной части ротора с упругой подвеской. Составлены динамическая модель, уравнения движения системы и исследовано влияние упруго-геометрических параметров на условия вращения ротора. Предложенные алгоритм и программа расчета применены для решения оптимизационных задач минимизации динамических нагрузок в опорах и амплитуды колебаний ротора.

Ключевые слова: быстроходный ротор, комбинированные опоры, уравнения движения, амплитуда и фазовый портрет, жесткость опоры.

Исследования проводились для роторного узла новой конструкции, защищенной авторскими правами [1]. Особенностью конструкции предложенного узла являются опоры ротора. Вращение ротора осуществляется от соосного роторного привода, передающего крутящий момент с помощью упругой муфты, а ось вращения ротора обеспечивается с помощью дисковой опоры, которая через упругую подвеску вмонтирована в корпус ротора.

Ранее проведенные исследования показали, что если опоры ротора достаточно податливы, то при частоте вращения до 10000 с^{-1} его можно рассматривать как жесткий, установленный на упругих опорах [2,3]. В работе ротор моделирован как жесткий вал с диском, имеющим массу m , с осевым и экваториальными моментами инерции J_c и A_c соответственно. Ротор одним концом установлен в шарнирную опору, имеющую поворотную жесткость c_ϕ и коэффициент затухания ξ_ϕ , а в промежуточной части установлен в опору с линейной характеристикой, жесткостью c_1 , коэффициентом затухания ξ_1 . Эта опора, в свою очередь, установлена в упругой подвеске с массой m_3 , жесткостью c_2 , коэффициентом затухания ξ_2 (рис.1а). Динамическая неуравновешенность ротора характеризуется эксцентриситетом e от центра масс диска до оси вращения и углом δ между осью вращения и главной центральной осью диска.

Для составления уравнений установившегося движения ротора выбрана неподвижная система координат OXYZ (рис.1б), где оси X и Z направлены перпендикулярно оси ротора, а ось Y совпадает с осью находящегося в равновесии ротора. O_1 и O_2 - геометрические центры ротора и подвески в точке, совпадающей с центром масс ротора, соответственно, при отклонении

системы от положения равновесия. Указанные оси составляют правую систему координат [4].

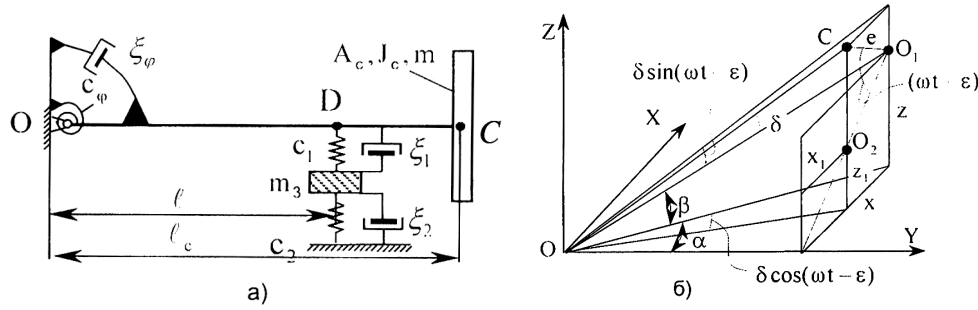


Рис.1, а - расчетная схема ротора; б - система координат ротора

Положение главной центральной оси ротора можно представить с помощью углов α_1 и β_1 , значения которых можно рассчитать выражениями

$$\alpha_1 = \alpha + \delta \cos(\omega t - \varepsilon) = (x/\ell) + \delta \cos(\omega t - \varepsilon), \quad (1)$$

$$\beta_1 = \beta + \delta \sin(\omega t - \varepsilon) = (z/\ell) + \delta \sin(\omega t - \varepsilon). \quad (2)$$

Тогда координаты центра масс ротора можно рассчитать из выражений

$$x_c = (\ell_c/\ell)x + e \cos \omega t, \quad (3)$$

$$z_c = (\ell_c/\ell)z + e \sin \omega t. \quad (4)$$

Для составления уравнений движения ротора воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = 0, \quad (5)$$

где Π - потенциальная энергия системы, определяемая в виде

$$\Pi = \frac{1}{2} c_2 (x_1^2 + z_1^2) + \frac{1}{2} c_1 ((x - x_1)^2 + (z - z_1)^2) + \frac{c_\varphi}{2 \cdot \ell^2} \cdot (x^2 + z^2); \quad (6)$$

T - кинетическая энергия системы, определяемая в виде

$$\begin{aligned} T &= 0,5m(\dot{x}_c^2 + \dot{z}_c^2) + 0,5J_c \omega_y^2 + \frac{1}{2} A_c (\omega_x^2 + \omega_z^2) + 0,5m_3 (\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2) = \\ &= 0,5 \frac{m}{\ell^2} [(\ell_c \dot{x} - \ell e \omega \sin \omega t)^2 + (\ell_c \dot{z} + \ell e \omega \cos \omega t)^2] + \\ &+ 0,5J_c \left(\omega + \frac{\dot{x}}{\ell^2} z - \delta \omega \frac{z}{\ell} \sin(\omega t - \varepsilon) + \delta \frac{\dot{x}}{\ell} \sin(\omega t - \varepsilon) \right)^2 + 0,5A_c \times \\ &\times \left(\left(\frac{\dot{x}}{\ell} - \delta \omega \sin(\omega t - \varepsilon) \right)^2 + \left(\frac{\dot{z}}{\ell} + \delta \omega \cos(\omega t - \varepsilon) \right)^2 \right) + 0,5m_3 (\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2); \end{aligned} \quad (7)$$

Φ - функция рассеивания энергии Релея, определяемая в виде

$$\Phi = 0,5\xi_2(\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2) + 0,5\xi_1((\dot{x} - \dot{x}_1)^2 + (\dot{z} - \dot{z}_1)^2) + 0,5(\xi_\varphi/\ell^2)(\dot{x}^2 + \dot{z}^2). \quad (8)$$

С помощью (5) и с учетом (6)-(8) дифференциальные уравнения движения роторной системы принимают вид

$$\begin{cases} (m\ell_c^2 + A_c)\ddot{x} + (\xi_1\ell^2 + \xi_\varphi)\dot{x} - \xi_1\ell^2\dot{x}_1 + J_c\omega\dot{z} + c_1\ell^2(x - x_1) + c_\varphi x = \\ = m\ell_c\ell\omega^2 \cos(\omega t) + (A_c - J_c)\ell\omega^2\delta \cos(\omega t - \varepsilon), \\ (m\ell_c^2 + A_c)\ddot{z} + (\xi_1\ell^2 + \xi_\varphi)\dot{z} - \xi_1\ell^2\dot{z}_1 - J_c\omega\dot{x} + c_1\ell^2(z - z_1) + c_\varphi z = \\ = m\ell_c\ell\omega^2 \sin(\omega t) + (A_c - J_c)\ell\omega^2\delta \sin(\omega t - \varepsilon), \\ m_3\ddot{x}_1 + (\xi_1 + \xi_2)\dot{x}_1 - \xi_1\dot{x}_1 + (c_1 + c_2)x_1 - c_1x = 0, \\ m_3\ddot{z}_1 + (\xi_1 + \xi_2)\dot{z}_1 - \xi_1\dot{z}_1 + (c_1 + c_2)z_1 - c_1z = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Система уравнений решена в среде программного пакета MathCAD с помощью численного метода Рунге-Кутты с фиксированным шагом. В пакете предусмотрена подпрограмма Rkfixed (y_0, t_0, t_1, M, D), которая предназначена для решения системы уравнений только первого порядка. При реализации этой подпрограммы необходимо иметь следующие исходные параметры системы: y_0 - вектор начальных значений в точке t_0 размера $N \times 1$ (N - число уравнений в системе); t_0 - начальная точка расчета; t_1 - конечная точка расчета; M - число шагов, на которых численный метод находит решение; D - векторная функция аргумента t того же размера $N \times 1$ [5]. Для решения рассматриваемой задачи с помощью данной подпрограммы сначала необходимо снизить порядок уравнений системы (9) с помощью нижеприведенных назначений:

$$\begin{aligned} y_0 &\equiv x, \quad y_4 \equiv x_1, \\ y_1 &\equiv \dot{x}, \quad y_5 \equiv \dot{x}_1, \\ y_2 &\equiv z, \quad y_6 \equiv z_1, \\ y_3 &\equiv \dot{z}, \quad y_7 \equiv \dot{z}_1. \end{aligned}$$

В результате получим новую систему восьми дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{y}_0 = y_1, \\ \dot{y}_1 = d - hy_1 + gy_5 - ay_3 - b(y_0 - y_4) - cy_0, \\ \dot{y}_2 = y_3, \\ \dot{y}_3 = k - hy_3 + gy_7 + ay_1 - b(y_2 - y_6) - cy_2, \\ \dot{y}_4 = y_5, \\ \dot{y}_5 = qy_0 - py_5 + vy_1 - ny_4, \\ \dot{y}_6 = y_7, \\ \dot{y}_7 = qy_2 - py_7 + vy_3 - ny_6, \end{cases} \quad (10)$$

где приняты следующие обозначения:

$$a = J_c\omega/(m\ell_c^2 + A_c), \quad b = c_1\ell^2/(m\ell_c^2 + A_c), \quad c = c_\varphi/(m\ell_c^2 + A_c),$$

$$q = c_1 / m_3, h = (\xi_1 l^2 + \xi_\varphi) / (m \ell_c^2 + A_c), g = \xi_1 l^2 / (m \ell_c^2 + A_c),$$

$$d = (m \ell_c l e \omega^2 \cos(\omega t) + (A_c - J_c) l \delta \omega^2 \cos(\omega t - \varepsilon)) / (m \ell_c^2 + A_c),$$

$$k = (m \ell_c l e \omega^2 \sin(\omega t) + (A_c - J_c) l \delta \omega^2 \sin(\omega t - \varepsilon)) / (m \ell_c^2 + A_c),$$

$$p = (\xi_1 + \xi_2) / m_3, v = \xi_1 / m_3, n = (c_1 + c_2) / m_3.$$

Отметим, что при выводе вектора начальных значений y_0 необходимо учесть, что в момент, когда $t = 0$, перемещения осей ротора и подвески под опорой D равны нулю. Выбор времени интегрирования рассчитан из условия наблюдения колебаний ротора примерно в течение 20 оборотов. При частоте вращения ротора 5000 с^{-1} период вращения ротора составляет около $0,001 \text{ с}$. Следовательно, время интегрирования желательно взять $0,02 \text{ с}$.

Расчеты произведены для ротора со следующими физико-геометрическими параметрами, которые определены для реального экспериментального образца нового роторного узла: $m = 0,15 \text{ кг}$, $m_3 = 0,2 \text{ кг}$, $J_c = 2,54 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$, $A_c = 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$, $\ell_c = 0,07 \text{ м}$, $\ell = 0,03 \text{ м}$, $c_\varphi = 2000 \text{ Нм/рад}$.

На рис. 2а приведены графики изменения абсолютной величины амплитуды колебаний ротора и упруго-подвешенной подвески, а также изменения относительного перемещения ротора и подвески.

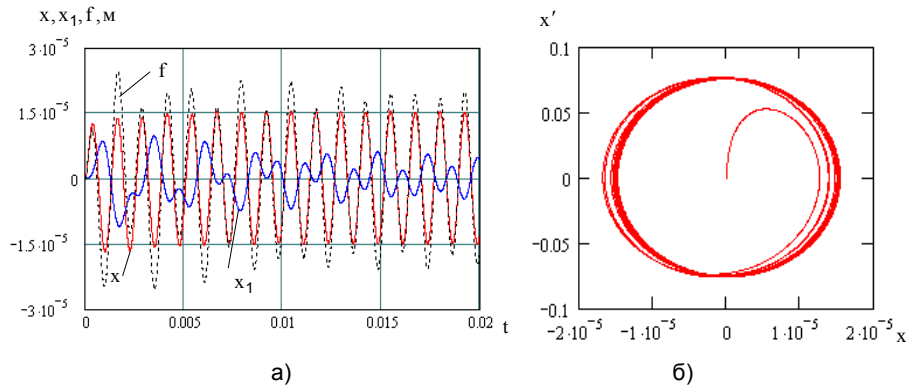


Рис. 2. Амплитуда колебаний ротора и подвески (а) и фазовый портрет колебаний ротора (б): x - абсолютные колебания ротора; x_1 - абсолютные колебания подвески; $f = x - x_1$ - относительные колебания ротора и подвески

Последняя разница - характерный показатель для оценки величины динамической составляющей нагрузки в дисковой опоре.

Результаты получены при следующих исходных значениях параметров системы: жесткость дисковой опоры и подвески $c_1 = 10^6 \text{ Н/м}$ и $c_2 = 10^4 \text{ Н/м}$ соответственно, поворотная жесткость шарнира $c_\phi = 2 \cdot 10^3 \text{ Нм/рад}$, коэффициенты затухания упругих элементов опор $\xi_1 = \xi_2 = 10 \text{ Нс/м}$, шарнирной опоры - $\xi_\phi = 10 \text{ Нм/с}^1$, частота вращения ротора $\omega = 5000 \text{ с}^{-1}$. Как показывает анализ результатов, амплитуды колебаний ротора и подвески существенно отличаются. Если параметры системы подобраны необоснованно, то колебания этих элементов системы могут не совпадать по фазе, и в этом случае нагрузка на дисковую опору может значительно увеличиваться, что приведет к потере долговечности дисков. При этом необходимо отметить, что состояние системы устойчивое, о чем свидетельствует образ фазового портрета ротора (рис. 2б). Варьирование значениями коэффициентов затухания показывает, что изменение ξ_1 и ξ_2 незначительно влияет на поведение системы. В то же время выбор значения коэффициента ξ_ϕ очень существенен. При увеличении ξ_ϕ от 10 до 20 Нм/с^1 максимальные значения параметров x , x_1 и f снижаются почти в два раза (см. табл.).

Отметим также, что поворотной жесткости шарнира незначительно влияет на ваемые динамические системы. Таким образом, для тирования упруго-шарнирной можно рекомендовать

No	$\xi_\phi, \text{ Нм/с}^1$	Максимальное значение амплитуды колебаний, м		
		x	x_1	f
1	10	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
2	20	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Таблица
изменение
также
рассматри-
параметры
проект-
опоры
жесткость

опоры примерно $c_\phi = 2 \cdot 10^3 \text{ Нм/рад}$ с возможно высокой способностью шарнира к рассеиванию энергии. Также рассматривается случай, когда $c_\phi = 0$ («чистый» шарнир без диссипативного элемента). При этом колебания ротора возрастают, а его фазовый портрет показывает на неустойчивость системы при вращении с постоянной частотой. В работе рассматривается случай, когда дисковая опора и упругая подвеска имеют одинаковую жесткость: низкую - $c_1 = c_2 = 10^4 \text{ Н/м}$ и высокую - $c_1 = c_2 = 10^6 \text{ Н/м}$. В первом случае можно констатировать, что в динамике подвеска почти не колеблется (просто не успевает следить за процессом), и колебания ротора, а значит, и динамические нагрузки полностью воспринимают на себя дисковые опоры. Во втором случае колеблются и ротор, и подвеска ($x_{\max} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $x_{1\max} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$), но они двигаются в противофазе, и амплитуда относительных колебаний составляет $f = 2,6 \cdot 10^{-5}$.

Из вышесказанного следует, что необходимо правильно подобрать соотношение жесткостей дисковых опор и подвески.

Далее нами рассмотрено поведение системы при разных частотах вращения. На рис.3 приведены графики колебаний ротора и подвески, их фазовые портреты при исходных значениях коэффициентов жесткости и затухания опор, когда частота вращения ротора равна $\omega = 2500 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 6000 \text{ с}^{-1}$.

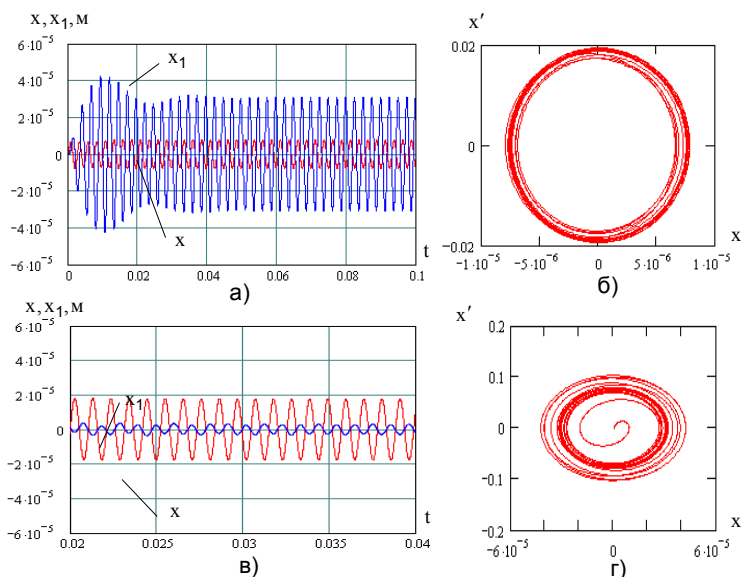


Рис. 3. Абсолютная амплитуда колебаний ротора (x), подвески (x_1) и фазовые портреты их колебаний при частоте вращения $\omega = 2500 \text{ с}^{-1}$ (графики а,б), $\omega = 6000 \text{ с}^{-1}$ (графики в,д)

Анализ результатов показывает, что при низких частотах вращения ротора доминантными являются колебания подвески. Амплитудное значение колебаний подвески составляет $x_{1\max} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, в то время как для основного ротора этот показатель равен лишь $x_{\max} = 0,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (рис. 2а). При увеличении частоты вращения ротора до $\omega = 6000 \text{ с}^{-1}$ наблюдается относительное уменьшение амплитуд колебаний подвески - $x_{1\max} = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, но при этом доминантными становятся колебания ротора - $x_{\max} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ (рис. 2в). Этот эффект позволяет предположить, что можно подобрать такие параметры системы, при которых амплитуды колебания этих двух элементов были бы равны и находились в одной фазе. Тогда упругая подвеска дисковой опоры будет работать в режиме динамического разгрузителя. Однако отметим, что динамическое разгружение опоры произойдет только на определенной частоте вращения ротора. Если даже можно будет достичь частичного разгружения дисковой опоры, то это значительно увеличит его долговечность, и тем самым

открывается реальная перспектива эксплуатации ротора на высоких частотах вращения. Изучение системы показало, что реально и эффективно этот процесс можно управлять с помощью жесткости дисковой опоры c_1 . На рис. 4 приведены совмещенные графики абсолютных колебаний ротора, подвески и относительного колебания этих элементов при разных частотах вращения с изменением c_1 .

Из графиков видно, что при вращении ротора с частотой $\omega = 1000 \text{ с}^{-1}$, когда $c_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, дисковая опора практически полностью разгружена. Этот режим наступает примерно через $0,01 \text{ с}$ (рис. 4а).

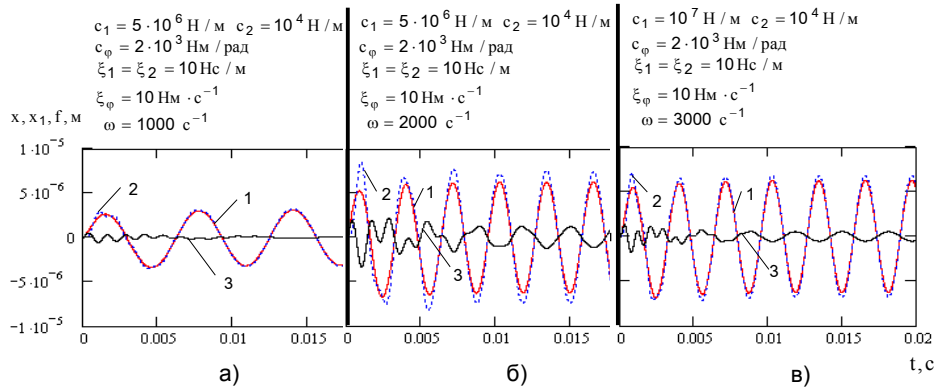


Рис. 4. Графики абсолютных амплитуд колебаний ротора x (кривая 1), подвески x_1 (кривая 2) и относительной амплитуды колебаний опорных дисков f (кривая 3)

При увеличении частоты вращения до $\omega = 2000 \text{ с}^{-1}$ отношение $f/x = 0,2$, т.е. опора разгружается на 80% (рис. 4б); при частоте вращения $\omega = 3000 \text{ с}^{-1}$ отношение $f/x = 0,5$ - эффективность разгрузки снижается. Но достаточно увеличить жесткость опоры до $c_1 = 1 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$, и f/x снижается до уровня 0,2 (рис. 4 в).

Таким образом, предложенный роторный узел можно весьма эффективно эксплуатировать при высоких частотах вращения ротора, если при этом целенаправленно подобрать основные характеристики жесткости и затухания упругих опор и подвесок. Самыми эффективными параметрами для управления процессом разгрузки наиболее проблемной дисковой опоры узла являются жесткости дисковой и шарнирной опор и диссипативный элемент в шарнирной опоре ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Արտոնագիր N 1840, A2: ՀՀ: Ռոտորի հենարանային հանգույց / **Ա.Պապոյան, Հ.Չախալյան**, հրատ. 15.09.2006, Արդ. սեփականություն. - N 3. - էջ 15-16:
2. **Кельзон А.С.** и др. Динамика роторов в упругих опорах. – М.: Наука, 1982.- 280 с.
3. **Папоян А., Чахалян А.** Теоретическое обоснование выбора динамической модели для новой конструкции высокоскоростного ротора с комбинированными опорами // Международная конференция по теории механизмов и механике машин: Тезисы докладов.- Краснодар, РФ. 2006. – С.179-181.
4. Вибрации в технике: Спр.- Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. - М.: Машиностроение, 1981. - 456 с.
5. **Кирьянов Д.В.** Самоучитель Mathcad 11.- СПб: БХВ – Петербург, 2004.- 560 с.

ГФ ГИУА. Материал поступил 15.03.2007.

Ա.Ռ. ՊԱՊՈՅԱՆ, Հ.Ս. ՉԱԽԱԼՅԱՆ

ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ՀԵՆԱՐԱՆՆԵՐՈՎ ԱՐԱԳՐՆԹԱՑ ՌՈՏՈՐԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՑՑԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ

Դիտարկվում է համակցված հենարաններում՝ (առաձգական պտտական հողակապ մի ծայրից և առաձգական կախոցով սկավառակային հենարան միջանկյալ տեղամասում) տեղակայված արագընթաց ռոտորի դինամիկան: Ստացված են դինամիկական մոդելը, համակարգի շարժման հավասարումները և հետազոտված է առաձգական-երկրաչափական պարամետրերի ազդեցությունը ռոտորի պտտման պայմանների վրա: Առաջարկված ալգորիթմը և հաշվման ծրագիրն օգտագործված են հենարաններում դինամիկական բեռնվածքների և տատանումների լայնության նվազարկման լավարկային խնդրի լուծման համար:

Առանցքային բառեր. արագընթաց ռոտոր, համակցված հենարաններ, շարժման հավասարումներ, լայնություն և փուլային պատկեր, հենարանի կոշտություն:

A.R. PAPOYAN, H.S. CHAKHALIAN

DYNAMICS OF HIGH-SPEED ROTOR ASSEMBLY WITH COMBINED SUPPORTS

The dynamics of high-speed rotor settled on combined supports - resilient rotary hinge at one end and a disk support with resilient bracket in the intermediate part of the rotor is considered. The dynamic model and equations of the system motion are worked out. The influence of elastic-geometric parameters on conditions of rotor's rotation is investigated. The proposed algorithm and program of calculation are used for solution of optimization problems to minimize dynamic loads in supports and the amplitude of rotor's vibration.

Keywords: high-speed rotor, combined supports, equations of motion, amplitude and phase portrait, support stiffness.

С.А. БАБАЯН

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ВИТКАМ РЕАЛЬНОЙ КОНИЧЕСКОЙ РЕЗЬБЫ

Рассмотрено распределение нагрузки по непрерывным виткам конических резьбовых соединений типа “болт-гайка” и “стяжка”, для которых на основе условия совместности деформации тела и витков болта и гайки получены дифференциальные уравнения, решаемые численными методами. Изучено влияние на распределение нагрузки таких параметров резьбы, как отклонения конусности и шага. Выведено условие равномерного распределения нагрузки путем расчёта соответствующих отклонений элементов резьбы.

Ключевые слова: виток, резьба, зазор, конусность, нагрузка.

Закон распределения нагрузки по виткам конического резьбового соединения установлен в работе А.Е. Сарояна [1]. При решении задачи был использован метод, предложенный Н.Е. Жуковским: винтовая нарезка заменена кольцеобразными выступами, которые под воздействием приложенных сил подвергаются деформациям сдвига. Нагрузка на каждый виток определяется из системы уравнений, число которых равно количеству витков резьбы.

В отличие от рассмотренной схемы, в [2] закон распределения усилий по виткам идеальной конической резьбы определен с использованием метода И.А. Биргера [3], учитывающего конечное число непрерывных витков, подверженных деформациям сдвига и изгиба. Помимо этого представляется возможным приближенно учесть влияние отклонений элементов реальной резьбы.

Для соединения типа стяжки с переменными площадями поперечного сечения тела болта и гайки уравнение совместности деформаций записывается в виде [2]

$$\int_0^z Q(z) / [E_1 F_1(z)]^{-1} dz - \int_0^z [Q - Q(z)] / [E_2 F_2(z)]^{-1} dz = q(z) \cdot \gamma(z) - q(0) \gamma(0),$$

$$\int_0^r Q(z) dr / E_1 F_1(z) - \int_0^r [Q - Q(z)] dr / E_2 F_2(z) = q(z) \cdot \gamma(z) - q(0) \gamma(0),$$
(1)

где $Q(z)$ - величина осевой силы, действующей в сечении z ; Q - полная осевая нагрузка в соединении; E_1 и E_2 - модули упругости материала болта и гайки; $F_1(z)$ и $F_2(z)$ - площади поперечного сечения тела болта и гайки в сечении z ; $\gamma(z)$ и $\gamma(0)$ - величины, характеризующие податливость витков болта и гайки в сечениях z и $z=0$; $q(z)$ и $q(0)$ - интенсивность распределения осевых сил на боковой поверхности стержня болта в тех же сечениях.

Величина γ для цилиндрического резьбового соединения определяется по формуле [3]

$$\gamma = S_0^2 (\lambda_1 / E_1 + \lambda_2 / E_2) / f,$$

Граничные условия для неизвестной функции $Q(z)$ следующие: при $z=0$ - $Q(0)=0$; при $z=H$ - $Q(H)=Q$.

Ввиду незначительного угла уклона конической нарезки ($\varphi_{\max}=7^{\circ}7'30''$) значение коэффициента ω можно принять таким же, как и для цилиндрического соединения [3].

Распределение нагрузки по виткам конической резьбы для соединения типа «болт-гайка» получено в виде [2]

$$\int_0^z Q(z)[E_1 F_1(z)]^{-1} dz + \int_0^z Q(z)[E_2 F_2(z)]^{-1} dz = q(z)\gamma(z) - q(0)\gamma(0). \quad (5)$$

Уравнения (1) и (5) после соответствующих дополнений позволяют приближенно оценить влияние точности изготовления реальной резьбы на распределение нагрузки.

Рассмотрим влияние трех основных элементов конической резьбы: отклонений конусности, шага и половины угла профиля. Полагаем, что в соединении имеют место накопленные погрешности шага, и эти отклонения одинаковы для всех витков. Будем считать также, что в соединении, изготовленном с отклонениями конусности резьбы, все соответствующие точки профиля лежат на одной прямой. На рис. 2 показаны схемы соединений с отклонениями конусности резьбы при сопряжениях по большому (а) и малому (б) диаметру конуса.

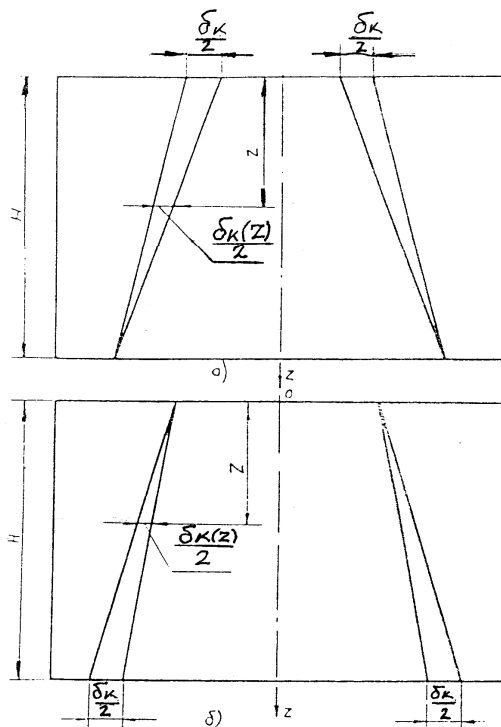


Рис. 2. Схема соединения с отклонениями конусности: а – сопряжение по большому диаметру; б – сопряжение по малому диаметру

Во втором случае между витками резьбы образуется дополнительный диаметральный зазор, изменяющийся от нуля (в сечении $z=0$) до максимального значения δ_k суммарного отклонения конусности ниппеля и муфты в сечении $z=H$.

Осевой зазор между витками в сечении с координатой z будет

$$\Delta_k(z) = (2H)^{-1} \delta_k(z) \cdot \operatorname{tg} \alpha / 2 = Kz. \quad (6)$$

Тогда условие совместности деформаций для конического соединения типа «болт-гайка» при наличии отклонений конусности примет вид

$$\int_0^z Q(z)[E_1 F_1(z)]^{-1} dz + \int_0^z Q(z)[E_2 F_2(z)]^{-1} dz = q(z)\gamma(z) - q(0)\gamma(0) + \Delta_k(z). \quad (7)$$

Продифференцировав (7) по z , получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = -K. \quad (8)$$

В первом случае при сопряжении по большому диаметру конуса (рис. 2а) имеем

$$\Delta_k(z) = K(H - z). \quad (9)$$

С учетом (7) и (9) получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = \pm K. \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает закон распределения нагрузки по виткам конической резьбы в соединении типа «болт-гайка» с учетом отклонений конусности резьбы.

Аналогично, с учетом [2], для соединения типа стяжки получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = -Q[E_2 F_2(z)]^{-1} \pm K. \quad (11)$$

В уравнениях (10) и (11) знак “плюс” при коэффициенте «К» соответствует отклонениям, обуславливающим сопряжение по большому диаметру конуса, знак “минус” – при сопряжении по малому диаметру.

В соединениях, изготовленных с погрешностями в шаге так же, как и при отклонениях конусности, в недеформированном состоянии образуется дополнительный осевой зазор

$$\Delta_s(z) = \delta_s z / H = \lambda z, \quad (12)$$

где δ_s – накопленная по всей длине соединения разница в шаге гайки и винта. В случае, когда шаг винта больше шага гайки, имеем

$$\Delta_s(z) = \lambda(H - z). \quad (13)$$

По аналогии с (10) и (11) с учетом соотношений (12) и (13) получим

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = \pm(K + \lambda), \quad (14)$$

$$\gamma(z)Q''(z) + \gamma'(z)Q'(z) - \beta(z)Q(z) = -Q[E_2 F_2(z)]^{-1} \pm (K + \lambda) \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) описывают закон изменения нагрузки по длине конического соединения при наличии отклонений конусности и шага.

Представляет интерес определение закона изменений отклонений элементов резьбы (например, конусности) из условия равномерного распределения усилий по виткам. В этом случае $\Delta_k(z)$ в уравнении (11) является искомой функцией.

При равномерном распределении нагрузки по виткам имеем

$$Q(z) = Qz / H; Q'(z) = Q / H; Q'' = 0.$$

Учитывая эти соотношения, дифференцируя по z уравнение (11), получим

$$-\gamma'(z)Q + \beta(z)Qz = H\Delta'_K(z). \quad (16)$$

После интегрирования выражения (16) находим

$$H\Delta_K(z) = Q[\gamma(0) - \gamma(z)] + Q \int_0^z \beta(z) \cdot z \cdot dz. \quad (17)$$

Имея в виду (2) и (4) и раскрывая интеграл в (17), получим

$$\begin{aligned} \Delta_K(z) = & QH^{-1}[\gamma(0) - \gamma(z)] + [2\pi EHtg^2\varphi]^{-1}Q\{\ln[(R_1 + ztg\varphi)^2 - r_b^2] \times \\ & \times (R_1^2 - r_b^2)^{-1} + + R_1 r_b^{-1} \ln(R_1 + ztg\varphi + r_b)(R_1 - r_b) \times \\ & \times [(R_1 + ztg\varphi - r_b)(R_1 + r_b)]^{-1} - \\ & - \ln[R^2 - (R_1 + ztg\varphi)^2](R^2 - R_1^2)^{-1} - R_1 R^{-1} \ln(R + R_1 + ztg\varphi)(R - R_1) \times \\ & \times [(R - R_1 - ztg\varphi)(R + R_1)]^{-1}\}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\gamma(z)$ и $\gamma(0)$ определяются из выражения (3).

Формула (18) определяет изменение осевого зазора в соединении типа «болт-гайка», обеспечивающего равномерное распределение нагрузки по виткам конической резьбы. Закономерность изменения разницы шагов гайки и винта $\Delta s(z)$ для обеспечения равномерного распределения нагрузки по виткам находится аналогично.

Полученные зависимости были использованы для расчета предельных отклонений элементов конической резьбы и учтены в ГОСТ 5286-75 «Замки для бурильных труб», а также в его последующих переизданиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сароян А.Е. Проектирование бурильных колонн. – М.: Недра, 1971.
2. Бабаян С.А. и др. Распределение нагрузки по виткам конической резьбы // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1972. – № 1.
3. Биргер И.А. Расчет резьбовых соединений. – М.: Оборонгиз, 1959.

Арцахский госуд. ун-т.

Материал поступил в редакцию 24.04.2007.

Ս.Հ. ԲԱԲԱՅԱՆ

ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ ԲԱՇԽՈՒՄԸ ԻՐԱԿԱՆ ԿՈՆԱԿԱՆ ՊԱՐՈՒՐԱԿԻ ԳԱԼԱՐՆԵՐՈՎ

Քննարկված է բեռնվածքի բաշխումը «առձգիչ», հեղույս, մանեկ տիպի կոնական պարուրակաձև միացությունների անընդհատ գալարներով, որոնց համար հեղույսի ու մանեկի գալարների ու իրանի դեֆորմացիաների համատեղության պայմանի հիման վրա ստացվել է դիֆերենցիալ հավասարում, որը լուծվում է թվային մեթոդներով: Ուսումնասիրվել է բեռնվածքի ազդեցությունը բաշխման վրա իրական պարուրակի այնպիսի պարամետրերի համար, ինչպիսիք են կոնաձևության շեղումը և քայլը: Դուրս է բերվել բեռնվածքի հավասարաչափ բաշխման պայմանը, որն ապահովում է պարուրակի տարրերի համապատասխան հաշվարկը: Նոր ստանդարտներով մշակված առաջարկները հաշվի են առնվել գործողների վերանայման ժամանակ:

Առանցքային բառեր. գալար, պարուրակ, բացակ, կոնականություն, բեռնվածություն:

S.H BABAYAN

DISTRIBUTION OF REAL CONIC THREADING SPIRE LOAD

The distribution of continuous spire load of such conic threading junctions like “bolt -nut” and “tie” (rod, brace, stay) is considered. Using the numerical method of solution, we have deduced a differential equation based on the condition of simultaneous deformation of the body and spires of the bolt and nut. The influence of such parameters of real threading like concavity and pitch deviations on load distribution has been studied. The condition of even load distribution which is supported by the analysis of the thread element deviations is formulated.

Keywords: spire, thread, gap, concavity, load.

З.А. БЕЛЛУЯН, С.З. БЕЛЛУЯН

МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПОДШИПНИКОВОГО И КОНТАКТНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Рассматриваются причины снижения надежности вследствие возникновения мгновенных и износовых отказов из-за старения и пиковых нагрузок элементов в контактно-щеточных и подшипниковых узлах синхронных генераторов мощностью до 100 кВт общепромышленного назначения. Приведены методы расчета надежности вышеуказанных узлов. Определены значения параметров, входящих в расчетные формулы.

Ключевые слова: контактно-щеточный и подшипниковый узлы, пиковая нагрузка, скорость, математическое ожидание, нормальное распределение, интенсивность отказа, надежность.

В процессе проектирования генераторов используют некоторый набор стандартных распределений. При испытаниях генераторов и их узлов необходимо проникнуть в физическую суть возникновения отказов.

В данной работе, с целью разработки мер по повышению надежности генераторов, произведен анализ мгновенных и постепенных отказов, возникающих в контактно-щеточных и подшипниковых узлах генераторов на стадии их эксплуатации и испытаний.

Среди причин возникновения отказов важное место занимают старение и воздействие пиковых нагрузок на элементы контактно-щеточного (электрощетки, контактные кольца) и подшипникового (подшипники) узлов при их эксплуатации.

Сколь совершенна ни была бы конструкция генератора и узлов и технология их производства, с течением времени материалы, из которых изготовлены элементы, претерпевают необратимые изменения. Эти изменения порождаются коррозией, износом, накоплением деформаций и усталости, диффузией одного материала в другой и т.п. Даже в одном элементе эти процессы налагаются друг на друга, взаимодействуют друг с другом и, в конечном счете, вызывают изменения рабочих характеристик. Так, изменение зазора в трущейся паре вал-подшипник происходит по мере вращения вала. В сопряжении поверхностных слоев идут сложные процессы окисления, упрочнения и накопления усталости, абразивного резания и схватывания за счет адгезии. Наложение этих процессов приводит к постепенному увеличению зазора и потере работоспособности подшипника. Зазор в сопряжении должен лежать в пределах, обеспечивающих безударное движение и отсутствие сухого трения.

В случае, когда рабочая характеристика выходит за заданные пределы, подшипник работает неудовлетворительно, и это квалифицируется как отказ.

В общем случае рабочая характеристика под влиянием старения может изменяться немонотонно, однако в большинстве случаев она меняется монотонно. Дальнейшие рассуждения будут основаны на предположении о монотонном характере изменения рабочих характеристик. Обозначим через $\eta(t)$ величину рабочей характеристики в момент времени t . Изменения $\eta(t)$ во времени обуславливаются как внешними факторами, так и ходом физических процессов, протекающих внутри генераторов и их узлов. Примем, что $\eta(t)$ зависит от времени линейным образом и описывается уравнением [1]

$$\eta(t) = \alpha t + \beta_0. \quad (1)$$

Очевидно, что $\alpha = d\eta(t)/dt$, и отказ возникает при $\eta(t) \geq M$ и $\beta = \eta(0)$.

В этом случае время безотказной работы τ определяется формулой

$$\tau = (M - \beta)/\alpha.$$

Средняя скорость износа для элементов генератора меняется во времени. Скорость наполнения усталости в металлах убывает во времени [2]. Общее описание поведения скорости износа $V_{из}(t)$ может быть дано в виде [1]

$$V_{из}(t) = V_1(t) + V_2(t) \cdot \rho(t), \quad (2)$$

где $V_1(t)$ и $V_2(t)$ - некоторые детерминированные функции, а $\rho(t)$ - случайный процесс, обладающий свойством стационарности.

В значительной части случаев достаточным является представление скорости в виде

$$V_{из}(t) = V_2(t) \cdot \rho(t).$$

Так, если $V_2(t) = at + b$, то скорость в среднем будет расти, а если $V_2(t) = a/(b + t)$, то будет убывать.

Не нарушая общности, можно принять математическое ожидание $M\{V_{из}(t)\} = V_2(t)$, а дисперсии $\rho(t)$ и $V_{из}$ определяются в виде

$$M\{\rho(t)\} = 1; \quad D\{V_{из}(t)\} = V_2^2(t) \cdot D\{\rho(t)\}.$$

Рассмотрим схему износа, обладающую следующими свойствами: средняя скорость износа постоянна; начальное качество узлов полностью однородно; скорость износа подвержена случайным вариациям; возникла ситуация, когда r повреждений приводят к отказу элемента (узла). Повреждения вызваны тем, что износ увеличивается скачкообразно на некоторую постоянную величину u . Процесс износа всегда имеет, по крайней мере, три зоны (см. рис.) [1,3].

Зона I называется зоной приработки. В процессе приработки трущейся пары вал - подшипник, электрошетка - контактное кольцо происходит направленное изменение шероховатостей поверхности. Скорость износа в этот период постепенно уменьшается. Характерной особенностью приработки является взаимная зависимость приращения износа. Поэтому приращение износа на участке времени от T до $(T + \Delta_T)$ зависит от его величины в предшествующий момент времени T .

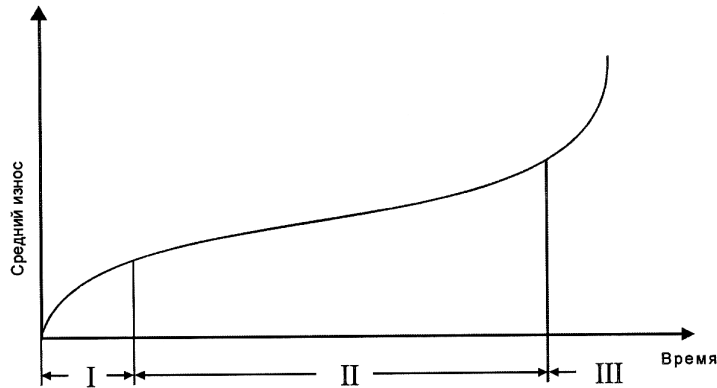


Рис. Кривая зависимости износа от времени

Зона II называется зоной установившегося или нормального износа. Применительно к трущейся паре зона нормального износа характерна постоянством рельефа шероховатостей и постепенным ростом зазора без изменения физической картины взаимодействия вала с подшипником и электрощетки с контактным кольцом. В этой зоне две величины приращений взаимонезависимы.

Зона III – катастрофический износ, при котором изменения в состоянии поверхности носят направленный характер, приращения в этой зоне взаимозависимы. С момента начала катастрофического износа идет направленное ухудшение качества поверхности, увеличивается ее шероховатость, возникает схватывание с последующим вырыванием крупных частей и разрушение. При катастрофическом износе изменения в состоянии элемента носят направленный характер, приращения износа в этой зоне взаимно зависимы.

Рассмотрим модель процесса изнашивания, когда приработка уже закончена, а катастрофический износ, как показали исследования, еще не наступил. Результаты исследования показали, что средняя скорость износа электрощеток ЭГ-14, применяемых в синхронных генераторах мощностью до 100 кВт, постоянна [3, 4].

При соблюдении постоянства средней скорости износа и случайных вариаций внешних условий (изменение влажности, температуры и т.д.) плотность вероятности распределения времени t представится в виде

$$f(T) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(r)} \lambda^r (T - t_0)^{r-1} e^{-\lambda(T-t_0)}, & T \geq t_0, \\ 0, & T < t_0, \end{cases} \quad (3)$$

где t_0 - порог чувствительности (гарантийный срок службы); $\Gamma(r)$ – гамма- функция.

Обозначив $u = T - t_0$, получим плотность распределения вероятности:

$$f(u) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(r)} \lambda^r u^{r-1} e^{-\lambda u}, & u \geq 0, \\ 0, & u < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Параметры распределения определяются по формулам [3, 4]

$$\lambda = 2 \frac{S_{\tau}^2}{m_1}, \quad r = 4 \frac{(S_{\tau}^2)^3}{(m_3)^2}, \quad t_0 = \bar{\tau} - \frac{2(S_{\tau}^2)^2}{m_3}, \quad (5)$$

где $\bar{\tau}$ и S_{τ}^2 - эмпирические значения средней и дисперсии времени безотказной работы элементов; m_3 - центральный момент третьего порядка, определяемый по [1]; r - число (количество) повреждений (износов).

Исследования, проведенные многочисленными авторами, показали, что число повреждений для электрощеток и подшипников за время их эксплуатации $t=10000$ ч составляет $r \geq 12$. В этом случае гамма-распределение приближается к нормальному и максимальная погрешность почти меньше 7... 8 % [1, 4].

Плотность нормального распределения выражается по формуле [1]

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{r/\lambda^2}} e^{-\frac{(T-\tau/\lambda)^2}{2r/\lambda^2}}. \quad (6)$$

Обозначив $c = r/\lambda$ и $\sigma = \sqrt{r/\lambda^2}$, формула примет вид

$$f(T) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-c)^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

Параметры нормального распределения, среднее c и среднеквадратическое отклонение σ определяются на основе опытных данных об износе или о величинах τ_i . При наличии реализации износа необходимо по описанной выше методике найти λ и r , а затем c и σ . Если имеются опытные данные о времени безотказной работы N -го количества элементов $(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)$, то следует вычислить τ и S_{τ}^2 , затем принять, что $c = \bar{\tau}$, $\sigma^2 = S_{\tau}^2$.

Переход от гамма-распределения к нормальному создает большие вычислительные удобства как из-за наличия подробных таблиц функции Лапласа, так и за счет сравнительной простоты функционального вида этого распределения.

Теоретико-экспериментальные исследования, проведенные на электрических машинах мощностью до 100 кВт, показали, что скорость износа электрощеток определяется выражением

$$V = k P_{\max} 2\pi R_k n,$$

где $P_{\max}$ - давление, с помощью которого прижата поверхность щетки к кольцу или коллектору; R_k - радиус кольца или коллектора, по которому

вращаются электросчетки; n – число оборотов в секунду; k – жесткости пружин, значения которых приведены в [1].

Износ подшипников с течением времени в зависимости от скорости вращения вала определяется выражением

$$m_{\Sigma} = m_1 n^2 T,$$

где T – время работы подшипника; n – число оборотов вала.

Если известно критическое значение износа $m_{кр}$ вала, при котором наступает касание движущихся частей с неподвижными, например, якоря с поверхностью полюсов, то надежность подшипников определится выражением [1, 2]

$$P = 1 - \int_{-\infty}^m e^{-(m-\bar{m})/2\sigma^2} dm, \quad (8)$$

где износ m представится в виде

$$m = \ell_0 2\pi R_0 h,$$

ℓ_0 – длина подшипника; R_0 – радиус изнашиваемого участка; h_x – глубина износа.

Подшипниковый узел генераторов состоит из элементов – подшипников, колец, шариков и пр. Все функции распределения i -го элемента $F_i(T)$ таковы, что при $T(0)$ имеет место равенство

$$F_i(T) = gT^\gamma + 0(T^\gamma), \quad (9)$$

где $g > 0$, $\gamma > 0$.

Как показано в [1,4], при больших k функция распределения $F(T)$ хорошо аппроксимируется выражением типа

$$F(T) = \begin{cases} 1 - e^{-T^\gamma/\beta}, & T \geq 0, \\ 0, & T < 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $\beta = 1/g^k$.

Это распределение называется распределением Вейбулла-Гнеденко. Плотность $f(T)$ и интенсивность отказов $\lambda(T)$ этого распределения имеют вид

$$f(T) = \begin{cases} e^{-T^\gamma/\beta} \frac{\gamma}{\beta} T^{\gamma-1}, & T > 0, \\ 0, & T < 0, \end{cases}, \quad \lambda(T) = (\gamma/\beta) T^{\gamma-1}. \quad (11)$$

Если $\tau^{(i)}$ есть случайное время срока службы по i -му элементу, то время безотказной работы подшипникового узла в целом определяется соотношением

$$\tau = \min(\tau^{(1)}, \tau^{(2)}, \dots, \tau^{(k)}).$$

Оценка параметров распределения Вейбулла-Гнеденко по известной величине $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$ времени безотказной работы N генераторов по отказам подшипниковых узлов производится следующим образом.

Выбираются границы разбиений θ_1 и θ_2 , $\theta_1 < \theta_2$ и подсчитываются количества значений τ_j , лежащих в диапазонах $(0, \theta_j)$, $j=1,2$. Пусть эти количества равны $m(\theta_j)$. Находятся отношения: $v(\theta_j) = m(\theta_j)/N$.

Параметры γ и β оцениваются по формулам

$$\gamma = \frac{\ln \ln \left[\frac{1}{1-v(\theta_1)} \right] - \ln \ln \left[\frac{1}{1-v(\theta_2)} \right]}{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}, \quad \beta = \theta_1^\gamma / \ln \left[\frac{1}{1-v(\theta_1)} \right]. \quad (12)$$

Исследования старения изоляционных материалов показали, что размер наибольшего дефекта в элементах является функцией абсолютной температуры.

Как показано в [1, 3], старение элементов S происходит по уравнению

$$\ln S = \ln S_0 - k t e^{-Q/E}, \quad (13)$$

где Q – энергия активации; E – энергия реакции; k – константы, характеризующие размер дефекта, зависящие от материала, функции концентраций реагирующих веществ, а также их природы; t – долговечность (срок службы).

Для изоляционных материалов часто используют так называемый закон “десяти градусов”. Он гласит, что долговечность изоляции уменьшается вдвое при повышении рабочей температуры на каждые 10 °С.

Как показал анализ причин отказов в контактно-щеточном и подшипниковом узлах генераторов, в процессе эксплуатации одновременно действуют “пиковые” нагрузки и износ. Действие износа сказывается в постепенном снижении предельно допустимого уровня нагрузки, а превышение этого уровня “пиком” нагрузки приводит к отказу. Износ и мгновенное повреждение, приводящие к отказу, зависят от предельно допустимой нагрузки.

Пусть имеются причины $\Pi^{(1)}$ и $\Pi^{(2)}$, действующие параллельно и независимо друг от друга. Если причина 1 вызвала отказ, то время безотказной работы будет $\tau^{(1)}$, а причина 2 вызывает отказ с временем безотказной работы $\tau^{(2)}$.

Сказанное позволяет утверждать, что время безотказной работы τ задается равенством

$$\tau = \min(\tau^{(1)} \tau^{(2)}). \quad (14)$$

Если $F_i(T)$ есть функция распределения времени безотказной работы $\tau^{(i)}$ при изолированном действии i -й причины и одновременно действует несколько причин отказов, что наиболее типично на практике, то функция распределения времени τ представится как

$$F(T) = 1 - [1 - F_1(T)] \cdot [1 - F_2(T)]. \quad (15)$$

Функция распределения контактно-щеточного и подшипникового узлов в соответствии с [3] определится формулой

$$F(T) = 1 - e^{-\lambda T} \left[1 - \Phi \left(\frac{T - c}{\sigma} \right) \right], \quad (16)$$

а плотность этого распределения задается равенством

$$f(T) = e^{-\lambda T} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(T-c)^2/2\sigma^2} + \lambda \left(1 - \Phi \frac{T-c}{\sigma} \right) \right]. \quad (17)$$

Для генераторов мощностью до 100 кВт нами проведены испытания на надежность и определены параметры, входящие в расчетные формулы.

Во время испытаний для контактно-щеточного и подшипникового узлов в качестве отказов принимаются: заклинивание подшипника; резкое увеличение температуры, шума и вибрации сверх установленных уровней; превышение температуры сверх 150 °С; преждевременный предельный износ щетки; значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных вылетающих искр в установившемся режиме; повреждение траверсы и щеткодержателя; пробой изоляции контактных колец и траверсы; сильный подгар контактных колец.

Анализ эксплуатации и испытаний синхронных генераторов мощностью до 100 кВт показал, что в контактном кольце, электрощетке, щеткодержателе и соединительных подводящих проводах контактно-щеточного узла могут произойти только внезапные отказы, а в электрощетках и контактных кольцах – как внезапные, так и постепенные (износные) отказы. Значения интенсивностей отказов этих элементов приведены в таблице [4].

Таблица

Значения интенсивностей отказов электрощеток, 1/ч

Щеткодержатель	Щетка электрографитная	Контактное кольцо	Соединительный провод
0,2·10 ⁻³	0,07·10 ⁻⁵	0,16·10 ⁻⁵	0,05·10 ⁻⁵

Методы расчета надежности подшипникового и контактно-щеточного узлов синхронных генераторов мощностью до 100 кВт приведены в [1,5]. По указанной методике произведен расчет надежности этих узлов для генератора типа ОС-72 (мощностью 8 кВт) за время гарантийного срока службы $t = 8000$ ч, которая составляет 0,862.

По данным эксплуатации, надежность этих узлов за время гарантийного срока службы $t = 8000$ ч составляет 0,815. Сравнение эксплуатационных данных с расчетными показало малое расхождение между ними, что подтверждает правильность приведенных выше рассуждений.

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что проникновение вглубь явления отказа, подробное обследование причин снижения надежности, тщательный учет влияния производственно-технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов способствуют расчету надежности как необходимая часть исследования. Только в этом случае исследования будут служить источником для разработки мер по повышению качества и надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М.: Советское радио, 1966. – 167 с.
2. Серенсен С.В., Кагаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. – М.: Машгиз, 1963. – 264 с.
3. Гнеденко Б.И., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 497 с.
4. Отраслевой стандарт ОСТ 16 0.800.887-81 Генераторы синхронные мощностью до 1000 кВт. Надежность. Общие требования к надежности и методам контроля (ответственный исполнитель Беллуян З.А.) – 71 с.
5. Беллуян З.А. Надежность механических узлов генераторов // Международный научный журнал “Проблемы прикладной механики”. – Тбилиси, 2003. – № 4(13). – С. 103-107.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.01.2007.

Զ.Ա. ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ, Ս.Զ. ԲԵԼԼՈՒՅԱՆ

ՄԻՆԻՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՌԱՆՑՔԱԿԱԼՆԵՐԻ ԵՎ ԿՈՆՏԱԿՏԱ-ԽՈՋԱՆԱԿԱՑԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՄՈՂԵԼՆԵՐԸ

Քննարկված են հուսալիության նվազեցմանը հանգեցնող մոդելներն ինչպես ակնթարթային, այնպես էլ մաշվածքային խափանումների ընթացքում, որոնք հանդես են գալիս կոնտակտա-խոզանակային և առանցքակալային հանգույցներում: Բերված են նշված հանգույցների հուսալիության հաշվարկման մեթոդները, որոշված են այն պարամետրերի արժեքները, որոնք բերված են հաշվարկման բանաձևերում:

Առանցքային քառեր. կոնտակտա-խոզանակային և առանցքակալային հանգույցներ, գերբեռնվածություն, արագություն, մաթեմատիկական սպասում, նորմալ բաշխում, խափանման ինտենսիվություն, հուսալիություն:

Z.A. BELLUYAN, S.Z. BELLUYAN

FAILURE MODELS OF THE BEARING AND BRUSH CONTACT LINKS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

The models bringing to the decrease in the reliability at both instantaneous and fatigue failures are discussed. These models act in brush contact and bearing links. The methods for calculating the reliability of the mentioned links are introduced, the values of the parameters introduced in the calculating formulae are defined.

Keywords: brush and bearing contact links, peak load, speed, mathematical expectation, normal distribution, failure intensity, reliability.

З.А. БАБАЯН

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Предлагается методологический подход к разработке методики выполнения измерений (МВИ) с применением автоматизированных информационно-измерительных систем (АИИС) в больших камнеобрабатывающих предприятиях по контролю качества полированности. Метод позволяет существенно снизить затраты интеллектуальных ресурсов на разработку и свести к минимуму вероятность ошибок при формировании многочисленных отчетных материалов.

Ключевые слова: методика выполнения измерений, контроль качества, автоматизированные информационно-измерительные системы.

Основной задачей при разработке МВИ с использованием АИИС становятся: выбор номенклатуры и способов нормирования метрологических характеристик, расчет погрешностей измерительных каналов (ИК) по погрешностям входящих в них измерительных компонентов, их идентификация, методы контроля и учета переменных влияющих факторов в пространственно распределенных измерительных системах. Решение этой задачи представляет собой довольно трудоемкий процесс, связанный с необходимостью обработки больших объемов данных о типах измерительных компонентов, их метрологических характеристиках (МХ), взаимосвязях, условиях применения. Причем трудоемкость увеличивается примерно пропорционально квадрату суммы количества каналов и типов измерительных компонентов.

Предлагаемый путь кардинального снижения трудоемкости, а точнее, линеаризации зависимости трудоемкости от количества, подразумевает специальный методологический подход, заключающийся в представлении структуры АИИС в виде реляционной базы данных (БД), а методов измерений и измерительных процедур - в виде набора программ, взаимодействующих с этой БД. При таком подходе модель АИИС становится инвариантной как к количеству ИК и измерительных компонентов, входящих в состав канала, так и к типу этих компонентов и к виду измеряемых величин.

Использование единой БД с представлением пользователям различных уровней доступа позволяет автоматизировать процесс обработки информации и сосредоточиться на его творческих аспектах, значительно снижает возможность использования неактуальных данных, позволяет оперативно контролировать ход выполнения проекта и оценить объем и состав недостающей информации, выявлять противоречия в исходных данных.

Для выполнения работы по разработке МВИ создают БД, в структуре которой выделяют три основные таблицы (рис.1): для хранения данных о месте и условиях применения компонентов в АИИС (COMPONENT); для хранения данных о контролируемом параметре технологического или учетного процесса

(PROCESS) и для хранения технических данных о компоненте (COMPONENTTYPE). В таблицах PROCESS и COMPONENTTYPE связи между записями внутри одной таблицы отсутствуют («плоская» структура данных), тогда как в таблице COMPONENT существуют связи типа двусвязного списка между записями, соответствующими компонентам, входящим в один и тот же ИК. При этом началом списка является запись с данными о датчике, концом - запись с данными о конечном компоненте ИК, например, автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора с установленным специализированным управляющим программным обеспечением (ПО). Для организации двусвязного списка используются специально введенные поля INPUT и OUTPUT (рис.2). Двусвязный список позволяет автоматически восстанавливать состав ИК АИИС, а связь компонентов с таблицами PROCESS и COMPONENTTYPE - автоматически вычислять метрологические характеристики ИК и выполнять иные аналитические действия, например, моделирование влияния различных факторов на метрологические характеристики ИК.

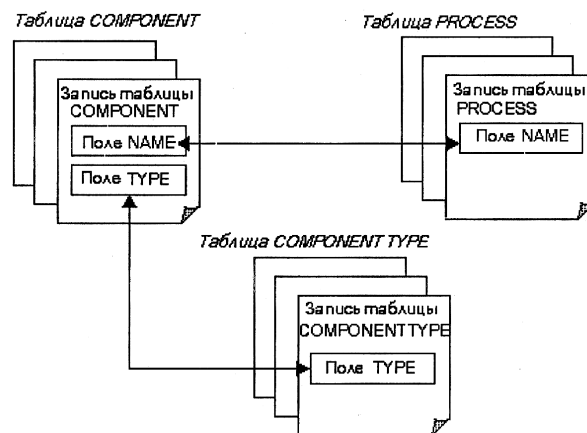


Рис.1. Связь между таблицами БД АИИС

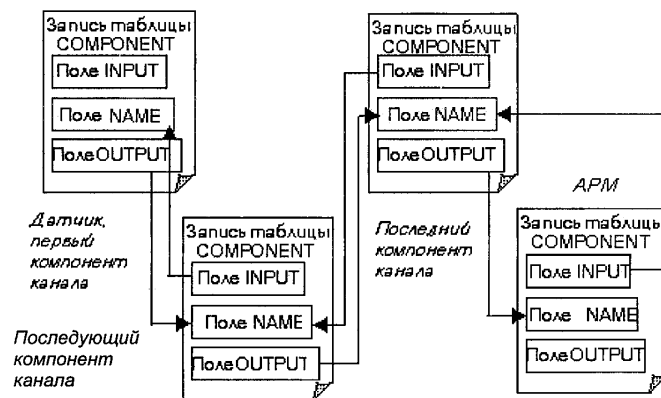


Рис.2. Связь между записями таблицы COMPONENT

Такая структура таблицы COMPONENT позволяет строить измерительные каналы из множества компонентов. Примеры структуры данных в таблицах БД и описания поля записи приведены в табл. 1-4. Все ПО написано на языке Perl, имеющем в настоящий момент наиболее развитые средства для работы со строковыми данными (в т.ч. средства интерпретации регулярных выражений), которые просты для понимания и легко адаптируются для работы с различными формами входящих и исходящих данных. Описание БД выполнено на языке SQL, являющемся промышленным стандартом, что обеспечивает переносимость БД на разные платформы. Развитие предложенного подхода представляется возможным при создании БД, содержащей описания типов СИ. Эта БД должна иметь открытую структуру, позволяющую хранение МХ СИ, предусмотренных действующими стандартами, наиболее общим из которого является ГОСТ 8.009-84. Главным элементом этой БД должна быть таблица COMPONENT TYPE, в которой будет содержаться информация с МХ СИ. В оптимальном варианте эта таблица должна быть электронным аналогом раздела «Основные технические характеристики».

Таблица 1

Структура данных таблицы COMPONENT БД АИИС

Имя поля	Назначение
INPUT	Ссылка на поле NAME предыдущего компонента ИК
OUTPUT	Ссылка на поле NAME следующего компонента ИК
NAME	Обозначение компонента
TYPE	Тип компонента (с указанием модификации и т.п.)
Другие поля, характеризующие условия применения компонента	

Таблица 2

Структура данных таблицы PROCESS БД АИИС

Имя поля	Назначение
NAME	Обозначение компонента
GOAL	Описание функционального назначения (цели использования) компонента
Другие поля, характеризующие процесс измерения	

Таблица 3

Структура данных таблицы COMPONENT TYPE БД АИИС

Имя поля	Назначение
TYPE	Тип компонента с указанием модификации
DESCRIPTION	Краткое описание
INPUTRANGELOW	Нижний предел измерений
INPUTRANGEHIGH	Верхний предел измерений
MEASURAND	Измеряемая величина
UNIT	Единица измерений
ACCURACYTYPE	Способ нормирования погрешности
ACCURACYVALUE0	Численное значение погрешности

ACCURACYVALUE1	Дополнительное значение для выражения погрешности (второй член в двучленной формуле предела погрешности и т.п.)
TEMPERATURENOR-MAL LOW	Нижний предел температуры применения, при котором еще не нормируется дополнительная погрешность, °C
TEMPERATURENOR-MAL HIGH	Верхний предел температуры применения, при котором еще не нормируется дополнительная погрешность, °C
TEMPERATUREWOR-KING LOW	Нижний предел температуры применения, °C
TEMPERATUREWOR-KING HIGH	Верхний предел температуры применения, °C
ORMALTEMPERATURE	Нормальная температура применения
TEMPERATUREERROR	Дополнительная погрешность от температуры в долях основной на 1°C отклонения от нормальной температуры

...

Поля, описывающие метрологические характеристики компонента, например, по ГОСТ 8.009	
OUTPUTSIGNAL	Тип выходного сигнала
OUTPUTSIGNALUNIT	Единица измерений выходного сигнала
OUTPUTSIGNALLOW	Нижний предел выходного сигнала
Имя поля	Назначение
OUTPUTSIGNALHIGH	Верхний предел выходного сигнала
REGISTRYNUMBER	Номер в Госреестре СИ
NOTES	Дополнения и примечания

Таблица 4

Поле ACCURACYTYPE таблицы COMPONENT TYPE

Возможные значения	Расшифровки	Значение
FSR	...of Full Scale Range	Погрешность выражается в виде приведенной погрешности
ABS	Absolute	Погрешность выражается в виде абсолютной погрешности
MV	...of Measured Value	Погрешность выражается в виде относительной погрешности

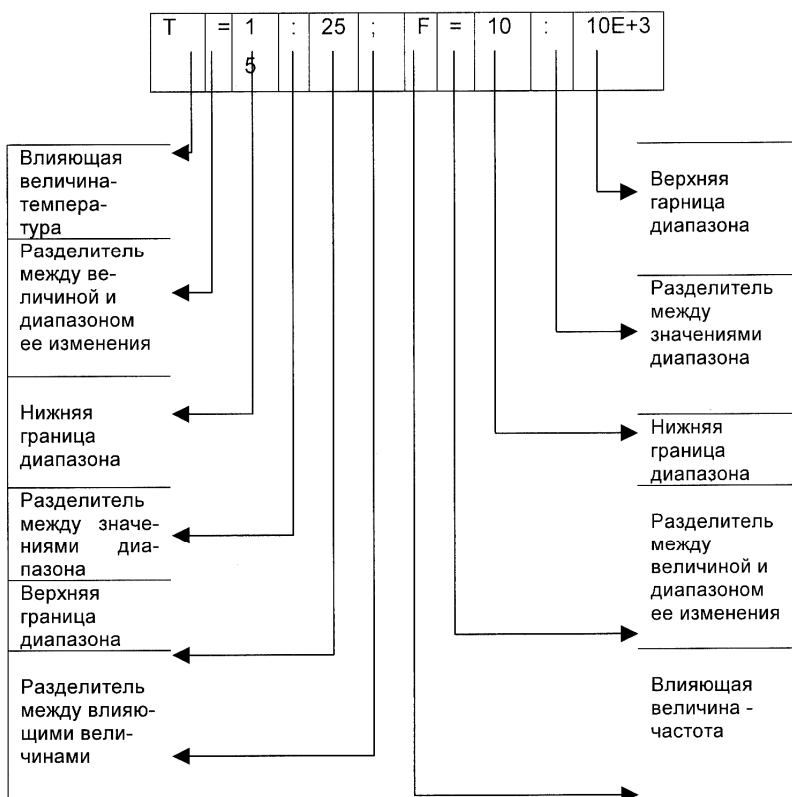


Рис. 3. Пример записи об условиях применения

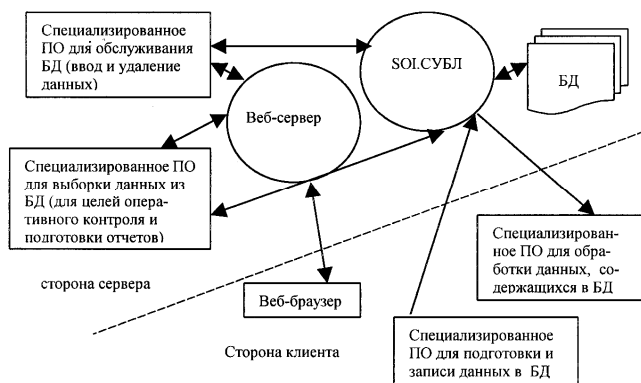


Рис. 4. Структура ПО

Таблицу COMPONENTTYPE целесообразно разделить на две, в одной из которых должны содержаться сведения об атрибутах, обязательно присущих каждому типу СИ (наименование СИ, тип СИ, номер в Госреестре СИ и т.п.), а в другой, связанной с первой по полю «тип СИ», – запись о присвоенных данному типу СИ МХ. Структура записи этой таблицы, которую будем называть TYPECHARS, должна содержать следующие обязательные поля: тип СИ; измеряемая величина, для которой нормируется МХ; диапазон, в котором нормирована МХ; значение МХ; способ нормирования МХ; условия применения, в которых нормирована МХ. Открытость структуры предполагает, что должны быть оговорены правила (синтаксис) описания значений полей таблицы TYPECHARS (рис.3).

Синтаксис должен позволять легко выполнять автоматическое извлечение информации, содержащейся в полях. Это проще всего сделать с использованием специальных служебных символов-разделителей. Пример записи в такой таблице об условиях применения, в которую нормирована МХ, проиллюстрирован на рис.3. Специализированное ПО для подготовки и записи данных, действующее на стороне клиента, перерабатывает исходные данные и заносит их в БД также с соблюдением прав доступа. Данные, заносяемые этим ПО, не должны противоречить структуре БД. Методы, реализованные в ПО для обработки данных, универсальны и могут формировать любой отчет по данным из БД.

Предлагаемое решение является достаточно универсальным и с незначительной адаптацией может быть использовано для любой АИИС. При этом проект может быть выполнен с использованием только свободно распространяемого ПО и стандартизированных открытых протоколов со снижением до нуля затрат, связанных с лицензированием программных продуктов, и обеспечением работы в любой (в т.ч. гетерогенной) вычислительной среде.

Двусвязный список позволяет автоматически восстанавливать состав ИК АИИС, а связи компонентов с таблицами PROCESS и COMPONENT – автоматически вычислять метрологические характеристики ИК и выполнять иные аналитические действия, например, моделирование влияния различных факторов на метрологические характеристики ИК. Такая структура таблицы COMPONENT позволяет строить измерительные каналы из множества компонентов.

Пример структуры комплекса ПО для работы с БД проиллюстрирован на рис.4.

Управление БД ведется с двух сторон: со стороны сервера и со стороны клиента. На стороне сервера работает ПО, имеющее полный доступ к БД, задачей которого является предоставление клиенту веб-интерфейса доступа к данным.

Для сохранения целостности данных доступ к БД со стороны клиента ограничен правами, предоставленными ему программным обеспечением, действующим на стороне сервера. Одним клиентам предоставляется только возможность просматривать данные из БД, формировать необходимые выборки данных по заданным условиям, а другим – изменять, удалять и вносить новые записи.

При этом необходимо исходить из следующих основных положений:

1. С точки зрения восприятия предлагаемых устройств контроля, таких как подсистемы автоматической системы контроля управления качеством (АСКУК), и с точки зрения присущих СКУК внешних целостных свойств в упорядоченной иерархии системы изготовления, добычи, обработки и контроля качества плит.

2. С точки зрения внутреннего строения СКУК и вклада ее особенностей, а именно, проблемой ориентации при прогнозировании качества.

Исходя из этой концептуальной основы, задачу разработки и исследования средств и методов повышения качества плит из природного камня и системного подхода с учетом вышеизложенных требований к нему можно рассматривать на основе следующих исходных предпосылок:

1. Любой функциональный узел (ФУ) АСКУК оценивается обобщенным аддитивным показателем эффективности, исходя из принципа однозначности.

2. Для каждого ФУ АСКУК определены значения обобщенного параметра, по значениям которого выбирается данный ФУ, входящий в систему контроля и управления качеством производства.

3. При определении работоспособности АСКУК, с точки зрения обеспечения ее метрологических характеристик, предполагаем, что АСКУК со своими составными частями могут находиться в двух взаимоисключающих и различных состояниях (устройство СКУК работоспособно либо неработоспособно), причем в ее работоспособном состоянии по любому контролируемому параметру F_i (блеск) максимальное изменение контролируемого параметра $dF_i = \max F_i - \min F_i$ не должно превышать погрешность измерения, т.е. $dF_i \leq 2d(F)$.

Исходя из вышеприведенных предположений и концепций, сформулируем задачу разработки методов и средств (отдельных устройств) повышения и управления качеством облицовочных плит из блоков природного камня.

Примем в качестве обобщенной функцию эффективности устройств АСКУК $F = f(F_i)$ и в качестве параметра, определяющего метрологические характеристики АСКУК, область $D(F)$ допустимых значений $F = f(F_i)$. Для решения задачи должны быть известны:

- множество $S_H = (S_i)$; ($j = 1, i$) несовместимых альтернатив объекта контроля (когда плиты приняты как бракованные), определенных на пространстве параметров качества (линейные размеры, блеск), т.е. признаков $F = f(F_i)$; ($i = 1, i$), обнаруживаемых с помощью АСКУК, а также методов и средств A_H , используемых при контроле измерений, с целью определения качества плит или блоков;

- разбиение множества S_H на классы забраковки, т.е. $S_q \in S_H$; $q = 1, \dots, Q$ на основе матрицы классификатора браковки ОП. Отметим, что в классификатор включены признаки, определяющие блеск плит. При этом принимаем, что под понятием бракованного изделия понимается выполнение условий, что любой параметр F_i не входит в допустимую область $D(F_i)$;

- множество $A_H = A_v$; ($v = 1, \dots, V$) методов и средств контроля (программ, проверок, управляющих воздействий и т.д.) таких, что каждое подмножество $A_v = (L_v)$ охватывает некое подмножество бракованных состояний ОП;

- матрица эталонных констант M_{jk} , устанавливающая отношения между состоянием S_H , S_j , разбиением S_q и A_v , т.е. эталонные значения определяющих параметров;

- затраты C_{vi} некоторого i –го вида на выполнение каждого v -го процесса контроля качества ОП;

- кратность повторения N_i процесса контроля на проверку данного параметра F_i .

В процессе решения задачи необходимо:

1. На основе систематического многоэтапного подхода найти:

- множество возможных решений (w_i) структуры АСКУК (устройств), удовлетворяющих условию

$$(w_i) \in (w) \text{ при } (F_j(w_i) \in D(F)), v_j \in J,$$

где (w_i) – область возможных решений при выборе состава СКУК (устройств); (w) - область допустимых решений при выборе структуры СКУК; $F_j(w_i)$ - значение параметра F_j для w_i –го варианта СКУК;

- оптимальное решение при выборе структуры устройств СКУК $w_0 \in (w_i)$, при котором не существовало бы другого решения w_q из множества (w_i) , при условии $F_j(w_q) > F_j(w_0)$, $v_j \in J$.

При этом хотя бы для одного из F_j должно быть выполнено условие строгого максимума, т.е. $F_j(w_q) > F_j(w_0)$, $v_j \in J$.

2. Выбрать такой оптимальный набор методов и средств контроля и управления качеством плит, чтобы выполнялись условия

$$dC_{w_i}(A_v/A_H) = \min dC_{w_i}(A_r/A_H); A_v \leq A_H,$$

$$F_H(A_0 \vee A_H) = F_i(q_H) \quad dC_{w_i}(A_v/A_H) \leq C_{w_{\text{доп}}},$$

$$-Im_j \in (m_j)_{\text{mxi}} \quad (F_s - F_{\text{mxi}}^H) \geq 2d(F),$$

где $dC_{w_i}(A_v/A_H)$ - приращение затрат некоторого w -го вида на применение некоторого состава A_r методов и средств контроля (F_i) СУ, определяемое исходя из того, что для выполнения заданного множества некоторых функциональных измерений используется информация, полученная заданным составом устройств контроля для контроля и определения бракованных изделий q_i - го типа; $F_H(A_0 \vee A_H)$ - количество необходимых признаков (информации), используемых при объединении; A_0 и A_H ; $F_i(q_H)$ – количество начальной информации признаков относительно множеств q_H , определяемое при условии, что известны матрицы классификатора бракованных состояний ОП и разбиения q_H на классы $q_i(-q_H)$; $C_{w_{\text{доп}}}$ - допустимое значение затрат w –вида; $(m_j)_{\text{mxi}}$ – множество признаков для данного (характерного) устройства (M_{xi}) , неисправность которых определяется значением параметра F_{mxi}^H для устройства (mxi) СУ; $d(F)$ - погрешность измеренного значения F^H в устройствах (mxi) по отношению к эталлоному (номинальному) $F^Э$ значению, по которому бракуется ОП.

Вышеуказанная задача разработки СКУК (устройств) относится к классу комбинаторных задач, а именно:

1. Анализ состояния вопроса контроля качества в технологическом процессе изготовления изделий из блоков природного камня.
2. Анализ методов автоматизации измерений и обработки при контроле качества изделий.
3. Выбор и обоснование определяющих параметров по оценке качества изделий на основе системного подхода.
4. Выбор метода оценки качества по принципу компромисса при многокритериальном подходе.
5. Исследование и определение источников погрешностей при измерении блеска изделий.

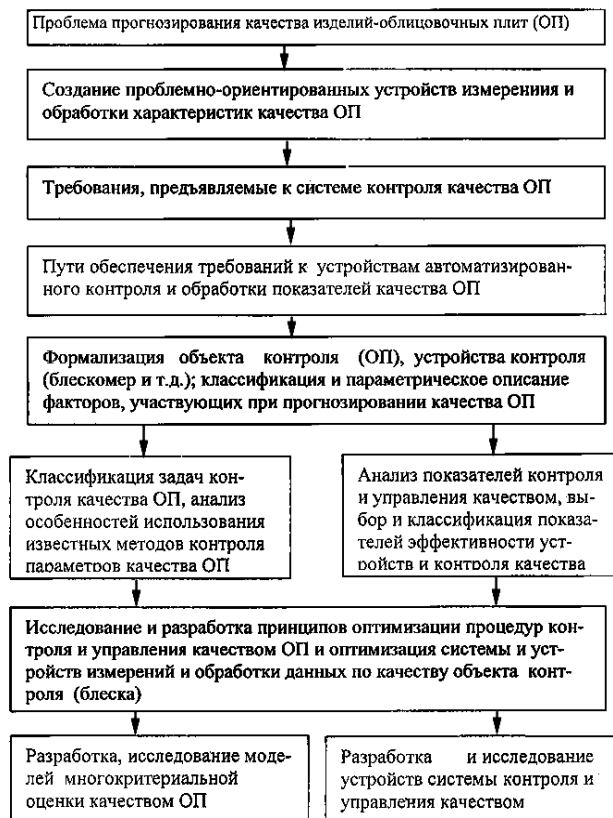


Рис.5. Структура задач разработки и исследования автоматической системы контроля и управления качеством изделий из природного камня

6. Разработка средств контроля качества изделий и исследование их точностных характеристик (а также точностных характеристик их основных функциональных устройств).
7. Оценка экономического эффекта применения автоматизированных систем (устройств) по контролю и управлению качеством изделий.

Структура задач разработки и исследования методов и средств контроля плит из блоков природного камня представлена на рис. 5. Основные трудности решения этой многофакторной задачи системного подхода связаны со спецификой объекта контроля (облицовочных плит и блоков) и заключаются в выборе частных и обобщенных показателей качества при контроле и управлении качеством изделий и сопоставимости показателей по значимости, что определяет в конечном итоге потребительскую ценность изделий.

В полном объеме рассмотренный метод должен решаться применительно к конкретным АСКУК в соответствии с указанной на рис.5 структурой задач [1- 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9480 – 94.
2. ГОСТ 16163 Метрология. Термины и определения.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 «Информационная технология. Оценка погрешностей продукции» Характеристики качества и руководство по их применению.
4. МИ 2891-2004 «ГСИ. Общее требование к программному обеспечению средств измерений».
5. МИ 2174-91 «ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения».
6. **Բաբայան Զ.Ա.** և ուրիշներ. Բնական խաղերից սպասվող միաց սալիկ որակի վերահսկման մեթոդն և ապարատ, մշակում և հետադարձ:

НПП ГЗАО "Камень и силикаты". Материал поступил в редакцию 20.01.2007.

Զ.Ա. ԲԱԲԱՅԱՆ

ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՓԱՅԼԱԶՈՓԻՉ ՀԱՐՄԱՐԱՆՔՆԵՐ (ԱՉԻՉ) ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ԶԱՓԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄՈՎ

Առաջարկվում է ավտոմատացված չափիչ ինֆորմացիոն համակարգերի (ԱՉԻՉ) կիրառման մեթոդ՝ խոշոր քարամշակման ձեռնարկություններում երեսպատման սալիկների փայլքի և վերահսկման որակի բարձրացման համար (առավելագույն) ճշտության և արագության ապահովումով): Մեթոդը հնարավորություն է տալիս մեծապես պակասեցնել մշակման համար ծախսված ինտելեկտուալ ռեսուրսները և նվազագույնի հասցնել բազմաթիվ հաշվարկային նյութերի ձևավորման ընթացքում սխալների հավանականությունը:

Առանցքային բաներ. չափումների կատարման մեթոդ, որակի հսկում, ավտոմատացված ինֆորմացիոն չափիչ համակարգեր:

Z.A. BABAYAN

AUTOMATED POLISHER BASED ON AIMS

An advanced methodological approach on development of MPT (measurement perforation technique) based on AIMS (automated information-measuring systems) for polishing quality and dimensions control by the example of automated polisher at the large-scale stone-working plants is proposed. The method allows essentially to lower expenditures of mental potential on development and to minimize the error probability in numerous reports accompanying MPT.

Keywords: technique of accomplishing measurements, quality control, automated informational measuring systems.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ,
Ա.Հ. ԶԱՔԱՐՅԱՆ, Հ.Հ. ԵՋԱԿՅԱՆ, Վ.Հ. ՄԱՅԱՐՅԱՆ

**Fe₂O₃-NiO-CoO-MoO₃ ՕՔՍԻԴԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՑ ՄԻՆԹԵԶՎԱԾ ԲԱՐՂ
ՕՔՍԻԴԱՅԻՆ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ
ՄԱՐՏԵՆՍԻՏԱՅԻՆ ԾԵՐԱՅՈՂ ՊՈՂՊԱՏԱՓՈՇՈՒ ՍՏԱՑՈՒՄԸ**

Հետազոտվել է Fe₂O₃ – NiO – CoO – MoO₃ օքսիդային համակարգից սինթեզված բարդ օքսիդների վերականգնման գործընթացը, որի համաձայն վերականգնման ժամանակ դրանք չեն ենթարկվում տրոհման և արդյունքում ստացվում է մետաղական համաձուլվածք: Ընտրվել են վերականգնման լավարկված ռեժիմներ՝ T=950±25°C, τ=3...3,5ժ: Ուսումնասիրվել են ստացված պողպատափոշու քիմիական բաղադրությունը, հատիկաչափական կազմը և ֆիզիկատեխնոլոգիական հատկությունները, որոնք ոչ միայն համապատասխանում են գոյություն ունեցող ստանդարտներին, այլև որոշ դեպքում գերազանցում են այն:

Առանցքային բառեր. օքսիդ, սինթեզ, վերականգնում, համաձուլվածք, պողպատափոշի, ֆազ, մամլունակություն, եռակալում, հոմոգենացում:

Ժամանակակից տեխնիկայում մեծ տարածում են գտել մարտենսիտային ձերացող պողպատները, որոնք, օժտված լինելով բարձր ամրությամբ և պլաստիկությամբ, ունակ են աշխատելու արտակարգ պայմաններում՝ հատկապես բացասական ջերմաստիճաններում: Այս պողպատների ստացումը ավանդական եղանակով նպատակահարմար չէ, ինչը պայմանավորված է վնասակար խառնուրդներով համաձուլվածքի կեղտոտվածությամբ, հատկապես ածխածնով, ջրածնով, թթվածնով, ազոտով, ծծմբով և ֆոսֆորով: Նշված պողպատները նպատակահարմար է ստանալ փոշեմետալուրգիական եղանակով՝ կիրառելով բարդ օքսիդների սինթեզի և վերականգնման եղանակը, որը հնարավորություն է տալիս ստանալ բարձր մաքրությամբ և պահանջվող հատկություններով կոմպոզիցիոն նյութեր: Այս տեսակետից ներկայացված աշխատանքը, որի նպատակն է օքսիդային համակարգից սինթեզված բարդ օքսիդների վերականգնման գործընթացի հետազոտումը և մարտենսիտային ձերացող պողպատափոշու ստացումն ու հատկությունների ուսումնասիրումը, խիստ արդիական է և հեռանկարային: Հատկապես այն հեռանկարային է ՀՀ համար, որտեղ առկա է հումքային բազան:

Տումարևի հետազոտությունների [1] համաձայն, եթե օքսիդային համակարգերի վերականգնման գործընթացը տարվի բարձր պոտենցիալով, ապա այն կընթանա առանց տրոհման: Սա հիմնավորվում է իլմենիտի, մանգանային ֆերիտների, խրոմիտների և այլնի վերականգնումով: Օքսիդային միացությունների համալիր վերականգնմանն են նվիրված Չուֆարովի [2], Ռոստովցևի [3], Գելդի և Եսինի [4] աշխատանքները:

Վերականգնման համար հատկապես հատուկ պայմաններ են պահանջվում դժվար վերականգնվող օքսիդների վերականգնման ժամանակ, ինչպիսիք են Cr₂O₃, V₂O₃, Al₂O₃, TiO₂ և այլն: Այսպես օրինակ, Cr₂O₃-ի համար կիրառվում է H₂+C բաղադրամասերով համալիր վերականգնում: Ինչ վերաբերում է Al₂O₃-ին, TiO₂-ին, MnO-ին և նման տիպի օքսիդային համակարգերին, ապա վերականգնումը

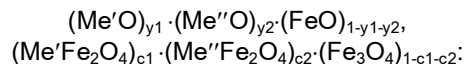
կարելի է իրականացնել կալցիումի հիդրիդի միջոցով: Սովորական վերականգնման ժամանակ, օքսիդակ H_2 –ով, տեղի է ունենում օքսիդների տրոհում, հետևապես և կատարվում է ընտրովի վերականգնում: Ինչ վերաբերում է օքսիդային համակարգերին, որոնք չեն պարունակում դժվար վերականգնվող օքսիդներ, ապա այս դեպքում վերականգնման գործընթացը ընթանում է առանց բարդությունների: Ընտրված “ $Fe_2O_3 - NiO - CoO - MoO_3$ ” օքսիդային համակարգը չի ենթարկվում տրոհման, որովհետև բաղադրամասերի թերմոդինամիկական պոտենցիալները մոտ են իրար, ինչի պատճառով դրանք վերականգնվում են՝ առաջացնելով մետաղական համաձուլվածք: Եթե նույնիսկ տեղի է ունենում մասնակի տրոհում, ապա այն չի կարող ազդել համաձուլվածքի առաջացման գործընթացի վրա:

Փորձերը կատարվել են ջերմագրավիտետրիկ սարքի վրա, որը հնարավորություն է տալիս անընդհատ ստուգել նմուշի զանգվածի փոփոխությունը՝ հաստատուն պահելով պահանջվող ջերմաստիճանը: Ջրածնի ծախսը կազմել է $1/րոպե$: Վերականգնման աստիճանը (α , %) հաշվարկվել է զանգվածի կորստով և վերականգնման արագությամբ՝ միավոր ժամանակում զանգվածի փոփոխման արագությամբ (V , մգ O_2 /րոպե):

Կինետիկ հետազոտության արդյունքներն ինտեգրալ և դիֆերենցիալ կորերի տեսքով ցույց են տրված նկ.1-ում և նկ.2-ում: Ինչպես երևում է, կինետիկական կորերը ենթարկվում են վերականգնման ինքնակատալիզային գործընթացին: Սկզբից նկատվում է զանգվածի արագ կորուստ՝ չնկատվող ինդուկցիոն պարբերությամբ:

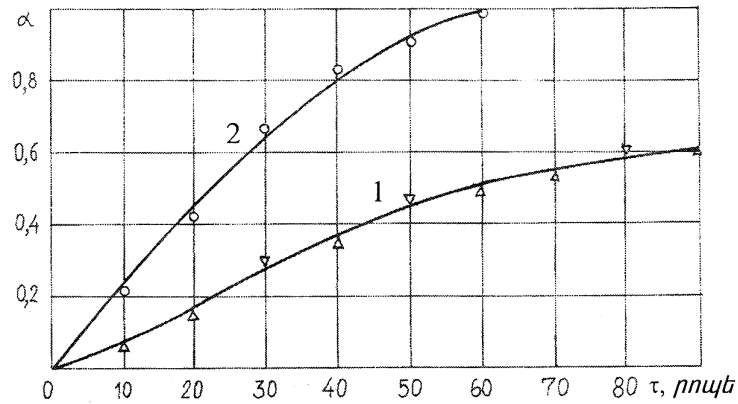
Մինթեզված $[Ni_{1-x}, Co_x](Fe_{1-x}, Mo_x)_2O_4$ բարդ օքսիդի վերականգնումը կատարվում է մեկ փուլով՝ առանց տրոհման: Կինետիկական կորերի վրա չեն նկատվել բյուրեղաքիմիական փոխակերպություններին առնչվող էֆեկտներ: Սակայն պարզ ընդգծվում են ուղղագծային և պարաբոլային տիրույթները, ինչը վկայում է, որ գործընթացը սկզբում ընթանում է կինետիկական ռեժիմով, հետո՝ դիֆուզիոն: Նկ.1-ից երևում է, որ $850^\circ C$ ջերմաստիճանում և 1 ժ ընթացքում (2 կոր) տեղի է ունենում լրիվ վերականգնում:

Օքսիդային համակարգերի վերականգնման մեխանիզմը բավականին բարդ է և դժվար բացատրելի: Մեր կարծիքով, այն կարելի է բացատրել հետևյալ կերպ. $Me^{2+}Fe_2O_4$ օքսիդի վերականգնման գործընթացում, այսինքն՝ թթվածնի հեռացման ժամանակ, առաջանում են փոփոխական բաղադրությամբ ֆազեր, ընդ որում Fe^{2+} -ն ունակ է ամբողջությամբ կամ մասնակի փոխարինելու Me^{2+} -ին: Առաջին մոտավորությամբ $Me'_c Me''_{(1-c)} Fe^{2+}_2 O_4$ բարդ օքսիդը համարժեք է համալիր միացություններով $(Me'Fe_2O_4)_c \cdot (Me''Fe_2O_4)_{1-c}$ պինդ լուծույթին: Վերականգնման ընթացքում դրանք առաջացնում են փոփոխական բաղադրությամբ պինդ լուծույթի տիպի ենթօքսիդներ կամ շպինելային ֆազեր՝

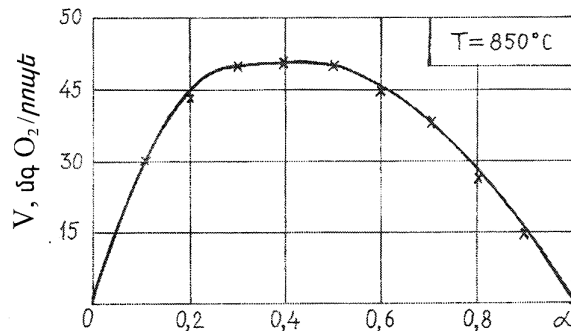


Թթվածնի հավասարակշռված ճնշումը և պինդ լուծույթի բաղադրությունը կախված են Me' և Me'' բաղադրությունից: $Me'_c Me''_{(1-c)} Fe^{3+}_2 O_4$ (կամ $MeMe^{3+}_{(2-x)} Fe_xO_4$) օքսիդի վերականգնման մեխանիզմը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ: Մինչև $\alpha=33\%$ վերականգնման աստիճանը տեղի է ունենում շպինելային ֆազից Me^{2+} -ի արագ անցում ենթօքսիդի: Միաժամանակ Fe^{3+} -ը վերականգնվում է մինչև Fe^{2+} , որի մեծ մասը փոխարինում է շպինելային ֆազից հեռացված Me^{2+} -ին, իսկ Fe^{2+} -ի ավելցուկը նույնպես անցնում է ենթօքսիդային ֆազ: Արդյունքում $MeFe_2O_4$ քանակը շպինելային ֆազում փոքրանում է: Առաջանում է շպինելային լուծույթի նոր

բաղադրամաս՝ Fe_3O_4 , որի կոնցենտրացիան $\alpha=20\%$ դեպքում հասնում է $\sim 70\%$: Ենթօքսիդային ֆազն աղքատանում է FeO -ով: $\alpha>33\%$ դեպքում առկա է միայն փոփոխական բաղադրությամբ ֆազ՝ ենթօքսիդային պինդ լուծույթ, որը վերականգնման ընթացքում ամբողջությամբ աղքատանում է թթվածնով մինչև մաքուր մետաղ, այսինքն՝ առաջանում է մետաղական համաձուլվածք:

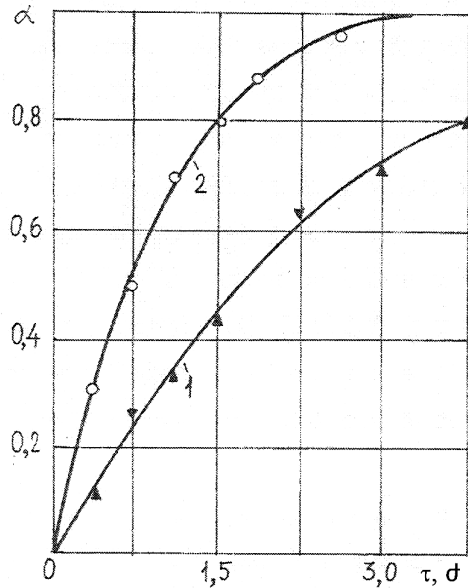


Նկ.1. $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x]\text{O} \cdot (\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_3$ օքսիդի վերականգնման աստիճանի (α) կախվածությունը տևողությունից (τ , րոպե)՝ 1-650°C; 2-850°C



Նկ.2. $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x]\text{O} \cdot (\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_3$ օքսիդի վերականգնման դիֆերենցիալ կորը

Վերականգնման ռեժիմների (T , τ) լավարկման նպատակով կատարվել է մինչև 1 կգ զանգվածով պողպատափոշու վերականգնում, որի շերտի հաստությունը կազմել է ~ 25 մմ: Փորձերի արդյունքները բերված են նկ.3-ում, որտեղից երևում է, որ $T=950 \pm 25^\circ\text{C}$ և $\tau=3 \dots 3,5$ ժ տևողության ընթացքում (2-րդ կոր) տեղի է ունենում լրիվ վերականգնում, մինչդեռ 850°C ջերմաստիճանը բավարար չէ:



Նկ.3. $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x]\text{O} \cdot (\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_3$ օքսիդիդային համակարգերի վերականգնման կինետիկան՝ 1-850°C; 2-950°C

1, 2 և 3 աղյուսակներում բերված են ՍԲ–H18K10M5 մակնիշի մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշու հիմնական հատկությունները, որոնք ստացվել են մշակված լավարկված տեխնոլոգիական ռեժիմներով (սինթեզման և վերականգնման միջոցով), իսկ նկ.4-ում և 5-ում ցույց են տրված մետաղափոշու ձևը և մամլունակության դիագրամը՝ $\theta=f(P)$:

Ինչպես երևում է աղյուսակ 1-ից, քիմիական բաղադրությունը համապատասխանում է հաշվարկային բաղադրությանը: Սակայն Mo-ի քանակությունը մի փոքր ցածր է, ինչը պայմանավորված է սինթեզման և վերականգնման ժամանակ MoO_3 -ի ցնդմամբ: Համեմատությունը ցույց է տալիս, որ ՍԲ–H18K10M5 մակնիշի պողպատափոշին խառնուրդների քանակությամբ մեկ կարգով ավելի մաքուր է, քան նույն մակնիշի ձուլված պողպատը, ինչը և ակնկալվում էր: Հարցն այն է, որ ֆերիտացման ժամանակ խառնուրդները, որոնք գտնվում են ելքային օքսիդների (Fe_2O_3 , NiO , CoO , MoO_3) մեջ, հեշտությամբ քլորացվում և ցնդում են, ինչը պայմանավորված է նրանց գոլորշու բարձր առաձգականությամբ: SiCl_2 -ի ցնդման ջերմաստիճանը 57°C է, AlCl_3 - ինը՝ 135°C, TiCl_4 – ինը՝ 330°C և այլն: Խառնուրդների հեռացումը, այդ թվում նաև հիմնային մետաղներինը, հեշտությամբ իրականացվում է նաև սինթեզված բարդ օքսիդների վերականգնման ժամանակ: Այս տեխնոլոգիան ունի մեկ առավելություն ևս, որի համաձայն բացատրվում է մետաղափոշու ազոտացումը ($\text{NH}_4\text{Cl} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HCl}$), ընդ որում՝ չեն ազոտացվում ինչպես ելքային (Fe_2O_3 , NiO , CoO , MoO_3), այնպես էլ սինթեզված օքսիդները $[\text{Ni}_{1-x}, \text{Co}_x](\text{Fe}_{1-x}, \text{Mo}_x)_2\text{O}_4$ -ը: Դա բացատրվում է նրանով, որ ֆերիտառաջացման գործընթացը ընթանում է բարձր թթվածնային պոտենցիալի դեպքում, որը բավականին գերազանցում է ազոտի պոտենցիալը: Այդ են վկայում

քիմիական վերլուծության արդյունքները, որի համաձայն չեն հայտնաբերվել նույնիսկ նիտրիդների հետքեր: Լեգիրված մետաղափոշիների ստացման օքսիդային տեխնոլոգիան սրանով է տարբերվում ջերմադիֆուզիոն հարստացման տեխնոլոգիայից, որը մշակվել է Ուկրաինայի ԳԱԱ նյութագիտության ինստիտուտի կողմից [5]: Ջերմադիֆուզիոն եղանակով ստացված մետաղափոշիները կարող են պարունակել մեծ քանակությամբ ազոտ, որի աղբյուրը մի կողմից բովախառնուրդում գտնվող ամոնիումի քլորիդի դիսոցման արգասիքներն են, իսկ մյուս կողմից՝ դիսոցված ամոնիակը, որը հաճախ օգտագործվում է որպես պաշտպանիչ միջավայր դիֆուզիոն հարստացման ժամանակ [6]: Օրինակ՝ П40Х պողպատափոշին պարունակում է 0,009%N, П70Х5 - 0,012%N, П100Х12 - 0,014%N, ПХ18Н12 - 0,2%N: Որոշ մետաղափոշիներում ազոտի պարունակությունը հասնում է 0,54...0,75%, մինչդեռ մարտենսիտային ծերացող պողպատափոշիների կելտոտվածությունը այս կամ այն խառնուրդներով չի թույլատրվում:

Աղյուսակ 1

ПВ-Н18К10М5 պողպատափոշու քիմիական բաղադրությունը

Պողպատի մակնիշը	Բաղադրությունը, %							
	հիմնական տարրերը				խառնուրդները			
	Fe	Ni	Mo	Co	C	Si	S	P
ПВ-Н18К10М5	մնաց.	17,7 – 18,0	4,7 – 4,9	9,7 – 10,0	չի հայտն.	0,002	0,003	0,002
Н18К10М5 (ստանդարտ)	մնաց.	17,7 – 19,0	4,6 – 5,5	9,5 – 10,5	≤0,03	0,200	0,020	0,020

Աղյուսակ 2

ПВ-Н18К10М5 մակնիշի պողպատափոշու հատիկաչափական կազմը

Հատիկաչափական կազմը, % ըստ մասսայի			
-0,160...+0,125 մմ	-0,125...+0,080 մմ	-0,080...+0,040 մմ	-0,040 մմ
12,2	23,4	16,2	48,2

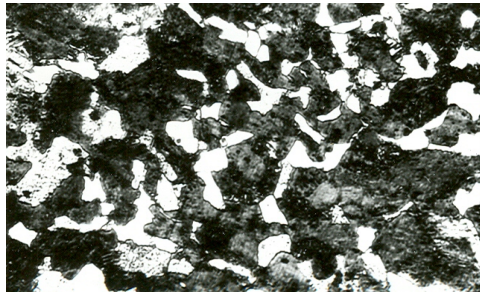
Աղյուսակ 3

ПВ-Н18К10М5 պողպատափոշու ֆիզիկական և տեխնոլոգիական հատկությունները

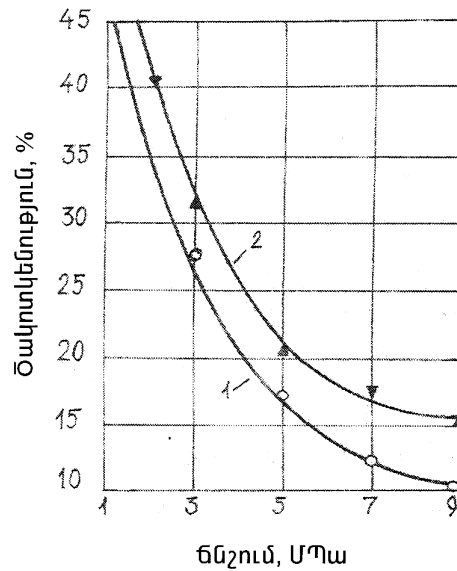
Պիկնոմետրիկ խտությունը, $q/սմ^3$	Ազատ լցման խտությունը, $q/սմ^3$	Հոսունությունը, $վրկ/50գ$	Խտունակությունը $P=700 ՄՊա$, $q/սմ^3$	Մամլունակությունը, $q/սմ^3$ (ներքին սահման)
8,12	2,5	36,0	6,8	4,5

Պողպատափոշու ֆիզիկա-տեխնոլոգիական հատկությունները գտնվում են ստադարտի սահմաններում, այն հատկապես աչքի է ընկնում լավ խտունակությամբ և մամլունակությամբ (աղ.3), ինչը հիմնավորվել է մամլունակության դիագրամով (նկ.5): Մետաղափոշին սպունգաձև է (նկ.4), որը բնորոշ է օքսիդների

վերականգնման եղանակով ստացված մետաղափոշիներին [6]: Հատիկների անհամառոտացության ցուցանիշը տատանվում է 2,5...3,0 միջակայքում:



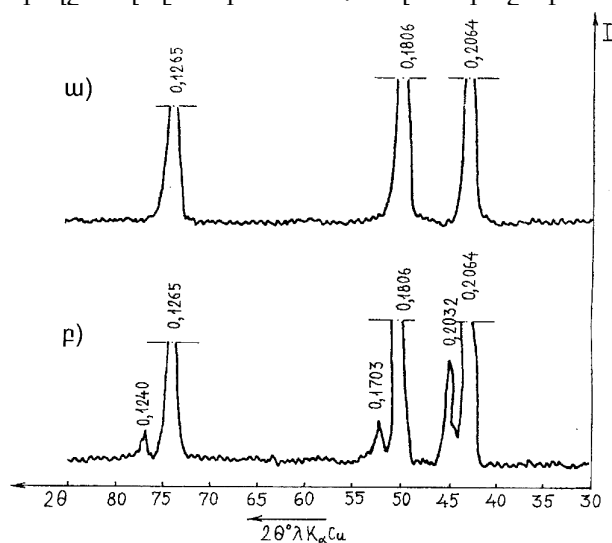
Նկ.4. PIB-H18K10M5 պոդպատափոշու հատիկի ձևը ($\times 100$)



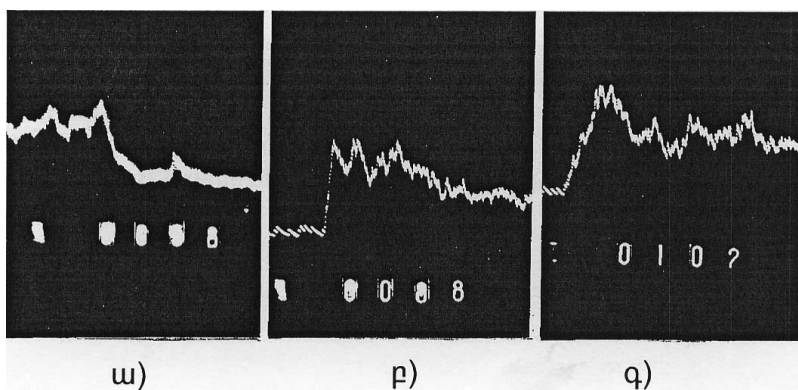
Նկ.5. PIB-H18K10M5 պոդպատափոշու մամլունակության դիագրամը $\theta = f(\rho)$

Մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում պոդպատափոշու հատիկների ռենտգենաֆազային և ռենտգենասպեկտրալ միկրոգոնդային վերլուծության արդյունքները (նկ.6 և 7): Ռենտգենագրամի վրա (նկ.6) առկա են առանձին տարրերին բնորոշ գծերը: Լեգիրող տարրերի լուծելիությանը զուգընթաց նկատվում է ատոմային հարթությունների միջև եղած հեռավորության փոփոխություն: Ստացված մետաղափոշին համաձուլվածք է, որն ունի աուստենիտային դասի

միաֆազ կառուցվածք՝ $a = 0,3580$ նմ բյուրեղային ցանցի պարամետրերով: Առավել հետաքրքրական են ռենտգենասպեկտրալ միկրոզոնդային վերլուծության արդյունքները (նկ.7), որտեղ ցույց է տրված տարրերի բաշխվածությունը մետաղափոշու հատիկի մեջ. տարրերի բաշխվածությունը մետաղափոշու մեջ հավասարաչափ չէ, որի պատճառով բաշխվածության կորն ունի զիգագաձև տեսք, սակայն համաձուլվածքների ընդհանուր բնութագրերը բավարար են, որն ապացուցում է համաձուլվածքի ստացման ճիշտ գործընթացը: Համեմատաբար հավասարաչափ բաշխվածություն ունեն Ni-ը (նկ.7, ա), այնուհետև՝ Co-ը և Mo-ը: Պետք է հաշվի առնել նաև այն հանգամանքը, որ մետաղափոշու մամլումից հետո եռակալման և հետագա ջերմային մշակման ժամանակ նույնպես տեղի են ունենում հոմոգենացման գործընթացներ, և լեգիրող տարրերի բաշխվածությունը ամբողջ ծավալում դառնում է հավասարաչափ:



Նկ.6. PB-H18K10M5 պողպատափոշու ռենտգենաֆազային վերլուծությունը



Նկ.7. PB-H18K10M5 պողպատափոշու հատիկների ռենտգենասպեկտրալ միկրոզոնդային վերլուծությունը՝ ա - Ni; բ - Co; գ - Mo;

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Тумарев А.С. Проблемы металлургии, 33.-М.: Металлургия, 1953.
2. Чуфаров Г.И. и др. Механизм и кинетика восстановления металлов.-М.: Наука, 1970.
3. Ростовцев С.Т. Теория металлургических процессов.-М.: Металлургия, 1956.
4. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов.-Свердловск, 1962.
5. Радомысельский И.Д., Напара-Волгина С.Г. Получение легированных порошков диффузионным методом и их использование.-Киев: Наукова думка, 1988 – 138 с.
6. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др.- М.: Металлургия, 1987.- 792с.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն՝ 25.09.2005:

Տ.Գ. ԱԳԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ա. ՍԵՏՐՕՍՅԱՆ, Ա.Տ. ԱԳԲԱԼՅԱՆ,
Ա.Ա. ՅԱԿԱՐՅԱՆ, Ա.Օ. ԷՅԱԿՅԱՆ, Վ.Գ. ՏԱՓԱՐՅԱՆ

ПОЛУЧЕНИЕ МАРТЕНСИТНО – СТАРЕЮЩИХ СТАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{NiO} - \text{CoO} - \text{MoO}_3$

Исследованы процессы восстановления сложных оксидов, синтезированных из оксидных систем $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{NiO} - \text{CoO} - \text{MoO}_3$. Выбраны оптимальные режимы восстановления: $T=950\pm 25^\circ\text{C}$, $\tau=3\ldots 3,5$ ч. Исследованы химический и гранулометрический состав, а также физико-технические свойства полученных порошков, которые не только соответствуют требованиям стандартов, но и при разных случаях превосходят их.

Ключевые слова: оксид, синтез, восстановление, сплав, порошок стали, фаза, прессуемость, спекание, гомогенизация.

S.G. AGHBALYAN, A.A. PETROSYAN, A.S. AGHBALYAN,
A.H. ZAKARYAN, H.H.EZAKYAN, V.H. SAFARYAN

OBTAINING OF MARTENSITO-AGEING STEEL POWDERS AND INVESTIGATION OF COMPLEX OXIDE RECOVERY PROCESS SYNTHESIZED FROM OXIDE SYSTEMS $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{NiO} - \text{CoO} - \text{MoO}_3$

The processes of complex oxide recovery synthesized from oxide systems $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{NiO} - \text{CoO} - \text{MoO}_3$ are examined. Optimal recovery regimes - $T=950\pm 25^\circ\text{C}$, $\tau=3\ldots 3,5$ – are chosen. The chemical and granulometric composition as well as technical properties of obtained powders which correspond to the requirements not only by standards, but in different cases exceed them are studied.

Keywords: oxide, synthesis, recovery, alloy, steel powder, phase, pressability, sintering, homogenization.

Д.А. ГЕОДАКЯН, Б.В. ПЕТРОСЯН, С.В. СТЕПАНЯН,
Р.А. ВАРДАНЯН, К.Д. ГЕОДАКЯН

ЛЕГКОПЛАВКИЕ СВИНЕЦСОДЕРЖАЩИЕ СТЕКЛА

Синтезированы и исследованы стекла в системах $\text{PbO-P}_2\text{O}_5$, $\text{Pb}(\text{PO}_3)_2\text{-Zn}(\text{BO}_2)_2$, $\text{PbO-V}_2\text{O}_5$ с различными добавками. Экспериментально доказана возможность получения легкоплавких некристаллизующихся стекол с высокими растекающими и диэлектрическими свойствами, пригодных для использования в качестве стеклоосновы низкотемпературных ($\leq 460^\circ\text{C}$) припоечных материалов.

Ключевые слова: легкоплавкое стекло, стеклооснова, растекаемость, некристаллизующееся стекло.

Деление стекол на легкоплавкие и тугоплавкие является условным. Под легкоплавкими обычно подразумевают стекла, температура размягчения которых не превышает 600°C . Компонентами, обуславливающими легкоплавкость стекол, могут быть ионы некоторых тяжелых металлов, ионы с внешней электронной оболочкой, содержащей 18 и более электронов, крупные легкодеформируемые ионы и ионы с малыми зарядами [1-3].

В настоящее время для покрытия, спаивания и герметизации различных материалов применяют легкоплавкие стекла: свинецсодержащие, боратные, фосфатные, ванадатные, висмутсодержащие. Наиболее перспективными из них являются свинцовосиликатные, силикофосфатные и свинцовоборатные [4]. Во многих легкоплавких составах стекол в качестве необходимого компонента применяют оксид свинца, который может входить в состав стекла в очень больших количествах. Для получения легкоплавких припоечных стекол в качестве основы нами исследовались системы: $\text{PbO-P}_2\text{O}_5$, $\text{Pb}(\text{PO}_3)_2\text{-Zn}(\text{BO}_2)_2$, $\text{Pb}(\text{PO}_3)_2\text{-V}_2\text{O}_5$ и $\text{PbO-V}_2\text{O}_5$ с разными добавками. Работы в этих системах проводились с целью получения стекол, обладающих следующими свойствами:

- степень поверхностной кристаллизации $\leq 5\%$ после выдержки 1 час при 400°C ;
- температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) $\leq 115 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$ при $50 \dots 200^\circ\text{C}$;
- температура начала деформации ($t_{\text{н.д.}}$) $\leq 350^\circ\text{C}$;
- растекаемость $\geq 13 \text{ мм}$ после выдержки 20 или 60 мин при 400°C ;
- диэлектрическая проницаемость (ϵ) $\leq 18,5$ при 20°C и 10^6 Гц .

Каждая конкретная область применения легкоплавкого стекла определяется его свойствами. Полученные стекла могут быть использованы в микроэлектронике, в вакуумной и электронной технике в качестве защитного покрытия, изоляции выводов, стеклоосновы в легкоплавких припоечных композициях для низкотемпературной ($\leq 460^\circ\text{C}$) вакуум-плотной герметизации стеклокерамических корпусов интегральных микросхем и т.д.

Для синтеза стекол в качестве сырьевых материалов использовали реактивы квалификации “чда”, “ч”, “хч”, “осч”. Варку стекол проводили в

платиновых тиглях емкостью от 100 до 500 мл в электрической муфельной печи с корбундовыми нагревателями, с досыпкой шихты, без механического перемешивания стекломассы. В зависимости от состава стекла температуру варки варьировали в пределах 900...1200 °С. Продолжительность варки в зависимости от количества стекломассы составляла 30...120 мин. Для измерения ТКЛР и диэлектрической проницаемости сваренную стекломассу отливали в соответствующие графитовые или стальные формы. Оставшееся количество стекломассы отливали на плиту из нержавеющей стали. Получившиеся пластинки стекла измельчали до удельной поверхности 1500...1600 см²/г.

ТКЛР измеряли по ОСТ 11.027.037.79 на кварцевом dilatометре марки ДКВ-4 в интервале температур 50...200 °С. Растекаемость стекол определяли на прессованных образцах массой 2 г, диаметром Ø 8 мм при температурах 400, 425 °С с выдержкой 20 или 60 мин.

Диэлектрические потери ($\text{tg } \delta$) и проницаемость измеряли при комнатной температуре на приборе “Измеритель добротности Е 4-7” при частоте 10⁶ Гц.

Кристаллизационную способность исследовали методом дифференциального термического анализа (DTA) в динамическом режиме на шестипозиционном термоанализаторе марки Т-6 [5] со скоростью 10 К/мин. По кривым DTA определяли температуры стеклования ($t_{\text{ст}}$), размягчения ($t_{\text{разм}}$), начала, максимальной скорости и интенсивности процесса кристаллизации ($t^{\text{кр-нач}}$, $t^{\text{кр-мах}}$, высота пика), а также температуру плавления кристаллов ($t_{\text{пл}}$) [6].

Степень поверхностной кристаллизации стекол определяли под микроскопом “ПОЛАМ Р-312” в отраженном свете при 400х увеличении на образцах, прошедших тест на растекаемость, после их дополнительной выдержки 60 мин при температурах 400 и 425 °С.

Составы и свойства стекол системы PbO-P₂O₅ с добавками (сверх 100 %) SiO₂, Al₂O₃, ZnO приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Составы стекол системы PbO-P₂O₅ с добавками

№	Состав, масс %				
	PbO	P ₂ O ₅	SiO ₂	ZnO	Al ₂ O ₃
1	75	25	–	–	–
2	70	30	–	–	–
3	60	40	–	–	–
4	50	50	–	–	–
5	50	50	2	–	–
6	50	50	6	–	–
7	50	50	–	2	–
8	50	50	–	6	–
9	50	50	–	10	–
10	50	50	–	–	2
11	50	50	–	–	4
12	50	50	–	–	6

Таблица 2

Свойства стекол системы PbO-P₂O₅ с добавками

№ ^{*)}	Результаты DTA						Дилатометрические данные		ε при 10 ⁶ Гц и 25 °C	tg δ · 10 ⁴ при 10 ⁶ Гц и 25 °C
	t _{ст} , °C	t _{раз} , °C	t ^{кр} _{нач} , °C	t ^{кр} _{мах} , °C	t _{пл} , °C	Высота пика, мм	ТКЛР, α · 10 ⁻⁷ К ⁻¹ при 50...200 °C	t _{н.д.} , °C		
1	кристаллизация при отливе									
2	333	383	394	412	627	100	148	328	22,0	33,2
3	293	318	331	366	667	100	144	318	13,9	40,8
4	209	249	263	291	567	40	142	280	12,0	26,6
5	322	365	–	567	–	100	118	–	12,3	24,0
6	340	389	–	617	–	100	115	–	12,7	23,3
7	290	322	–	504	–	100	133	–	12,2	21,5
8	310	344	–	560	–	100	125	–	12,5	22,0
9	316	347	–	590	–	100	120	–	13,0	20,5
10	430	448	–	585	–	100	117	–	14,0	19,5
11	357	407	–	570	–	100	102	–	14,5	18,8
12	404	463	–	608	–	100	94	–	15,0	20,0

^{*)} Нумерация соответствует нумерации табл. 1.

Как следует из табл. 2, ТКЛР стекол в системе PbO-P₂O₅ высоки. Минимальным значением ТКЛР обладает стекло, соответствующее составу метафосфата свинца (№ 4, табл. 1, 2). Введение добавок позволяет снизить значение ТКЛР метафосфата свинца на 22...48 единиц. Для метафосфата свинца минимальны также дилатометрические и DTA температуры, кристаллизационная способность и диэлектрическая проницаемость. Добавки Al₂O₃, SiO₂, ZnO ухудшают легкоплавкость и повышают кристаллизационную способность стекла, однако значительно снижают ТКЛР и продвигают t^{кр}_{мах} в сторону высоких температур.

Исследованы также стекла, полученные в системах Pb(PO₃)₂-Zn(BO₂)₂ и Pb(PO₃)₂-V₂O₅. Составы и физико-химические свойства этих стекол представлены в табл. 3.

Таблица 3

Составы и свойства стекол, полученных в системах

Pb(PO₃)₂-Pb(BO₂)₂ и Pb(PO₃)₂-V₂O₅

№	Состав, масс %			Результаты DTA						ТКЛР, α · 10 ⁻⁷ K ⁻¹ при 50...200 °C	ε при 10 ⁶ Гц и 25 °C	tg δ · 10 ⁴ при 10 ⁶ Гц и 25 °C
	Pb · (PO ₃) ₂	Zn · (BO ₂) ₂	V ₂ O ₅	t _{ст} , °C	t _{раз} , °C	t ^{кр} _{нач} , °C	t ^{кр} _{мах} , °C	t _{пл} , °C	высота пика, мм			
1	95	5	–	345	385	485	522	577	40	126	15,0	25,2
2	90	10	–	350	400	514	577	637	42	109	16,1	26,0
3	85	15	–	420	460	569	624	742	100	–	14,5	22,0
4	80	20	–	440	480	518	552	582	17	–	14,0	20,3
5	95	–	5	365	397	533	580	640	14	117	17,0	27,1
6	90	–	10	404	428	714	738	–	5	–	18,0	26,5
7	85	–	15	420	440	725	750	–	10	–	19,5	28,2

Согласно табл. 3, стекла в системах $\text{Pb}(\text{PO}_3)_2\text{-Zn}(\text{BO}_2)_2$, $\text{Pb}(\text{PO}_3)_2\text{-V}_2\text{O}_5$ обладают сравнительно низкой кристаллизационной способностью, однако несколько менее легкоплавки по сравнению со стеклами системы $\text{PbO-P}_2\text{O}_5$.

Исследования свойств стекол, полученных в системе $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$, проводили в следующих областях: 1 - содержание PbO 57,5...85,0, B_2O_3 11,5...15 масс %, в качестве добавок использованы ZnO , ZnF_2 , PbF_2 , BaO , Al_2O_3 , SiO_2 ; 2 - содержание PbO 80...85, B_2O_3 10,5...13 масс %, в качестве добавок введены SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , BaO , V_2O_5 , WO_3 , NiO_2 , MoO_3 .

В свинцово-боратной системе исследованы и синтезированы более сорока составов стекол. В табл. 4-7 приведены составы и свойства стекол, характеризующихся максимальной легкоплавкостью, минимальной кристаллизационной способностью и сравнительно невысоким значением ТКЛР.

Составы и свойства стекол в системе $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$, соответствующих первой области, представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Составы стекол системы PbO 57,5...85, B_2O_3 11,5...15 масс % с добавками

№	Состав, масс %							
	PbO	B_2O_3	ZnO	ZnF_2	PbF_2	BaO	Al_2O_3	SiO_2
1	57,5	14,0	6,0	—	15,0	5,0	2,5	—
2	65,0	14,4	9,0	—	9,0	1,0	—	1,6
3	64,0	13,0	—	6,0	15,0	—	—	2,0
4	77,5	14,0	—	6,0	—	—	—	2,5
5	77,5	11,5	—	6,0	—	—	—	5,0
6	80,0	14,0	—	6,0	—	—	—	—
7	85,0	15,0	—	—	—	—	—	—
8	57,5	14,0	6,0	—	20,0	—	2,5	—
9	75,0	16,5	8,5	—	—	—	—	—
10	62,5	14,0	6,0	—	15,0	—	2,5	—

Таблица 5

Свойства стекол системы PbO 57,5...85, B_2O_3 11,5...15 масс % с добавками

№ ^{*)}	Дилатометрические данные		Растекаемость при выдержке 20 мин, мм		Степень поверх. кристаллиз. при 400 °C с выдерж. 1 час, %	ϵ при 10^6 Гц и 25 °C	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$ при 10^6 Гц и 25 °C
	ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$ при 50...200 °C	$t_{\text{н.д.}}$, °C	400 °C	425 °C			
1	103,3	355	9,1	12,6	100	15,2	15,8
2	100,4	350	9,2	12,5	100	17,1	17,3
3	110,6	333	12,4	14,0	0	19,5	18,2
4	106,8	347	10,7	14,4	0	18,0	18,5
5	98,3	350	9,4	13,2	0	17,8	18,8
6	111,3	318	14,8	17,0	100	18,4	19,0
7	108,7	347	12,5	15,4	100	17,0	21,5
8	108,0	340	10,8	11,2	100	17,4	16,5
9	81,5	349	7,1	10,2	100	15,6	18,1
10	100,4	348	11,0	14,7	100	16,8	17,5

^{*)} Нумерация соответствует нумерации табл. 4.

Стекла этой серии экспериментов имели низкие значения ТКЛР, температуры начала деформации и диэлектрической проницаемости. Три из десяти составов стекол (№ 3-5) не кристаллизовались после выдержки 1 час при температуре 400 °С. Однако из-за низкой растекаемости их нельзя использовать в качестве легкоплавкой стеклоосновы в припоечных композициях.

Составы и свойства стекол в системе PbO-B₂O₃, соответствующих второй области, представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Составы стекол системы PbO 80...85, B₂O₃ 10,5...13,5 масс % с добавками

№	Состав, масс %					
	PbO	B ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZnO	RxOy ^{*)}
1	83,0	12,0	1,1	0,9	3,0	–
2	80,0	13,5	1,1	0,9	4,5	–
3	84,0	12,0	0,7	0,8	2,5	–
4	84,0	11,5	0,8	1,7	2,0	–
5	83,0	13,5	1,1	0,9	1,5	–
6	84,0	11,5	0,8	0,7	3,0	–
7	84,0	10,5	1,3	1,6	2,7	–
8	84,0	10,5	0,8	1,7	3,0	–
9	84,5	10,5	1,1	1,4	2,5	–
10	85,0	10,5	0,8	1,7	2,0	–
11	83,0	12,5	1,1	0,9	1,5	1,0
12	83,0	10,5	1,1	0,9	1,5	3,0
13	80,0	13,5	1,1	0,9	1,5	3,0
14	83,0	13,5	1,1	0,9	1,5	2,0
15	83,0	13,5	1,1	0,9	1,5	2,0

^{*)} RxOy соответствуют компонентам BaO, V₂O₅, WO₃, NiO, MoO₃ в образцах № 11-15 в порядке возрастания нумерации.

Таблица 7

Свойства стекол системы PbO 80-85, B₂O₃ 10.5-13.5 масс % с добавками

№ ^{*)}	Результаты DTA					Дилатометр. данные		Растекаемость при 400 °С с выдержкой 20 мин, мм	Степень поверхност. кристаллиз. при 400 °С с выдержкой 20 мин, %	ε при 10 ⁶ Гц и 25 °С	tg δ · 10 ⁴ при 10 ⁶ Гц и 25 °С
	t _{ст} , °С	t _{раз} , °С	t _{кр.нач} , °С	t _{кр.мах} , °С	высота пика, мм	ТКЛР, α · 10 ⁻⁷ К ⁻¹ при 50...200 °С	t _{н.д.} , °С				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	308	342	–	–	–	108,0	341	12,1	–	17,0	18,5
2	318	361	–	–	–	101,5	341	10,3	–	17,2	18,6
3	306	341	412	436	10	113,4	336	8,0	100	18,3	15,2
4	–	–	–	–	–	108,0	327	10,9	5...6	17,9	19,2
5	295	324	–	–	–	108,0	324	13,4	1...2	18,5	22,8
6	293	323	410	460	15	111,8	319	12,4	100	17,9	25,2
7	302	330	–	–	–	111,3	317	13,2	1...2	17,0	19,5
8	294	330	–	–	–	112,0	315	13,4	1...2	17,8	25,3
9	293	330	–	–	–	114,5	313	14,1	3...5	18,0	20,8

Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	297	333	410	460	29	117,3	297	12,7	50...80	18,3	21,5
11	307	345	425	469	11	105,7	348	11,2	20...40	11,2	18,7
12	281	297	340	377	52	133,4	291	8,0	50...70	8,0	14,4
13	325	350	424	470	70	104,6	348	8,0	70...80	8,0	13,5
14	330	365	470	522	33	128,7	288	9,0	50...70	9,0	15,5
15	323	359	428	463	79	116,4	347	10,0	50...70	10,0	16,3

^{*)} Нумерация соответствует нумерации табл. 6.

Исследования показали, что при содержании PbO 80...85 и В₂O₃ 10,5...13,5 масс % путем варьирования количества добавок ZnO от 1,5 до 4,5; SiO₂ 0,7...1,3; Al₂O₃ 0,7...1,7 масс % можно получить стекла практически без следов кристаллизации (№ 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, табл. 7). Поскольку основными критериями качества легкоплавкой стеклоосновы являются растекаемость и кристаллизационная способность, из указанной серии экспериментов были выбраны четыре состава (№ 5, 7, 8, 9, табл. 6) и повторно определены растекаемость и кристаллизационная способность при 400 °С с выдержкой 1 час.

Результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8

Свойства стекол, сваренных на основе кварцевой муки, глинозема и аморфного кремнезема, гидроокиси алюминия

№	Растекаемость и степень поверхностной кристаллизации при 400 °С с выдержкой 1 час стекол, сваренных на основе кварцевой муки, глинозема (I) и аморфного кремнезема, Al ₂ (OH) ₃ (II)			
	I		II	
	растекаемость, мм	степень поверх. кристаллизации, %	растекаемость, мм	степень поверх. кристаллизации, %
5	13,4	10...20	13,7	≤ 1
7	13,6	30...50	13,7	8...10
8	14,1	30...40	14,5	1...3
9	13,7	50...80	13,9	10...15

^{*)} Нумерация соответствует нумерации табл. 6.

В табл. 8 приведены также результаты степени поверхностной кристаллизации и растекаемости этих же стекол, сваренных на основе аморфного кремнезема и гидроокиси алюминия.

На основе полученных результатов в качестве стеклоосновы для припоечных композиционных материалов нами выбраны стекла № 5 и № 8 (табл. 6), сваренные из аморфного SiO₂ и гидроокиси алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любимов М.Л. Спаи металла со стеклом. – М.: Энергия. Сер. Электронное материаловедение, 1968. – 279 с.
2. Павлушкин Н.М., Журавлев А.К. Легкоплавкие стекла. – М.: Энергия, 1970. – 145 с.
3. Nagy-Szabo I. and Kalman A. Die Struktur des $K_2Pb_2Si_2O_7$ und der Bleiglaser // Silikattechnik. – 1961. – Vol. 12. – P. 316-318.
4. Цимбинью Р.А., Кобзарь С.И., Седмало Г.П. и др. Свойства и структура свинцовоборатных стекол и покрытий для защиты интегральных схем // Неорганические стекла, покрытия и материалы / РПИ. – Сб. 13. – 1975. – Вып. 2. – С. 137-143.
5. А.с. СССР № 99760, кл. С-01.
6. Геодакян Дж.А., Костанян К.А. Унанян Л.Г., Степанян С.В. К вопросу о контроле качества стеклоприпоев методом DTA // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1981. – Вып. 1(150), № 6. – С. 63-67.

НПП Материаловедения РА.

Материал поступил в редакцию 08.09.2006.

Ջ.Ա. ԳԵՈՂԱԿՅԱՆ, Բ.Վ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ս.Վ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ,
Ռ.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Կ.Զ. ԳԵՈՂԱԿՅԱՆ

ԿԱՊԱՐ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ԴՅՈՒՐԱԿԱԼ ԱՊԱԿԻՆԵՐ

Մինթեզվել և ուսումնասիրվել են տարբեր հավելանյութեր պարունակող $PbO-B_2O_3$ համակարգերի ապակիներ: Փորձականորեն ապացուցվել է բարձր հոսունությամբ և դիէլեկտրիկական հատկություններով օժտված դյուրահալ, չբյուրեղացող ապակիների ստացման հնարավորությունը, որոնք կարող են օգտագործվել որպես ապակյա հենք ցածր ջերմաստիճանային ($\leq 460^\circ C$) զոդանյութերում:

Առանցքային բառեր. դյուրահալ ապակի, ապակյա հենք, հոսունություն, չբյուրեղացող ապակի:

J.A. GEODAKYAN, B.V. PETROSYAN, S.V. STEPANYAN,
R.A. VARDANYAN, K.J. GEODAKYAN

LOW MELTING GLASSES WITH PLUMB INSERTION

Glasses in the $PbO-P_2O_5$ systems, with different insertions are synthesized and inspected. The opportunity to get an easily flowing and non-crystallizing glasses with high melting capability and with dielectric qualities which are to be used for glass foundation in low temperatures ($\leq 460^\circ C$) solder substances is experimentally proved.

Keywords: low-melting glass, glass base, flowability, noncrystallized glass.

К.А. КАРАПЕТЯН, А.О. БАХШЯН, В.В. АКОПЯН, А.К. ПОГОСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФРИКЦИОННО-ИЗНОСОСТОЙКИХ СВОЙСТВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЯДА НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Исследованы свойства ряда наполнителей в проектируемых композициях фрикционного назначения. Изучены некоторые виды минеральных наполнителей, отходов и продуктов строительных и горно-металлургических производств Армении. Показано, что некоторые из них целесообразно применять в составах полимерных фрикционных композитов.

Ключевые слова: фрикционные свойства, износостойкость, наполнители, композитный материал, прочность, твердость.

Среди современных материалов, успешно эксплуатируемых в узлах трения механизмов и машин, важное место занимают полимерные композиты (фрикционные и антифрикционные), обладающие целым комплексом необходимых физико-механических и фрикционных свойств, из которых основными считаются: достаточно высокая механическая прочность, стабильный коэффициент трения, высокое значение износостойкости, теплостойкости, отсутствие схватывания и др. [1]. Все большее ужесточение требований к указанным материалам, обусловленное повышением скорости и массы механизмов и их рабочих органов, предопределяет важность создания новых полимерных композитов, пригодных для эксплуатации в более тяжелых условиях.

Эксплуатационное качество фрикционных композиционных материалов зависит как от собственных свойств составляющих компонентов (полимерное связующее, наполнители целевого назначения), так и от их свойств в композиции [2]. Для правильного подхода к проектированию состава этих материалов целесообразно определить физико-механические и фрикционно-износостойкие свойства отдельных компонентов в композиции со связующим.

Существующий опыт применения местных горных пород с целью разработки новых фрикционных и антифрикционных полимерных материалов [3,4], а также предварительный анализ составов промышленных отходов и местного сырья, которые в комплексе содержат оксиды, сульфиды, карбиды некоторых металлов, показывают, что они могут служить ингредиентами, придающими композитам необходимые эксплуатационные свойства.

В настоящей работе делается попытка оценить поведение исходных компонентов в проектируемых композициях фрикционного назначения.

Исследования проводились на опытных образцах, изготовленных из двухкомпонентных композиций (ингредиент с размерами частиц до 50 мкм + новолак СФ-012 в соотношении 2,12:1,00), методом горячего прессования.

Технология изготовления опытных образцов следующая: смешивание ингредиентов со связующим производилось в фарфоровой шаровой

мельнице. Формовочные пресс-порошки высушивались в вакуум-сушилке при температуре 70...80^oC до содержания влаги не более 3%. Формование образцов производилось в металлических пресс-формах при температуре 165±5 ^oC и удельном давлении 65 МПа с продолжительностью прессования в течение времени из расчета до 1,5 мин. на 1 мм толщины готового образца.

Определение прочности образцов на сжатие и изгиб и твердости по методу вдавливания шарика было осуществлено согласно ГОСТ 4652-81, ГОСТ 4648-71 и ГОСТ 4670-91 соответственно, определение величины коэффициента термического линейного расширения двухкомпонентных композиций производилось на кварцевом dilatометре ДКВ-2, а определение температуры интенсивной деструкции - на дериватографе Q-1500. Фрикционные и износостойкие свойства двухкомпонентных композиций исследовались на машине трения ИМ-58 по методике испытаний на трение и износ кольцеобразных образцов с внешним и внутренним диаметрами 75 и 53 мм и высотой 10 мм. Материал контртела Сталь 40Х. Величина коэффициента взаимного перекрытия ($K_{вз}$) составляла 0,2.

При исследовании фрикционных свойств двухкомпонентных композиций исходили из того, чтобы при нормальном давлении 0,27 МПа величина температуры на поверхностях трущихся тел в течение опыта (20 мин) не превышала 150 ^oC. Замеры коэффициента трения проводились через каждую минуту. Линейная скорость скольжения на среднем диаметре кольцеобразных образцов в этом случае составляла 2,7 м/с.

Линейный износ по толщине как опытных образцов, так и контртела определялся за час испытаний при постоянном моменте трения 0,23 кГ·м и скорости скольжения 2,7 м/с.

Химические составы (масс.%) исследуемых ингредиентов, полученные в результате химических анализов, приведены в табл.1, результаты исследований физико-механических свойств двухкомпонентных композиций - в табл.2.

Согласно литературным данным, величины прочности на сжатие и изгиб, модуля упругости при изгибе асбестсодержащих фрикционных материалов колеблются в пределах соответственно 78,2...151,8; 48,4...72,8 и 3230...6900 МПа, а твердость – в пределах 190...500 Н/мм² [1]. Величины этих же характеристик для известных нам безасбестовых фрикционных материалов составляют соответственно до 150; 52 и 6600...6700 МПа и 340...360 Н/мм² [1].

Из приведенных в табл.2 данных следует, что исследуемые двухкомпонентные композиции, кроме тех, которые содержат концентрат молибдена, имеют достаточно большие значения прочности (особенно при сжатии), модуля упругости при изгибе и твердости, что является косвенным доказательством хорошей адгезии связующего с выбранными наполнителями. Отмеченный факт имеет немаловажное значение при подборе ингредиентов для создания полимерных композитов, предназначенных для эксплуатации в тяжело нагруженных узлах трения.

Таблица 1

Химические составы (масс. %) исследуемых ингредиентов
Минералы и отходы производства

	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	SO ₃	FeO	H ₂ O	П.п.п.*
Пылевидные отходы Разданского цементного завода	15,88	54,52	2,66	3,98	2,22	1,31						19,4
Обожженная глина (Ланджасар, р.Арабат), отходы производства черепицы и глиняного кирпича	58,81	6,90	5,92	19,72	2,61	2,52	3,35				0,12	
Вулканический шлак (Кармрашен)	55,18	6,37	7,6	15,73	6,81	3,02	1,21					3,67
Тул (Артик)	63,05	3,56	4,47	15,56	9,46	1,38	1,00					0,7
Диатомит (Сисиан)	75,68	1,49	2,44	9,74			1,28		0,25			8,49
Цеолит (Ноемберян)	65,41	4,62	0,44	12,96	2,16	0,82	0,14				13,23	
Доломит (Иджеван)	1,05	31,34	0,47	1,16			21,48					44,5
Мрамор (Арташат)	0,23	53,50	0,11	0,42			2,14					42,95
Серпентинит (Шоржа)	32,00	1,32	3,35	5,80			35,06			1,68	0,41	20,29
Сланец негорючий (Раздан)	64,32	4,61	5,42	13,93	0,8	0,7	2,6					7,62

* П.п.п. – потери при прокаливании.

Продукты горно-металлургического производства

	Cu	SiO ₂	Fe	Al ₂ O ₃ +TiO ₂ +P ₂ O ₅	S	CaO	MgO	Zn	Pb	Mo	As	Sn	P
Медный концентрат (Ахтала) необогащенный	17,17	5,56	33,76	1,65	36,3			0,012	0,004				
Медный концентрат (Ахтала) обогащенный	24,70	2,38	32,22	1,00	34,80			0,016	0,002				
Концентрат молибдена (Каджаран)	0,5	5,00			32,4					50,00	0,07	0,07	0,07
Отходы медно-колчеданного рудника (Ахтала)	0,46	61,58	9,68	3,12	7,25	2,65	4,39						

Таблица 2

Физико-механические и фрикционно-износные свойства двухкомпонентных композиций

Основа двухкомпонентных композиций	Удельная масса, г/см ³	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости при изгибе, МПа·10 ⁻³	Твер- дость, Н/мм ²	Коэффициент терм. линейного расширения $\alpha_{0-100} \cdot 10^{-6}, K^{-1}$	Температура начала интенсивной деструкции, °C	Коэффициент трения	Износ, мм
Отходы цементавода	2,18	330,5	84,4	192,13	640	10,2	310	0,28	0,04
Обожженная глина	2,17	415,8	99,9	217,44	710	10,9	360	0,50	0,10
Вулканический шлак	2,17	342,4	89,5	210,34	710	13,8	325	0,77	0,04
Сerpентинит	2,11	187,7	55,9	144,72	640	13,8	315	0,42	0,06
Доломит	2,28	253,0	70,8	249,84	700	12,1	330	0,40	0,02
Мрамор	2,18	267,9	58,4	173,36	670	5,4	295	0,46	0,02
Сланец негорючий	2,19	239,2	84,7	216,33	610	6,2	325	0,62	0,08
Цеолит	1,93	273,2	67,3	172,17	640	15,9	330	0,40	0,15
Туф	2,05	244,3	65,7	234,31	650	6,0	300	0,47	0,07
Диатомит	2,19	304,9	67,3	91,38	450	4,6	280	0,38	0,17
Медный концентрат необогатенный	3,00	247,2	71,4	196,33	610	11,1	320	0,44	0,29
Медный концентрат обогатенный	3,00	228,2	62,7	170,46	570	9,3	288	0,35	0,42
Концентрат молибдена	3,51	66,3	20,3	138,63	137	8,5	350	0,21	0,06
Барит	3,27	184,9	61,2	185,77	700	17,7	305	0,53	0,08
Отходы медно- колчеданного рудника	2,30	236,0	86,8	227,95	650	16,6	298	0,66	0,16
Волокно неорганического происхождения	1,81	132,9	83,4	125,82	270	5,3	350	0,46	0,09

Для наглядности расположим рассматриваемые ингредиенты (табл. 2), как это сделано в [2], в виде двух рядов, в которых они размещены соответственно в порядке убывания коэффициента трения и возрастания линейного износа:

- фрикционный ряд: вулканический шлак > отходы медно-колчеданного рудника > сланец негорючий > барит > обожженная глина > туф > волокно неорганического происхождения > мрамор > медный концентрат необогащенный > серпентинит > цеолит > доломит > диатомит > медный концентрат обогащенный > отходы цементного производства > концентрат молибдена;

- ряд износостойкости: мрамор = доломит < вулканический шлак = отходы цементного производства < концентрат молибдена = серпентинит < туф < сланец негорючий = барит < волокно неорганического происхождения < обожженная глина < цеолит < отходы медно-колчеданного рудника < диатомит < медный концентрат необогащенный < медный концентрат обогащенный.

Следует отметить, что ряд ингредиентов: вулканический шлак, отходы медно-колчеданного рудника, сланцы негорючие, барит, мрамор, в определенной мере и волокно неорганического происхождения, показали достаточно высокий (табл. 2) и весьма стабильный коэффициент трения на протяжении всего опыта, не вызывая вибрации, в то время как коэффициент трения для остальных ингредиентов к концу опытов значительно уменьшился, и имела место сильная вибрация. В этом плане особенно плохо себя показала двухкомпонентная композиция на основе туфа.

Очевидно, что указанные 6 ингредиентов целесообразно использовать в составах разрабатываемых полимерных материалов фрикционного назначения, и нужно ожидать, что они придадут композитам высокий коэффициент трения и обеспечат его стабильность.

Из данных табл. 2, относящихся к износостойкости, замечаем, что достаточно хорошую износостойкость показали двухкомпонентные композиции на основе мрамора, доломита, шлака, отходов цемзавода, серпентинита, туфа. Однако двухкомпонентные композиции на основе отходов цемзавода, как и отходов медноколчеданного рудника, барита, волокон неорганического происхождения, показавших высокие фрикционные свойства, приводят к линейному износу контртела на величину 0,01 мм.

Известно, что с целью самосмазывания, а также во избежание схватывания фрикционного материала с контртелом в процессе торможения в его состав вводится определенное количество ингредиента с малым коэффициентом трения, в качестве которого обычно применяется графит. Согласно приведенным в работе [2] данным, значение коэффициента трения графита в двухкомпонентной композиции (50% графит + 50% бакелизованная фенолформальдегидная смола) составляет 0,245. Среди рассматриваемых нами ингредиентов в качестве подобного компонента может служить концентрат молибдена, который показал сравнимый с графитом коэффициент трения (табл. 2) и достаточно хорошую стабильность на всем протяжении опыта. Добавим также, что износостойкость концентрата молибдена достаточно велика (табл. 2) и не приводит к износу контртела.

Согласно данным табл.2, перечисленные выше 6 двухкомпонентных композиций, показавших хорошие результаты в опытах на трение, а также

композиции на основе доломита, отходов цемзавода, серпентинита и туфа, показавшие достаточно хорошую износостойкость, обладают высокой температурой начала интенсивной деструкции (295...350 °C), что является положительным фактором при создании материалов с высокой фрикционной теплостойкостью. Однако композиции на основе барита, отходов медно-колчеданного рудника и цемзавода, вулканического шлака, доломита, серпентинита и туфа имеют большие коэффициенты термического линейного расширения (табл. 2), что не является положительным фактором в плане термической усталости материалов, эксплуатируемых в условиях высоких перепадов температуры. Тем не менее указанный недостаток можно компенсировать введением в состав композиции фрикционных материалов небольшого количества корректирующих добавок с низким или отрицательным термическим расширением (например, титанат свинца, эвклипит, сподумен и т.д.).

Таким образом, из вышеизложенного анализа физико-механических и фрикционно-износостойких свойств двухкомпонентных композиций в целом можно предположить, что среди рассмотренных ингредиентов есть перспективные в плане использования их для создания новых высокоэффективных фрикционных композиционных материалов. Из них особенно следует отметить мрамор и вулканический шлак, показавшие высокий коэффициент трения, низкий линейный износ и практически не приводящие к износу контртела.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ А-892.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Погосян А.К., Сысоев П.В., Меликсетян Н.Г.** и др. Фрикционные композиты на основе полимеров.- Гомель: Изд. АН Беларуси. Информтрибо, 1992.- 218с.
2. **Георгиевский Г.А.** Особенности создания теплостойких фрикционных материалов // В кн.: Повышение эффективности тормозных устройств. Свойства фрикционных материалов.- М.: Изд. АН СССР, 1959.- С.93-109.
3. **Погосян А.К., Меликсетян Н.Г., Ламбарян Н.В.** Разработка и исследование безасбестовых фрикционных композиционных материалов // Трение и износ.- 1987. - Т.8, N5.- С. 785-791.
4. **Погосян А.К., Оганесян К.В., Исаджанян А.Р.** Композиционные материалы на полимерной основе с использованием минеральных наполнителей // Трение и износ.- 2002.- Т.23, N3.- С. 324-328.

Ин-т механики НАН РА, ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.12.2005.

Կ.Ա. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա.Օ. ԲԱԽՇՅԱՆ, Վ.Վ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ա.Կ. ՊՈԴՈՍՅԱՆ

**ԵՐԿԲԱՂԱԴՐԻՉ ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐԻ ՖԻԶԻԿԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԵՎ
ՇՓԱՄԱՇԱԿԱՅՈՒՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄՆ ԱՆՕՐԳԱՆԱԿԱՆ ԼՑԱՆՑՈՒԹԵՐԻ
ՇԱՐՔԻ ՀԱՄԱՐ**

Հետազոտվել են մի շարք լցանյութերի հատկությունները նախագծվող շփական նշանակության կոմպոզիտային նյութերի բաղադրությունում: Որպես լցանյութեր օգտագործվել են Հայաստանի որոշ ապարների, շինարարական և լեռնամետալուրգիական արտադրությունների թափոններ և արտադրանք: Ցույց է տրված, որ դրանցից մի քանիսը նպատակահարմար է օգտագործել պոլիմերային շփական կոմպոզիտային նյութերի բաղադրակազմում:

Առանցքային բառեր. շփական հատկություններ, մաշակայունություն, լցանյութեր, կոմպոզիտային նյութ, կարծրություն, ամրություն:

**K.A. KARAPETYAN, A.O. BAKHSHYAN, V.V. HAKOBYAN,
A.K. POGOSIAN**

**INVESTIGATION OF PHYSICOMECHANICAL, FRICTION AND
WEAR-RESISTANT PROPERTIES OF TWO-COMPONENT POLYMERIC COMPOSITES FOR
SERIES OF INORGANIC FILLERS**

The properties of filler series in designed compositions of frictional purpose are investigated. As fillers some kinds of minerals, waste and products of building and mining-smelting manufactures of Armenia have been used. It is shown that some of them are appropriate to use in structures of polymeric frictional composites.

Keywords: frictional properties, wear resistance, fillers, composite material, strength, hardness.

Испытания осуществляются по двум этапам.

Первый этап. На этом этапе образец надевают на экспериментальную колодку и обрабатывают его в течение 30 с теплым влажным воздухом (паровоздушная смесь), который поступает в колодку через парогенератор, где вода нагревается до температуры 60...70 °С (относительная влажность 60...100 %). После чего образец взвешивают, определяют массу m_v . Затем образец снова обрабатывают теплым влажным воздухом уже в течение 60 с и снова определяют массу образца и т.д.

На следующей стадии влажно-тепловой обработки происходит сушка образцов. Сначала образец обрабатывают горячим сухим воздухом. Воздух поступает в колодку через калорифер (температура горячего сухого воздуха составляет 90...120 °С). Сперва образец обрабатывают горячим сухим воздухом в течение 120 с, после чего взвешивают и определяют массу $m_{г.с.}$. Затем образец снова обрабатывают горячим сухим воздухом уже в течение 150 с и снова определяют массу образца и т.д.

В конце этапа образцы обрабатывают холодным сухим воздухом. Воздух поступает в колодку через вентилятор (температура воздуха 15...20 °С). Сначала образец обрабатывают холодным сухим воздухом в течение 30 с, после чего взвешивают и определяют массу $m_{х.с.}$. Затем образец снова обрабатывают холодным сухим воздухом уже в течение 60 с и снова определяют массу образца и т.д. Этот процесс производится до тех пор, пока образец полностью высохнет [2].

Второй этап. На этом этапе вычисляют влагопоглощаемость образца и строят графики кривых, характеризующих зависимость количества влагопоглощаемости образца от времени увлажнения (рис.2).

Влагопоглощаемость, %, определяют по формуле

$$W_B = (m_B - m_C) \cdot 100 / m_C, \%$$

Результаты расчетов приведены в табл.1.

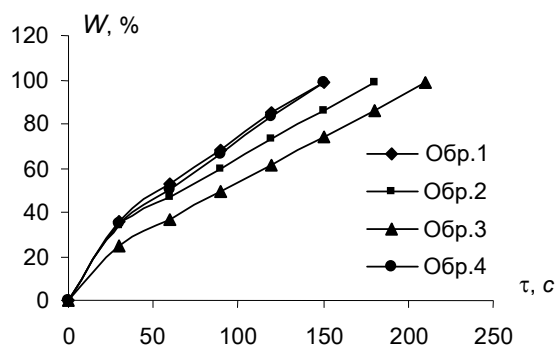


Рис. 2. Кривые зависимости количества влагопоглощаемости текстильного материала от времени увлажнения

Таблица 1

Текстильный материал	Воздух	W, %, за время τ , с						
		30	60	90	120	150	180	210
Образец 1	Теплый влажный	36	53	68	85	99	-	-
Образец 2		34	47	60	73	86	99	-
Образец 3		25	37	49	61	74	86	99
Образец 4		35	50	66	83	99	-	-

Затем вычисляют влагосодержание образцов при обработке их горячим сухим и холодным сухим воздухом. Результаты расчетов приведены в табл.2 и 3, на основе которых построены кривые сушки при обработке влажного образца горячим сухим (рис.3) и холодным сухим воздухом (рис.4) в течение времени τ .

Таблица 2

Текстильный материал	Воздух	W, %, за время τ , с						
		120	150	180	210	240	270	300
Образец 1	Горячий сухой	63	48	33	18	4	-	-
Образец 2		66	53	41	28	16	4	-
Образец 3		68	56	45	35	25	15	4
Образец 4		64	50	35	20	4	-	-

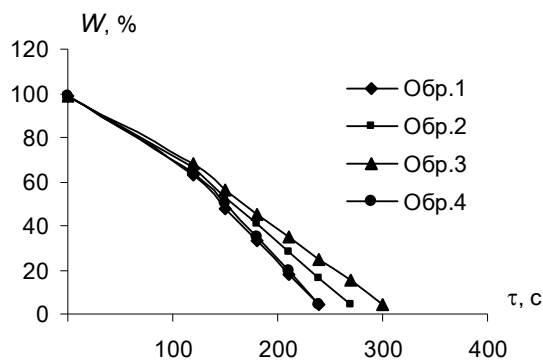


Рис. 3. Кривые сушки при обработке влажного материала горячим сухим воздухом

Таблица 3

Текстильный материал	Воздух	W, %, за время τ , с			
		30	60	90	120
Образец 1	Холодный сухой	2,0	0,1	-	-
Образец 2		2,6	1,3	0,1	-
Образец 3		3,1	2,1	1,1	61
Образец 4		2,1	0,1	-	-

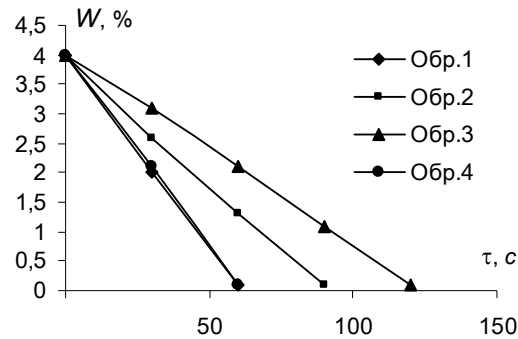


Рис. 4. Кривые сушки при обработке влажного материала холодным сухим воздухом

Закключение. Из графиков видно, что в качестве увлажняющей оболочки больше подходит образец 1, состоящий из 100 % хлопчатобумажной нити, т.к. за один и тот же промежуток времени он поглощает намного больше влаги, чем остальные образцы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Адигезалов Л.И.** Увлажнение, сушка и влажно-тепловая обработка в обувном производстве. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. – 136с.
2. **Сажин Б.С., Реутский В.А.** Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 224с.

ГФ ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.09.2006.

Զ.Ա. ՄԻՆԱՍՅԱՆ, Գ.Ս. ՄՇԵՏՅԱՆ

ԿՈՇԻԿԻ ԶԵՎԻ ՄԵՎԵՌՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՈՒՄ ԽՈՆԱՎԱՑՆՈՂ ԹԱՂԱՆԹԻ ՀԱՄԱՐ ՆՅՈՒԹԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆ

Կատարված է նյութի ընտրություն կոշիկի ձևի սևեռման գործընթացում խոնավացնող թաղանթի համար, գործընթացի տևողության և նյութի խոնավակլանման հաշվարկ:

Առանցքային բառեր. ջերմախոնավային մշակում, տաք խոնավ օդ, տաք չոր և սառը չոր օդ, խոնավապարունակություն, խոնավակլանում:

Z.A. MINASYAN, G.S. MSHETSYAN

SELECTION OF MATERIAL FOR MOISTENING MEMBRANE IN FIXATION PROCESS OF FOOTWEAR FORM

The selection of material for moistening the cover in the process of footwear form fixation is done. The calculation of process duration and material moisture-absorption is given.

Keywords: moisten-heat fixation, heat wet air, hot dry and cold air, moisture containing, moisture absorption.

ԽԱԼԿՈՊԻՐԻՏԱՅԻՆ ԽՍԱՆՅՈՒԹԻ ՀԻԴՐՈՔԼՈՐԱՅԻՆ ՏԱՐՐԱԼՈՒԾՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Հետազոտված են խալկոպիրիտային խտանյութի հիդրոքլորիդացմամբ պղնձի և երկաթի կորզման տեխնոլոգիական պարամետրերը: Ցույց է տրված նատրիումի քլորիդի լուծույթում պղնձի տարրալուծման մեխանիզմը:

Առանցքային բառեր. խալկոպիրիտ, խտանյութ, հիդրոքլորիդային տարրալուծում, երկքլորիդ, կորզում:

Խալկոպիրիտային խտանյութերը (26...28 %Cu) պղնձի արտադրության գլխա-վոր ելանյութերն են, որոնց վերամշակումը մետաղի կորզման նպատակով, կատար-վում է առավելապես պիրոմետալուրգիական եղանակով: Խտանյութի հիմնական բաղադրիչը խալկոպիրիտն է (CuFeS_2)՝ օժտված շատ մեծ կայունությամբ և դժվար մշակվելիությամբ: Այն կարող է օքսիդանալ՝ տալով կոպելիտ (CuS) և հեմաթիտ (Fe_2O_3) կամ լուծույթում վերականգնվել՝ տալով խալկոզիտ (Cu_2S) և երկաթի սուլ-ֆատ (FeSO_4)՝ անջատելով ծծմբաջրածին (H_2S) [1]:

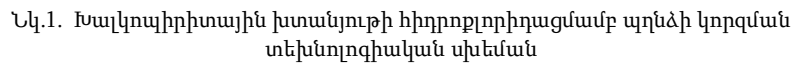
Խտանյութերի պիրոմետալուրգիական վերամշակման առավել տարածված տեխնոլոգիան դրանց հալումն է՝ պղինձ-երկաթային սուլֆիդային հալույթի (շտեյնի) ստացմամբ, որն այնուհետ ենթարկվում է կոնվերտերացման՝ կիսամաքուր պղնձի ստացման նպատակով:

Հալման վառարանները շատ թանկ են, իսկ նրանցում ընթացող պրոցեսները բավականին լուրջ բնապահպանական խնդիրներ են առաջ բերում՝ կապված ծծմբական անհիդրիդի (SO_2) անջատման հետ:

Ավանդական հիդրոմետալուրգիական տեխնոլոգիայի (խտանյութի բովում, բովվածքի ծծմբաթթվային տարրալուծում) կիրառման դեպքում SO_2 - գազի հետ կապված խնդիրները չեն լուծվում, քանի որ թթվային (H_2SO_4) տարրալուծման է ենթարկվում ոչ թե խտանյութը, այլ պահանջվում է ունենալ նրա օքսիդարար բովման արգասիքը՝ CuO , Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO և այլ օքսիդների պարունակությամբ:

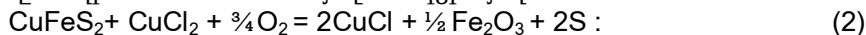
Հետազոտվող տեխնոլոգիան (նկ.1) կանխատեսում է խալկոպիրիտային խտանյութի ուղղակի տարրալուծմամբ պղնձի անցումը դեպի լուծույթ՝ տարանջատելով այն միաժամանակ երկաթից և ծծմբից: Տեխնոլոգիայի հիմքում ընկած է սուլֆիդների քլորային օքսիդացման [2] կամ տվյալ դեպքում պղնձի հիդրոքլորիդացման սկզբունքը [3]: Նկատի է առնված ջրային լուծույթում քլոր-գազի հիդրոլիզի ($\text{Cl}_{2(\text{mծ})} + \text{H}_2\text{O} = \text{HCl} + \text{HOCl}$, $\text{HOCl} = \text{H}^+ + \text{OCl}^-$) հետևանքով գոյացած քլորատ իոնների (OCl^-) շատ ուժեղ օքսիդիչ ընդունակությունը:

Հաշվի է առնված նաև այն, որ խալկոպիրիտի իոնային բյուրեղային ցանցում պղինձն առկա է միավալենտ իոնների ձևով [1], (այսինքն՝ այն $\text{Cu}^+\text{Fe}^{3+}\text{S}_2^{2-}$ իոնային տեսքի է): Հետևաբար դրա տարրալուծումից պետք է գոյանա CuCl , Fe_2O_3 և էլեմենտ-տար ծծումբ: Ընդ որում՝ քլոր-գազը գեներացվում է NaCl -ի հազեցած ջրային

$$\text{CuCl} + \frac{1}{2} \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CuCl}_2: \quad (1)$$


Վերջինիս լուծույթը՝ որպես CuFeS_2 –ի տարրալուծման ազդանյութ հավելվում է խտանյութի խյուսին՝ պատրաստված NaCl -ի ջրային լուծույթով (պ:h=1:4 հարաբերությամբ):

Խյուսի անընդհատ խառնման և օդամղման պայմաններում խալկոպիրիտային պղնձի հիդրոքլորիդացումը տեղի է ունենում հետևյալ ռեակցիայով՝



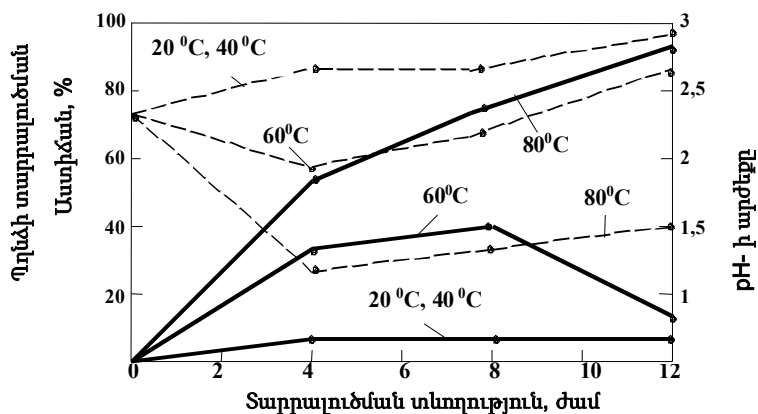
Ստացված միավալենտ պղնձի քլորիդի լուծույթի մի կեսն օգտագործվում է CuCl_2 պատրաստման համար, իսկ մյուս կեսը՝ վերամշակվում NaOH -ով, պղնձի նստեցման նպատակով՝



Պղնձի օքսիդի նստվածքը անջատվում է լուծույթից, լվացվում, չորացվում և նրանից ջրածնային վերականգնումով ստացվում է պղնձափոշի ($\text{CuO} + \text{H}_2 = \text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$):

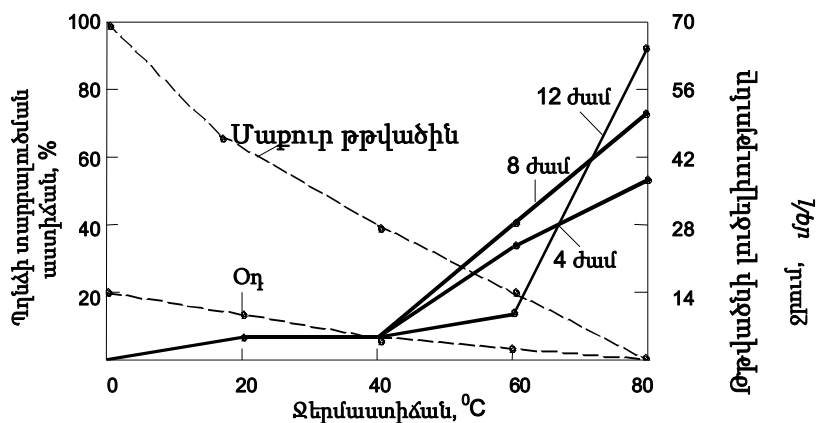
Փորձերն իրականացվել են լաբորատոր պայմաններում: Նատրիումի քլորիդի հազեցած ջրային լուծույթի (30 % NaCl) էլեկտրոլիզն իրականացվել է 1 լիտր տարողությամբ ապակեպատ վաննայում, գրաֆիտե հարթ-գուգահեռ էլեկտրոդներով, 700 U/m^2 հոսանքի խտությամբ, 38...40 °C ջերմաստիճանային պայմաններում: Խտանյութի տարրալուծումը, Cu - երկքլորիդի ստացումն ու պղնձի օքսիդի ցեմենտացումը՝ ապակյա փորձանոթներում, անընդհատ խառնման և ջերմաստիճանի ավտոմատ կարգավորման պայմաններում: Օդամղումը կատարվել է լաբորատոր սարքի օգնությամբ: Լուծույթների թթվայնության ցուցիչը չափվել է «pH 340» pH- մետրի օգնությամբ:

Հետազոտվել են տարրալուծման տևողության, լուծույթի ջերմաստիճանի ու pH -ի ազդեցությունները պղնձի կորզման աստիճանի վրա (նկ.2,3): Պղնձի կոնցենտրացիայի փոփոխությունը լուծույթում որոշվել է ֆոտոկոլորիմետրական եղանակով: Խալկոպիրիտի տարրալուծման աստիճանը ըստ պղնձի (պղնձի կորզումը) որոշվել է լուծույթում առկա միավալենտ Cu^+ իոնների և CuFeS_2 – ում դրա ընդհանուր քանակի հարաբերությամբ:



Նկ. 2. Պղնձի խտանյութի տարրալուծման աստիճանի (հոծ գծեր) և pH-ի արժեքի (կետագծեր) կախումը գործընթացի տևողությունից, տարբեր ջերմաստիճաններում

Ըստ գրաֆիկների լուծույթի ջերմաստիճանն էական ազդեցություն ունի խտա-նյութի տարրալուծման աստիճանի վրա միայն մոտավորապես 40 °C-ից բարձր պայմաններում: 80 °C-ում և 12 ժամ տևողությամբ պղնձի կորզումը հասնում է 97%: Բարձր ջերմաստիճաններում տարրալուծման արագության ավելացումը բացա-տրվում է մասնիկների դիֆուզիայի մեծացմամբ: Դա տեղի է ունենում օրինաչափո-րեն՝ չնայած թթվածնի լուծելիությունը նվազում է [4]: Ակնհայտ է, որ օդամղման թթվածինը պետք է բավարարի խալկոպիրիտի տարրալուծման ռեակցիայի պահան-ջը: 60 °C-ում տարրալուծման կորի վրա ի հայտ եկած հակառակ ազդեցությունը (նկ.2) բացատրվում է լուծույթի pH -ի ավելացումով՝ գործընթացի 4-րդ ժամից սկսած (լուծված պղինձը սկսում է նստել):



Նկ. 3. Պղնձի խտանյութի տարրալուծման աստիճանի կախումը լուծույթի ջերմաստիճանից (հոծ գծեր): Թթվածնի լուծելիության կորերը (կետագծեր) ըստ [4] տվյալների

Այսպիսով, պղնձային խտանյութի հիմնական բաղադրիչի՝ խալկոպիրիտի հիդրոքլորիդացմամբ նատրիումի քլորիդի հազեցած ջրային լուծույթում հնարավոր է ամբողջովին տարրալուծել պղինձն ու երկաթը: Դրանցից առաջինը կորզվում է լուծույթից NaOH-ով (Cl-էլեկտրոլիզի արգասիքով)՝ CuO-ի տեսքով, որն այնուհետ ենթարկվում է ջրածնային վերականգման (H_2 -ը նույնպես Cl-էլեկտրոլիզի արգասիքն է)՝ մաքուր պղնձափոշու ստացմամբ: Երկաթը կարող է կորզվել տարրալուծման սո-րախցուկից ավանդական եղանակով: Տարրալուծման ռեակցիայի երկրորդ արգա-սիքը՝ էլեմենտար ծծումբը կարող է կորզվել սորախցուկի լվացաջրերից ֆլոտաց-ման միջոցով:

1. **House C.I., Kelsall G.H.** Hydrometallurgical reduction of SnO_2 , CuFeS_2 and PbS by electro-generated Cu (II) and V(II) Solutions // In: Extraction Metallurgy 85/ Inst. Min. Metall. –1985. - P. 659 – 682.
2. **Marsden J., House I.** The Chemistry of Gold Extraction // Ellis Horwood Ltd. - 1992, Chiches-ter, England. - P. 215 - 221.
3. **Хювяринен О. HydroCooper™** – новый метод производства меди фирмы Outokumpu // Цветные металлы.- 2003.-N12.-С.36-40.
4. **Dean J.A.** Langes Handbook of Chemistry, 13th edn. McGraw-Hill, New York, 1985.

ՀղՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.04.2007:

Л.Е. САРГСЯН, В.А. ШАХНАЗАРЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОХЛОРИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ХАЛЬКОПИРИТНОГО КОНЦЕНТРАТА

Исследованы технологические параметры извлечения меди и железа гидрохлорированием халькопиритного концентрата. Показан механизм выщелачивания меди в растворе хлористого натрия.

Ключевые слова: халькопирит, концентрат, гидрохлоридное выщелачивание, двухлорид, извлечение.

L.Ye. SARGSYAN, V.A. SHAHNAZARYAN

INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETRES OF CHALCOPIRITE CONCENTRATE

The technological parameters of copper and iron recovery process by hydrochloridation of chalcopyrite concentrate are investigated. The leaching mechanism of copper in sodium chloride solutions is shown.

Keywords: chalcopyrite, concentrate, hydrochloridic leaching, dichloride, recovery.

В.О. САРКИСЯН, О.А. АБРАМЯН

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК РЕК АРМЕНИИ

Построены зависимости минимального летне-осеннего расхода от площади водосбора, а также минимального месячного стока от среднееголетнего расхода рек Арпа и Воротан, которые предлагается использовать для определения минимального стока неизученных рек этих бассейнов. Предлагается методический подход по определению возвратных вод с орошаемых полей республики.

Ключевые слова: меженный период, возвратные воды, низкий сток, водозабор, русловой баланс.

Минимальный сток рек относится к категории основных гидрологических характеристик, используемых при решении различных задач водохозяйственного проектирования. Сведения о минимальном стоке рек за последнее время приобрели большое практическое значение в связи с интенсивным использованием малых рек для целей народного хозяйства, в частности, с интенсивным развитием орошения и обводнения. Особенно актуальным являются расчеты минимального стока применительно к решению задач водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий.

В связи с этим вопросы изучения минимального стока рек, лимитирующего водопотребление и водопользование, и совершенствования методов его расчета имеют как практическое, так и научное значение.

В настоящее время при расчетах естественной величины минимального стока рек все в большей мере приходится учитывать существующее или возможное в перспективе влияние на нее интенсивного развития хозяйственной деятельности человека. Интенсивное использование водных ресурсов Армении на хозяйственные нужды с каждым годом оказывает все большее влияние на продолжительность, режим и величину речного стока в период межени. Часто в меженный период одновременно проявляется воздействие на сток рек большого количества разнообразных типов водопотребления и водопользования, обуславливающих различное соотношение отдельных видов влияния. Основное влияние происходит в летне-осенний период, когда значительная часть вод используется в целях орошения.

С целью оценки изменений минимального стока рек, вызванных влиянием хозяйственной деятельности, для основных рек территории республики были установлены периоды нарушений стока [1].

В таблице приведены минимальные средние месячные расходы воды за период летне-осенней межени как для естественного состояния, так и для нарушенных в разные периоды состояний. В результате хозяйственной деятельности минимальный среднемесячный сток за 1981-2000 гг. уменьшился, по сравнению с естественным стоком, от 16 до 83% [3].

На основе анализа условий формирования минимального летне-осеннего стока нами получены зависимости минимальных естественных расходов воды от площади водосбора бассейнов рек Арпа и Воротан (рис.1), которые предлагается использовать в водохозяйственных расчетах для определения минимального стока неизученных рек этих бассейнов.

Таблица

Оценка изменений минимального стока рек

Число	Река-пункт	Минимальный летне-осенний сток за 30 суток, $\text{м}^3/\text{с}$				Уменьшение за период 1981-2000 гг. по отношению к естественному, %
		естественный	за период до 1962г.	за период 1963-1980гг.	за период 1981-2000гг.	
1	Касах-Варденис	1.01	1.0	0.78	0.32	68.3
2	Масрик-Торф	2.97	2.92	2.03	2.49	16.2
3	Аргичи-Геташен	1.81	1.51	1.20	0.80	55.8
4	Гаварагет-Норатус	2.92	2.73	1.95	1.87	36.0
5	Арпа-Ехегнадзор	5.43	4.82	4.41	3.40	37.4
6	Арпа-Арени	9.52	8.48	5.79	4.21	55.8
7	Элегис-Шатин	3.15	3.02	2.95	2.48	21.3
8	Мегригет-Мегри	1.08	0.99	0.98	0.76	29.6
9	Вохчи-Капан	3.24	3.03	2.95	2.49	23.1
10	Воротан-Борисовка	4.25	3.27	3.12	3.04	28.5
11	Цхук-Цхук	0.68	0.31	0.29	0.21	69.1
12	Азат-Гарни	3.97	3.78	1.48	1.33	66.5
13	Памбак-Ширакамут	0.84	0.84	0.71	0.65	22.6
14	Дебед-Айрум	15.1	14.9	13.1	12.4	17.9
15	Дзорагет-Степанаван	7.12	6.18	5.51	4.94	30.6
16	Дзорагет-Гаргар	8.70	7.36	6.90	6.31	27.5
17	Севджур-Тароник	19.9	13.5	5.74	3.47	82.6
18	Севджур-Ранчпар	29.3	18.6	13.02	11.4	61.1

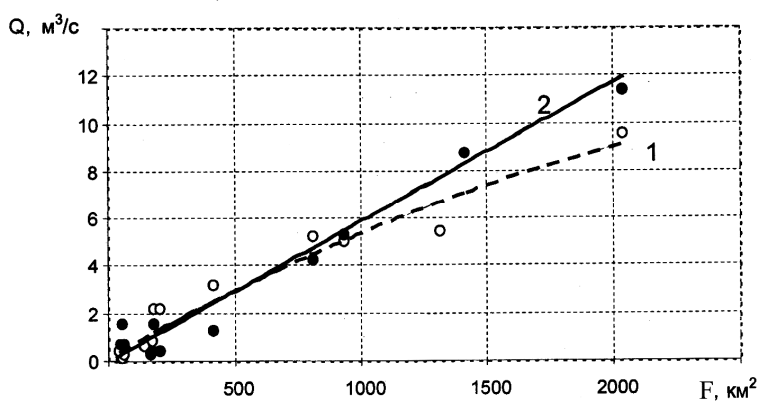


Рис. 1. Минимальный летне-осенний сток рек Арпа (1) и Воротан (2) в зависимости от площади водосбора (F)

В результате исследований получены зависимости минимального стока от среднесуточного расхода бассейнов рек Арпа и Воротан, которые предлагается использовать при составлении прогнозов минимального стока рек этих бассейнов при наличии данных о годовом стоке. Эти зависимости имеют вид

$$Q_M^B = K^B Q_G^B, \quad Q_M^A = K^A Q_G^A,$$

где Q_M^B и Q_M^A - соответственно минимальный месячный расход воды р.Воротан и р.Арпа, м³/с; Q_G^B и Q_G^A - соответственно минимальный среднегодовой расход воды р.Воротан и р.Арпа, м³/с; K^B и K^A - соответственно переходные коэффициенты для р.Воротан и р.Арпа, которые определяются по следующим уравнениям:

$$K^B = 0,013(Q_G^B / Q_C^B)^2 + 0,262(Q_G^B / Q_C^B) + 0,259,$$

$$K^A = -0,0016(Q_G^A / Q_C^A)^2 + 0,4872(Q_G^A / Q_C^A) - 0,1462,$$

где Q_C^B и Q_C^A - соответственно минимальный суточный расход воды р.Воротан – 2,08 м³/с и р.Арпа – 4,85 м³/с.

Объем промышленного и бытового водопотребления значительно уступает количеству воды, используемой в сельском хозяйстве республики. Поэтому его количественное влияние на минимальный сток не велико, к тому же большая часть использованных вод возвращается обратно в водотоки. Безвозвратное водопотребление в промышленности и коммунально-бытовом хозяйстве республики в среднем составляет 10...20%. Количественная оценка влияния орошения на величину меженного стока рек в большей степени зависит от точности расчета количества возвратных вод, попадающих снова в эти реки, величина которой определяется характером оросительной системы, строением почво-грунтов, объемом и режимом водоподачи и другими факторами.

Учитывая, что орошаемое земледелие является основным безвозвратным потребителем воды в республике, а следовательно, и наиболее действенным антропогенным фактором влияния на водные ресурсы и водный режим водосборов, был произведен анализ изменения стока рек под влиянием процесса орошения. Анализ производился на примере бассейна р.Арпа с помощью построения графиков связи между естественным суммарным притоком воды в зону использования и стоком рек в замыкающих створах для периодов с нарушенным водным режимом.

Водосборный бассейн реки Арпа можно разделить на две зоны: 1) зона формирования стока; 2) зона использования стока.

Зона формирования стока расположена в горной части бассейна, где водопотребление на хозяйственные нужды не велико или почти отсутствует. Зона использования стока речных вод расположена после выхода рек из гор, где сток претерпевает существенные изменения под влиянием хозяйственной деятельности.

На реках республики в период интенсивного водозабора вод, т.е. в летне-осенний период, сток почти полностью теряется в пределах орошаемых

массивов [2]. Вместе с тем в периферических частях орошаемых массивов речной сток начинает возрастать. Вследствие этого происходит его существенное внутригодовое перераспределение.

С целью определения величин возвратных вод с орошаемых площадей были построены гидрографы р.Арпа и его притоков за 1979 и 1980 гг. (рис.2). За эти годы водный режим указанных притоков почти не был нарушен под влиянием антропогенных факторов, поэтому сток этих рек можно принять естественным.

Линия 1 построена по данным естественных расходов притоков р. Арпа через гидростворы Арпа - Джермук, Элегис - Шатан, Грав - Агавнадзор, Гладзор - Вернашен, Ерер - Гендара, Вайк - Заритап и Терп - Чайкенд, а линия 2 - по данным расходов воды р.Арпа в замыкающем створе Арени, режим которой более чем на 55 % нарушен под влиянием хозяйственной деятельности.

Как показывает анализ результатов исследований, в начале летне-осенней межени (июнь - сентябрь), когда продолжается интенсивный отбор вод на орошение, речной сток в многолетнем разрезе до замыкающего створа (с.Арени) составляет примерно 75 % от естественной приточности. Затем по мере прекращения отбора вод сток р.Арпа увеличивается за счет поступления в русло реки возвратных вод с орошаемых полей примерно на 15...20 %.

Полученную величину возвратных вод нами предлагается учитывать при составлении водохозяйственных и русловых водных балансов бассейна р.Арпа, а также при уточнении величины минимального стока притоков р.Арпа с нарушенным водным режимом.

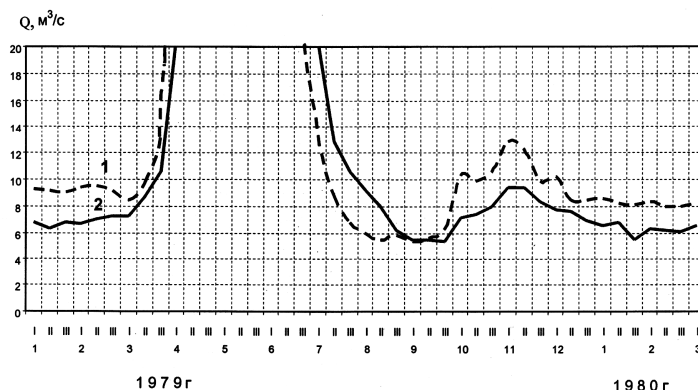


Рис. 2. Гидрографы стока в замыкающем створе р.Арпа - с.Арени (1) и естественного суммарного притока в р. Арпа (2) за 1979 – 1980 гг.

Данный методический подход определения возвратных вод с орошаемых полей предлагается использовать также для других речных бассейнов республики, имеющих аналогичные условия размещения орошаемых массивов и гидрогеологических характеристик (рр. Воротан, Касах, Мегригет, Гаварагет и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Владимиров А.М.** Сток рек в маловодный период года.- Л.: Гидрометеиздат, 1976.-295с.
2. Основные гидрологические характеристики. Т.9. Вып. 2. Армения. - Л.: Гидрометеиздат, 1979.-159с.
3. Основные гидрологические характеристики. Т.9. Вып. 2. Армения. - Л.: Гидрометеиздат, 1987.- 302 с.

ЕРԴՄԱՍ. Մատերիал փոխանցվել է խմբագրության 05.05.2006.

Վ.Հ. ՄԱՐԳՍՅԱՆ, Հ.Ա. ԱԲՐԱՄՅԱՆ

ՏՆՏԵՍԱԿԱՆ ԳՈՐԾՈՒՆԵՈՒԹՅԱՆ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԵՏԵՐԻ ՆԱՎԱԶԱԳՈՒՑՆ ՀՈՍՔԻ ՎՐԱ

Ստացվել են կապի գրաֆիկներ Արփա և Որոտան գետերի նվազագույն ամառ-աշնանային ելքի և ջրհավաք ավազանի մակերեսի, ինչպես նաև նվազագույն ամսական հոսքի և միջին տարեկան ելքի միջև, որոնք առաջարկվում է օգտագործել տվյալ գետավազանների չուսումնասիրված գետերի նվազագույն հոսքի որոշման համար: Առաջարկվում է մեթոդական մոտեցում՝ հանրապետությունում ոռոգման դաշտերից հետադարձ ջրերի ելքի որոշման համար:

Առանցքային բառեր. սակավաջրության ժամանակաշրջան, հետադարձ ջրեր, ջրառ, նավազագույն հոսք, հունային հաշվեկշիռ:

V.H. SARGSYAN, H.A. ABRAMYAN

ASSESSMENT OF ECONOMICAL ACTIVITY ON THE MINIMAL FLOW OF ARMENIAN RIVERS

The dependencies of the minimal summer-autumn flow on the catchment area as well as of the minimal monthly flow on average long-term flow of rivers Arpa and Vorotan, suggested to use for defining the minimal flow in the non-investigated rivers of these basins are developed. The given methodical approach to assessing the returning waters from irrigated lands is recommended for use as a sample for the Republic's rivers that have similar hydrological characteristics and zoning of irrigated lands.

Keywords: low water flow period, drain waters, minimum flow, bed balance.

В.С. ХАЧАТРЯН, С.Э. ГРИГОРЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРИРОСТОВ ПОТЕРЬ МОЩНОСТЕЙ ПРИ P-U И P-Q ТИПАХ СТАЦИОННЫХ УЗЛОВ

Предлагается метод определения относительных приростов потерь мощностей, когда на режимные параметры станционных узлов налагаются ограничения типа неравенств. Рассматривается случай, когда станционные узлы одновременно могут быть как типа P-U, так и типа P-Q.

Ключевые слова: матрица, узел, модель, станция, потеря, мощность, модуль, система, режим.

В настоящее время имеется множество методов по расчету установившихся режимов и частных производных от потерь мощностей по мощностям станционных узлов [1-10]. Однако все эти методы разработаны для случая, когда независимые станционные узлы являются узлами либо типа P-U, либо типа P-Q. В [9] рассмотрен случай, когда станционные узлы одновременно могут быть как типа P-U, так и типа P-Q. Однако в указанной работе не учтены ограничения типа неравенств, налагаемые на режимные параметры, что является решающим фактором для получения физически реальных электрических режимов ЭЭС. В настоящей работе впервые рассматривается случай, когда независимые станционные узлы являются одновременно типа P-U и P-Q и когда на их режимные параметры налагаются ограничения типа неравенств.

Для построения математической модели допустимых относительных приростов потерь выбирается та же система индексов, что и в [9]. При этом математическая модель допустимых относительных приростов потерь представляется в виде

$$\Pi_a = \Pi_a(P, Q, U, \Psi_u), \quad (1)$$

$$\Pi_p = \Pi_p(P, Q, U, \Psi_u), \quad (2)$$

$$\Phi_{pi}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{pm}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{pk}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{pt}(P, Q, U, \Psi_u) = 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$\Phi_{qi}(P, Q, U, \Psi_u) = \begin{cases} \Phi_{qm}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{qk}(P, Q, U, \Psi_u) = 0, \\ \Phi_{qt}(P, Q, U, \Psi_u) = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$U_{m,\min} \leq U_m \leq U_{m,\max}, \quad (5)$$

$$Q_{m,\min} \leq Q_m \leq Q_{m,\max},$$

$$U_{k,\min} \leq U_k \leq U_{k,\max}, \quad (6)$$

$$Q_{k,\min} \leq Q_k \leq Q_{k,\max},$$

где Π_a и Π_p - функции потерь активной и реактивной мощностей, зависящие от узловых режимных параметров; (3), (4) - системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима, написанные соответственно относительно независимых станционных узлов типа P-U и P-Q и нагрузочных узлов типа P-Q; (5), (6) - ограничения типа неравенств, налагаемые соответственно относительно станционных узлов типа P-U и P-Q; $U_{m,\max}$, $Q_{m,\max}$, $U_{k,\max}$, $Q_{k,\max}$ - допустимые предельные максимальные значения модулей комплексных напряжений и реактивных мощностей соответственно для станционных узлов типа P-U и P-Q; $U_{m,\min}$, $Q_{m,\min}$, $U_{k,\min}$, $Q_{k,\min}$ - допустимые предельные минимальные значения модулей комплексных напряжений и реактивных мощностей соответственно для станционных узлов типа P-U и P-Q.

При этом частные производные от потерь активной и реактивной мощностей по активным мощностям независимых станционных узлов определяются в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_a}{\partial P_\alpha} = & \left(\frac{\partial \Pi_a}{\partial P_\alpha} \right) + \sum_{n=1}^{\Gamma_1} \frac{\partial \Pi_a}{\partial Q_n} \frac{\partial Q_n}{\partial P_\alpha} + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} \frac{\partial \Pi_a}{\partial U_\ell} \frac{\partial U_\ell}{\partial P_\alpha} + \sum_{\tau=\Gamma+1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial U_\tau} \frac{\partial U_\tau}{\partial P_\alpha} + \\ & + \sum_{n=1}^{\Gamma_1} \frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{un}} \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial P_\alpha} + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} \frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{u\ell}} \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial P_\alpha} + \sum_{\tau=\Gamma+1}^M \frac{\partial \Pi_a}{\partial \Psi_{u\tau}} \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial P_\alpha}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi_p}{\partial P_\alpha} = & \left(\frac{\partial \Pi_p}{\partial P_\alpha} \right) + \sum_{n=1}^{\Gamma_1} \frac{\partial \Pi_p}{\partial Q_n} \frac{\partial Q_n}{\partial P_\alpha} + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} \frac{\partial \Pi_p}{\partial U_\ell} \frac{\partial U_\ell}{\partial P_\alpha} + \sum_{\tau=\Gamma+1}^M \frac{\partial \Pi_p}{\partial U_\tau} \frac{\partial U_\tau}{\partial P_\alpha} + \\ & + \sum_{n=1}^{\Gamma_1} \frac{\partial \Pi_p}{\partial \Psi_{un}} \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial P_\alpha} + \sum_{\ell=\Gamma_1+1}^{\Gamma} \frac{\partial \Pi_p}{\partial \Psi_{u\ell}} \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial P_\alpha} + \sum_{\tau=\Gamma+1}^M \frac{\partial \Pi_p}{\partial \Psi_{u\tau}} \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial P_\alpha}. \end{aligned} \quad (8)$$

Выражения частных производных, входящих в (7) и (8), приводятся в [9].

Относительно систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (3), (4) можно написать

(9)

Представим систему уравнений (9) в виде матричного уравнения

$$\begin{bmatrix}
\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\tau} \\
\frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{pk}} \\
\frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{pt}} \\
\frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{qm}} \\
\frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{qk}} \\
\frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{qt}} \\
\frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Psi_{u\ell}}
\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial P_\alpha} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Psi_{u\ell}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Psi_{u\tau}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial Q_n} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial U_\ell} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial U_\tau} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_\alpha} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{pk}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{pt}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{qm}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{qk}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{qt}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial P_\alpha} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Следует отметить, что выражения частных производных, входящих в квадратную матрицу уравнений (10), также приводятся в [9].

Искомые частные производные определяются в виде

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial P_\alpha} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Psi_{u\ell}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Psi_{u\tau}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial Q_n} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial U_\ell} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial U_\tau} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\tau} \\ \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{pk}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{pk}} \\ \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{pt}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{pt}} \\ \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{qm}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{qm}} \\ \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{qk}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{qk}} \\ \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Phi_{qt}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Phi_{qt}} \\ \frac{\partial \Psi_{un}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Psi_{u\tau}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial Q_n}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial U_\ell}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial U_\tau}{\partial \Psi_{u\ell}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_\alpha} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{pk}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{pt}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{qm}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{qk}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial \Phi_{qt}} \\ \frac{\partial P_\alpha}{\partial P_\alpha} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Теперь рассмотрим решение систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (3), (4) с помощью метода Ньютона-Рафсона, при котором соответствующее рекуррентное выражение при P-Q типах всех стационарных узлов имеет вид

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um} \\ \Psi_{uk} \\ \Psi_{ut} \\ U_m \\ U_k \\ U_t \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um} \\ \Psi_{uk} \\ \Psi_{ut} \\ U_m \\ U_k \\ U_t \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \Delta\Psi_{ut} \\ \Delta U_m \\ \Delta U_k \\ \Delta U_t \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где I – номер итерации.

Столбцовая матрица с элементами $\Delta\Psi_{um}, \Delta\Psi_{uk}, \Delta\Psi_{ut}; \Delta U_m, \Delta U_k, \Delta U_t$ определяется на основании матричного выражения

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\tau} \\ \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\tau} \\ \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial U_\tau} \\ \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_\tau} \\ \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_\tau} \\ \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial \Psi_{un}} & \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial \Psi_{u\ell}} & \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial \Psi_{u\tau}} & \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial U_n} & \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial U_\ell} & \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial U_\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \Delta\Psi_{ut} \\ \Delta U_m \\ \Delta U_k \\ \Delta U_t \end{bmatrix}. \quad (13)$$

В (13) $\Phi_{pm}, \Phi_{pk}, \Phi_{pt}; \Phi_{qm}, \Phi_{qk}, \Phi_{qt}$ определяются выражениями

$$\begin{cases} \Delta P_m = P_m - [P_{Bm} + \Phi_{pm}(P, Q, U, \Psi_u)] = \Phi_{pm}, \\ \Delta P_k = P_k - [P_{Bk} + \Phi_{pk}(P, Q, U, \Psi_u)] = \Phi_{pk}, \\ \Delta P_t = P_t - [P_{Bt} + \Phi_{pt}(P, Q, U, \Psi_u)] = \Phi_{pt}; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_m = Q_m - [Q_{Bm} + \Phi_{qm}(P, Q, U, \Psi_u)] = \Phi_{qm}, \\ \Delta Q_k = Q_k - [Q_{Bk} + \Phi_{qk}(P, Q, U, \Psi_u)] = \Phi_{qk}, \\ \Delta Q_t = Q_t - [Q_{Bt} + \Phi_{qt}(P, Q, U, \Psi_u)] = \Phi_{qt}. \end{cases} \quad (15)$$

Следует отметить, что аналитические выражения функций $\Phi_{pm}, \Phi_{pk}, \Phi_{pt}; \Phi_{qm}, \Phi_{qk}, \Phi_{qt}$ приводятся в [9] в виде (27)-(30).

Если ввести следующие обозначения:

$$\begin{cases} a_{mn} = \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}}, a_{m\ell} = \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\ell}}, a_{m\tau} = \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{u\tau}}, \\ a_{kn} = \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{un}}, a_{k\ell} = \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{u\ell}}, a_{k\tau} = \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{u\tau}}, \\ a_{un} = \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial \Psi_{un}}, a_{u\ell} = \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial \Psi_{u\ell}}, a_{u\tau} = \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial \Psi_{u\tau}}; \end{cases} \begin{cases} b_{mn} = \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n}, b_{m\ell} = \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\ell}, b_{m\tau} = \frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_\tau}, \\ b_{kn} = \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n}, b_{k\ell} = \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\ell}, b_{k\tau} = \frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_\tau}, \\ b_{un} = \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial U_n}, b_{u\ell} = \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial U_\ell}, b_{u\tau} = \frac{\partial \Phi_{pt}}{\partial U_\tau}; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} c_{mn} = \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{un}}, c_{m\ell} = \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{u\ell}}, c_{m\tau} = \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{u\tau}}, \\ c_{kn} = \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{un}}, c_{k\ell} = \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{u\ell}}, c_{k\tau} = \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{u\tau}}, \\ c_{un} = \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial \Psi_{un}}, c_{u\ell} = \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial \Psi_{u\ell}}, c_{u\tau} = \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial \Psi_{u\tau}}; \end{cases} \begin{cases} d_{mn} = \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n}, d_{m\ell} = \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_\ell}, d_{m\tau} = \frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_\tau}, \\ d_{kn} = \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_n}, d_{k\ell} = \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_\ell}, d_{k\tau} = \frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_\tau}, \\ d_{un} = \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial U_n}, d_{u\ell} = \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial U_\ell}, d_{u\tau} = \frac{\partial \Phi_{qt}}{\partial U_\tau}, \end{cases} \quad (17)$$

то матричное уравнение (13) примет вид

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{mn} & a_{m\ell} & a_{m\tau} & b_{mn} & b_{m\ell} & b_{m\tau} \\ a_{kn} & a_{k\ell} & a_{k\tau} & b_{kn} & b_{k\ell} & b_{k\tau} \\ a_{tn} & a_{t\ell} & a_{t\tau} & b_{tn} & b_{t\ell} & b_{t\tau} \\ c_{mn} & c_{m\ell} & c_{m\tau} & d_{mn} & d_{m\ell} & d_{m\tau} \\ c_{kn} & c_{k\ell} & c_{k\tau} & d_{kn} & d_{k\ell} & d_{k\tau} \\ c_{tn} & c_{t\ell} & c_{t\tau} & d_{tn} & d_{t\ell} & d_{t\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{um} \\ \Delta \Psi_{uk} \\ \Delta \Psi_{ut} \\ \Delta U_m \\ \Delta U_k \\ \Delta U_t \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Обращая неособенную квадратную матрицу коэффициентов матричного уравнения (18), установим следующее выражение для определения $\Delta \Psi_{um}, \Delta \Psi_{uk}, \Delta \Psi_{ut}; \Delta U_m, \Delta U_k, \Delta U_t$:

$$\begin{bmatrix} \Delta \Psi_{um} \\ \Delta \Psi_{uk} \\ \Delta \Psi_{ut} \\ \Delta U_m \\ \Delta U_k \\ \Delta U_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \alpha_{m\ell} & \alpha_{m\tau} & \beta_{mn} & \beta_{m\ell} & \beta_{m\tau} \\ \alpha_{kn} & \alpha_{k\ell} & \alpha_{k\tau} & \beta_{kn} & \beta_{k\ell} & \beta_{k\tau} \\ \alpha_{tn} & \alpha_{t\ell} & \alpha_{t\tau} & \beta_{tn} & \beta_{t\ell} & \beta_{t\tau} \\ \gamma_{mn} & \gamma_{m\ell} & \gamma_{m\tau} & \delta_{mn} & \delta_{m\ell} & \delta_{m\tau} \\ \gamma_{kn} & \gamma_{k\ell} & \gamma_{k\tau} & \delta_{kn} & \delta_{k\ell} & \delta_{k\tau} \\ \gamma_{tn} & \gamma_{t\ell} & \gamma_{t\tau} & \delta_{tn} & \delta_{t\ell} & \delta_{t\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_t \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ являются элементами обращенной матрицы, причем обращение данной матрицы целесообразно осуществлять блочным методом.

Согласно постановке задачи, независимые стационарные узлы с индексом $m(n)$ являются типа P-U, при котором можем написать:

$$[\Delta U_m] = 0. \quad (20)$$

В результате матричное выражение (19) примет вид

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \Delta\Psi_{ut} \\ 0 \\ \Delta U_k \\ \Delta U_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \alpha_{m\ell} & \alpha_{m\tau} & \beta_{mn} & \beta_{m\ell} & \beta_{m\tau} \\ \alpha_{kn} & \alpha_{k\ell} & \alpha_{k\tau} & \beta_{kn} & \beta_{k\ell} & \beta_{k\tau} \\ \alpha_{tn} & \alpha_{t\ell} & \alpha_{t\tau} & \beta_{tn} & \beta_{t\ell} & \beta_{t\tau} \\ \gamma_{mn} & \gamma_{m\ell} & \gamma_{m\tau} & \delta_{mn} & \delta_{m\ell} & \delta_{m\tau} \\ \gamma_{kn} & \gamma_{k\ell} & \gamma_{k\tau} & \delta_{kn} & \delta_{k\ell} & \delta_{k\tau} \\ \gamma_{tn} & \gamma_{t\ell} & \gamma_{t\tau} & \delta_{tn} & \delta_{t\ell} & \delta_{t\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_t \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Представим матричное уравнение (21) в виде совокупности следующих трех подматричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um} \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \Delta\Psi_{ut} \\ \Delta U_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{mn} & \alpha_{m\ell} & \alpha_{m\tau} & \beta_{mn} & \beta_{m\ell} & \beta_{m\tau} \\ \alpha_{kn} & \alpha_{k\ell} & \alpha_{k\tau} & \beta_{kn} & \beta_{k\ell} & \beta_{k\tau} \\ \alpha_{tn} & \alpha_{t\ell} & \alpha_{t\tau} & \beta_{tn} & \beta_{t\ell} & \beta_{t\tau} \\ \gamma_{tn} & \gamma_{t\ell} & \gamma_{t\tau} & \delta_{tn} & \delta_{t\ell} & \delta_{t\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_t \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$[0] = [\gamma_{mn} \mid \gamma_{m\ell} \mid \gamma_{m\tau} \mid \delta_{mn} \mid \delta_{m\ell} \mid \delta_{m\tau}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_t \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$[\Delta U_k] = [\gamma_{kn} \mid \gamma_{k\ell} \mid \gamma_{k\tau} \mid \delta_{kn} \mid \delta_{k\ell} \mid \delta_{k\tau}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_t \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Рассмотрим матричное выражение (23), представляя его в виде

$$[0] = [\gamma_{mn}] \cdot [\Delta P_m] + [\gamma_{m\ell}] \cdot [\Delta P_k] + [\gamma_{m\tau}] \cdot [\Delta P_t] + [\delta_{mn}] \cdot [\Delta Q_m] + [\delta_{m\ell}] \cdot [\Delta Q_k] + [\delta_{m\tau}] \cdot [\Delta Q_t]. \quad (25)$$

На основании (25) можно установить следующее выражение для ΔQ_m :

$$[\Delta Q_m] = -[\delta_{mn}]^{-1} \cdot [\Delta_{m\tau}], \quad (26)$$

где

$$[\Delta_{m\tau}] = [\gamma_{mn}] \cdot [\Delta P_m] + [\gamma_{m\ell}] \cdot [\Delta P_k] + [\gamma_{m\tau}] \cdot [\Delta P_t] + [\delta_{m\ell}] \cdot [\Delta Q_k] + [\delta_{m\tau}] \cdot [\Delta Q_t]. \quad (27)$$

Поскольку имеются предварительные численные значения

$\Delta P_m, \Delta P_k, \Delta P_t, \Delta Q_k, \Delta Q_t$, то на основании (26) можно установить численные значения реактивных мощностей независимых станционных узлов типа P-U, т.е. индексом $m(n)$:

$$\Delta Q_m (m = 1, 2, \dots, \Gamma_1). \quad (28)$$

Действительные значения реактивных мощностей тех же узлов определяются в виде

$$Q_m = \Delta Q_m + \varphi_{qm}. \quad (29)$$

Затем, имея численное значение ΔU_k , на основании (24), пользуясь пятой строкой выражения (12), устанавливаются численные значения искомым модулей комплексного напряжения станционного узла с индексом $k(\ell)$ - U_k :

$$[U]_k^l = [U]_k^0 - [\gamma_{kn} \mid \gamma_{k\ell} \mid \gamma_{kt} \mid \delta_{kn} \mid \delta_{k\ell} \mid \delta_{kt}] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_m}{\Delta P_k} \\ \frac{\Delta P_t}{\Delta Q_m} \\ \frac{\Delta Q_k}{\Delta Q_t} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

или

$$[U]_k^l = [U]_k^0 - [\gamma_{kn}] \cdot [\Delta P_m] + [\gamma_{k\ell}] \cdot [\Delta P_k] + [\gamma_{kt}] \cdot [\Delta P_t] + [\delta_{kn}] \cdot [\Delta Q_m] + [\delta_{k\ell}] \cdot [\Delta Q_k] + [\delta_{kt}] \cdot [\Delta Q_t]. \quad (31)$$

В результате имеем численные значения Q_m и U_k . Проверяем условия их допустимостей:

$$Q_{m,\min} \leq Q_m \leq Q_{m,\max}, \quad (32)$$

$$U_{k,\min} \leq U_k \leq U_{k,\max}. \quad (33)$$

Предположим, что при проверке условия допустимости реактивных мощностей станционных узлов типа P-U согласно (32) и модулей комплексных напряжений станционных узлов типа P-Q согласно (33) обеспечиваются. Это означает, что численные значения реактивных мощностей станционных узлов типа $P_m - U_m, Q_m$ и модули комплексных напряжений станционных узлов типа $P_k - Q_k, U_k$ находятся в пределах допустимости.

Другие искомые режимные параметры определяются на основании следующего выражения:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um}}{\Psi_{uk}} \\ \frac{\Psi_{ut}}{U_t} \end{bmatrix}^l = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um}}{\Psi_{uk}} \\ \frac{\Psi_{ut}}{U_t} \end{bmatrix}^0 - \begin{bmatrix} \frac{\Delta \Psi_{um}}{\Delta \Psi_{uk}} \\ \frac{\Delta \Psi_{ut}}{\Delta U_t} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

причем $\Delta\Psi_{um}$, $\Delta\Psi_{uk}$, $\Delta\Psi_{ut}$; ΔU_t определяются на основании (22).

Необходимо отметить, что в конечном итоге задача допустимого установившегося режима ЭЭС при $P_m - U_m$ и $P_k - Q_k$ типах станционных узлов на данной итерации решена. В результате матрица Якоби выражения (13) и, следовательно, матрица Якоби выражения (11) будут допустимыми. Затем, для данной итерации определяются допустимые относительные приросты.

Завершая первую итерацию, переходим к осуществлению последующей итерации, и если при этом условия (32), (33) также удовлетворяются, то решение поставленной задачи продолжается до установления численных значений допустимых относительных приростов.

Решение поставленной задачи считается завершенным, если обеспечиваются условия сходимости:

$$|P_m - [P_{bm} + \varphi_{pm}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta P_m, \quad |Q_m - [Q_{bm} + \varphi_{qm}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta Q_m; \quad (35)$$

$$|P_k - [P_{bk} + \varphi_{pk}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta P_k, \quad |Q_k - [Q_{bk} + \varphi_{qk}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta Q_k; \quad (36)$$

$$|P_t - [P_{bt} + \varphi_{pt}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta P_t, \quad |Q_t - [Q_{bt} + \varphi_{qt}(P, Q, U, \Psi_u)]| \leq \Delta Q_t, \quad (37)$$

где ΔP_m , ΔP_k , ΔP_t , ΔQ_m , ΔQ_k , ΔQ_t являются заданными положительными величинами, характеризующими точность установления численных значений искомых режимных переменных.

Для ослабления условия сходимости принимаются следующие допущения:

$$\begin{aligned} \Delta P_m = \Delta P_k = \Delta P_t = \Delta P, \\ \Delta Q_m = \Delta Q_k = \Delta Q_t = \Delta Q. \end{aligned} \quad (38)$$

В других случаях необходимо поступить так, как это предложено в [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С., Балабекян М.А.** К теории оптимизации режимов больших электроэнергетических систем // Электричество.-1980.-N 10.-С 55-57.
2. **Горнштейн В.М.** Методы оптимизации режимов энергосистем.-М.: Энергоиздат, 1981.-336 с.
3. **Веников В.А.** Электрические системы в примерах и иллюстрациях.-М.: Энергоиздат, 1983.-504 с.
4. **Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А.** Оптимизация режимов электростанций и энергосистем.-М.: Энергоиздат, 1990.-350 с.
5. **Хачатрян В.С.** К вопросу об определении производных от потерь активной и реактивной мощности по активным мощностям станционных узлов // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1970.- N 2.-С. 101-108.
6. **Хачатрян В.С.** Метод определения относительных приростов потерь в сетях больших электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1974.- N 5.-С. 138-142.

7. **Хачатрян В.С.** Метод определения относительных приростов потерь в сетях больших электроэнергетических систем при задании P-Q режимных параметров станционных узлов // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.-1974.-N 2.-С. 57-65.
8. **Хачатрян В.С., Мнацаканян М.А.** Определение допустимых относительных приростов потерь активной мощности электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2005.-Т. 58, N 2.-С. 260-268.
9. **Хачатрян В.С., Григорян С.Э.** Метод определения частных производных от потерь активной и реактивной мощностей электроэнергетической системы по активным мощностям станционных узлов // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2006.-Т. 59, N 3.- С. 539-548.
10. **Григорян С.Э.** Метод расчета допустимого установившегося режима электроэнергетической системы // Вестник ИАА.-2006.-Т.3, N 1.-С. 54-65.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.06.2006.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ս.Է. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

P-U ԵՎ P-Q ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊԲՈՒՄ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ԹՈՒՑԱՏՐԵԼԻ ՀԱՐԱՔԵՐԱԿԱՆ ԱՃԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Առաջարկվում է հզորության կորուստների հարաբերական աճերի որոշման մեթոդ, երբ կայանային հանգույցների ռեժիմային պարամետրերի վրա դրվում են անհավասարության տեսքի սահմանափակումներ: Դիտարկվում է այն դեպքը, երբ կայանային հանգույցները միաժամանակ կարող են լինել ինչպես P-U, այնպես էլ P-Q տեսքերի:

Առանձնային բառեր. մատրից, հանգույց, մոդել, կայան, կորուստ, հզորություն, մոդուլ, համակարգ, ռեժիմ:

V.S. KHACHATRYAN, S.E.GRIGORYAN

METHOD FOR DEFINING ALLOWABLE RELATIVE GAINS OF CAPACITIES LOSSES AT P-U AND P-Q TYPES OF STATION UNITS

The method for defining relative gains of capacities losses when restrictions are imposed on regime parameters of station units such as inequalities is offered. The case when station units can simultaneously be both such as P-U, and such as P-Q is considered.

Keywords: matrix, unit, model, station, loss, capacity, module, system, mode.

Т.С. ГНУНИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0.38/0.22 кВ АРМЕНИИ

Исследованы величины коэффициентов, характеризующих суточные графики нагрузки в электрических сетях 0.38/0.22 кВ Армении. На основе данных натурных измерений режимных параметров головных участков трехфазных магистральных линий электроснабжения сетей 0.38/0.22 кВ Армении сформированы выборки, состоящие из характеризующих суточные графики нагрузки коэффициентов и сгруппированные по признакам сезонности, типа населенных пунктов, состава потребителей. На основе статистического анализа выборок получены теоретические законы их распределения и определены уточненные значения коэффициентов неравномерности.

Ключевые слова: коэффициенты, натурные измерения, электрические сети, статистический анализ, закон распределения.

Объем отпущенной потребителям электроэнергии в электросетях 0.38/0.22 кВ за отчетный месяц определяется в Армении на основе единовременного считывания показаний счетчиков активной энергии в течение первого календарного дня последующего месяца, что позволяет рассчитать среднее значение тока нагрузки I_{cp} . Однако величина потерь электроэнергии зависит также от характера потребления. В соответствии с известными подходами [1, 2] и “Методикой расчета технологических потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 0.38-35 кВ” [3], утвержденной Комиссией по регулированию общественных услуг РА, расчет нагрузочных потерь электроэнергии в элементах электрических сетей 0.38/0.22 кВ осуществляется по формуле

$$\Delta W = K(I_{cp}^2 R)T, \quad (1)$$

где K - коэффициент неравномерности графика нагрузки; I_{cp} - среднее значение тока нагрузки; R - активное сопротивление элемента электрической сети; T - длительность расчетного периода.

Коэффициент неравномерности представляет собой произведение трех составляющих, приближенные значения которых, в соответствии с указанной выше методикой [3], определяются на основе данных натурных измерений по формулам

$$K = K_1 K_2 K_3, \quad (2)$$

$$K = \frac{3n}{D} \sum_{i=1}^n (I_{Ai}^2 + I_{Bi}^2 + I_{Ci}^2 + FI_{Ni}^2), \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{n}{D} \sum_{i=1}^n (I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci})^2, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{3n^2}{D} (I_{Acp}^2 + I_{Bcp}^2 + I_{Ccp}^2 + FI_{Ncp}^2), \quad (5)$$

$$D = \left[\sum_{i=1}^n (I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci}) \right]^2, \quad (6)$$

где $n = T / \Delta t$ - число измерений за расчетный период T при заданном шаге дискретизации измерений Δt ; I_A, I_B, I_C - значения фазных токов; I_N - значение тока в нейтральном проводе; i - индекс, указывающий на значение тока в i -ом измерении; cp - индекс среднего значения тока за расчетный период; $F = R_N / R_\phi$ - отношение сопротивлений нейтрального R_N и фазного R_ϕ проводов; $K_1 = K_\phi^2$ - коэффициент, учитывающий форму кривой графика нагрузки K_ϕ ; K_2 - коэффициент, учитывающий уровень фазной несимметрии; K_3 - коэффициент, учитывающий изменение уровня фазной несимметрии во времени.

Кроме приведенных выше коэффициентов, графики нагрузки характеризуются также коэффициентами заполнения $k_{зап}$, несимметрии токов k_2 , неуровновешенности линейных токов k_0 и неравномерности загрузки фаз k_3 , величины которых определяются по формулам [4]

$$k_{зап} = \frac{P_{cp}}{P_{max}}, \quad (7)$$

$$k_2 = \left| \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|, \quad (8)$$

$$k_0 = \left| \frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_1} \right|, \quad (9)$$

$$k_3 = \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2}{(I_A + I_B + I_C)^2}, \quad (10)$$

где P_{cp} и P_{max} - средняя и максимальная мощности графика нагрузки соответственно; I_1, I_2, I_0 - токи прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Коэффициент неравномерности является интегральным показателем характера потребления электроэнергии в сетях 0.38/0.22 кВ, и выбору его значения необходимо уделять особое внимание, поскольку, в конечном итоге, он определяет точность результатов расчета потерь электроэнергии. Кроме

того, в ходе разработки рекомендаций по снижению потерь возникает необходимость анализа величин некоторых из приведенных выше коэффициентов.

Целью настоящей статьи является исследование величины коэффициентов, характеризующих графики нагрузки.

С 1998г. ЗАО “Научно-исследовательский институт энергетики” проводит приборные измерения суточных графиков нагрузки электрических сетей 0.38/0.22 кВ Армении. По результатам этих измерений сформирована база данных, включающая режимные параметры графиков нагрузок рабочих дней для 545 головных участков трехфазных магистральных линий (ГУТМЛ) электроснабжения.

Для статистической обработки полученных выборок нами разработан [5] и реализован следующий алгоритм:

- Из располагаемой базы данных с учетом выражений (2)-(10) сформированы выборки, состоящие из 437 элементов каждого из коэффициентов, характеризующих графики нагрузки, для региональных электросетей, и из 208 элементов – для электросетей г. Еревана.

- Элементы выборок представлены в виде вариационного ряда. Корректность выбора числа и ширины интервалов вариационного ряда обеспечена использованием формулы Стерджеса [6].

- Определены статистические характеристики вариационного ряда, а именно – среднее арифметическое элементов выборки $\bar{X}$ и среднее квадратическое отклонение s .

- В соответствии с характером распределения эмпирических частот $F(x)$ рассмотрены две альтернативные гипотезы о теоретическом законе распределения элементов выборки. В соответствии с первой гипотезой принято предположение о нормальном законе распределения $F_n(x)$ с состоятельной оценкой s_n , а в соответствии со второй – предположение о логнормальном законе распределения $F_{лн}(x)$ с состоятельной оценкой $s_{лн}$.

- Проверка соответствия эмпирического распределения $F(x)$ принятым выше гипотезам о теоретическом законе распределения осуществлена с использованием критерия Колмогорова [6] λ_α , справочное значение которого принято на уровне значимости $\alpha=0,05$. Для каждой i -й гипотезы о теоретическом законе распределения определены значения $D_i = \max|F_i(x) - F(x)|$ и $\lambda_i = D_i \sqrt{n}$.

- Проверка согласованности теоретического закона распределения с опытными данными осуществлена на основе выполнения условия $\lambda_i < \lambda_{\alpha=0,05}$. Если данному условию удовлетворяют обе альтернативные гипотезы, то окончательный выбор осуществлен в пользу теоретического распределения с меньшим значением λ .

Проведенный статистический анализ позволил выявить следующие закономерности:

1. Вариационные ряды коэффициентов $k_{\text{зап}}$, k_2 и k_0 соответствуют нормальным законам распределения, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики нормального закона распределения

Коэффициент	Сезон	г. Ереван		Регионы	
		M(x)	D(x)	M(x)	D(x)
$k_{\text{зап}}$	лето	0,525	0,0083	0,449	0,0062
	зима	0,572	0,0076	0,570	0,0092
k_2	лето	0,231	0,0	0,300	0,0
	зима	0,214	0,0	0,330	0,0
k_0	лето	0,232	0,0	0,293	0,0
	зима	0,210	0,0	0,311	0,0

2. Вариационные ряды коэффициентов K , K_1 , K_2 , K_3 и k_3 соответствуют логнормальным законам распределения, характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики логнормального закона

Коэф- фи- циент	Се-зон	г. Ереван				Регионы			
		Me(x)	Mo(x)	M(x)	D(x)	Me(x)	Mo(x)	M(x)	D(x)
K	лето	1,490	1,447	1,513	0,069	1,633	1,554	1,674	0,142
	зима	1,405	1,366	1,425	0,058	1,508	1,425	1,552	0,141
K_1	лето	1,147	1,140	1,151	0,009	1,204	1,195	1,209	0,011
	зима	1,154	1,148	1,158	0,007	1,154	1,141	1,160	0,015
K_2	лето	1,244	1,216	1,258	0,002	1,297	1,245	1,323	0,012
	зима	1,189	1,163	1,202	0,002	1,284	1,227	1,313	0,011
K_3	лето	1,044	1,044	1,045	0,001	1,046	1,044	1,046	0,002
	зима	1,024	1,023	1,024	0,001	1,019	1,018	1,019	0,001
k_3	лето	0,447	0,435	0,452	0,005	0,464	0,443	0,475	0,011
	зима	0,426	0,411	0,434	0,007	0,459	0,432	0,473	0,014

Анализ значений коэффициентов, приведенных в табл. 1 и 2, позволяет прийти к ряду важных заключений. В частности:

1. Известно, что причиной возникновения несимметрии в ГУТМЛ могут являться как амплитудная, так и фазовая несимметрии. Из табл. 1 видно, что значения математических ожиданий $M(k_2)$ и $M(k_0)$ в отдельных подгруппах (г. Ереван и регионы) и для различных сезонов приблизительно равны. В соответствии с теоретическими исследованиями [4] это означает практическое отсутствие фазовой несимметрии.

2. В летний сезон значение коэффициента заполнения графика нагрузки $k_{\text{зап}}$ существенно выше для г. Еревана по сравнению с регионами. В зимний сезон отмечается рост $k_{\text{зап}}$, причем в большей степени - в региональных электросетях. Несмотря на это, коэффициент формы кривой $K_\phi = \sqrt{K_1}$ в

зимний сезон незначительно увеличивается в г.Ереване и уменьшается в регионах. Это означает, что “уплотнение” суточного графика нагрузки в г.Ереване происходит преимущественно за счет увеличения продолжительности пиковой части графика нагрузки, а в регионах – за счет заполнения ночного провала.

3. Учет логнормального закона распределения коэффициентов K , K_1 , K_2 , K_3 и k_3 приводит к смещению наиболее вероятного их значения от медианы $Me(X)$ к моде $Mo(X)$, т.е. в сторону более низких значений.

4. Режимы электропотребления как в регионах, так и в г.Ереване характеризуются значительным уровнем несимметрии. Анализ значений коэффициентов K_2 и k_3 показывает, что уровень несимметрии в г.Ереване ниже, чем в регионах. Наблюдается тенденция к незначительному снижению уровней несимметрии в зимний сезон.

5. Наконец, анализ значений интегрального показателя K характера потребления электрической энергии в сетях 0.38/0.22 кВ показывает, что суточные графики нагрузки в регионах характеризуются более высоким уровнем неравномерности, чем в г.Ереване, независимо от сезона. Наблюдается снижение значений коэффициентов неравномерности в зимний период, что обусловлено “уплотнением” графиков нагрузки и некоторым снижением уровней фазной несимметрии.

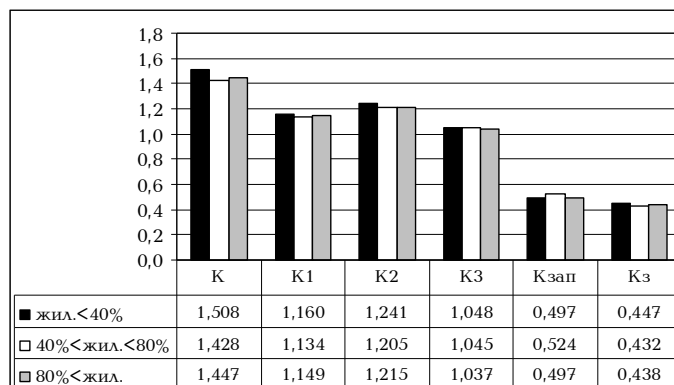
Аналогичный подход применен к выборкам, сформированным с учетом состава потребителей, а именно – объема потребления электроэнергии абонентами жилищного сектора. Результаты анализа представлены на рис. 1 и 2.

Анализ значений коэффициентов, приведенных на рис. 1 и 2, позволяет прийти к следующим выводам:

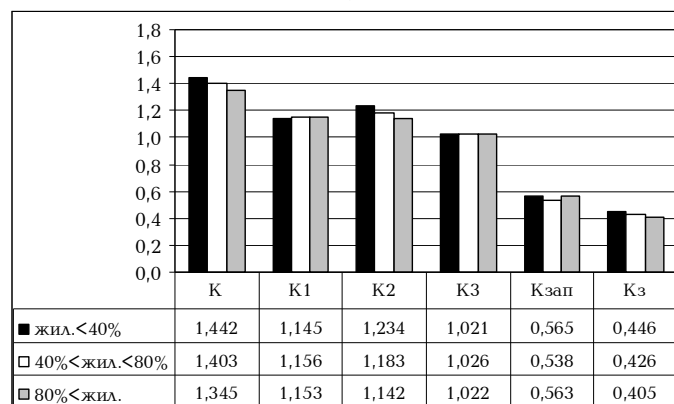
1. Вариационные ряды коэффициентов $k_{\text{зап}}$ соответствуют нормальному закону распределения, а коэффициентов K , K_1 , K_2 , K_3 и k_3 – логнормальному, т.е. наиболее вероятные значения последних следует смещать к моде $Mo(x)$.

2. Значение коэффициента заполнения графика нагрузки претерпевает незначительные изменения в зависимости от состава потребителей, однако оно выше для зимнего сезона по сравнению с летним, т.е. зимой имеет место “уплотнение” графиков нагрузки.

3. Коэффициент формы кривой K_1 имеет тенденцию к увеличению по мере увеличения объема электропотребления абонентами жилищного сектора практически в обоих сезонах как в регионах, так и в г.Ереване. Это обусловлено, прежде всего, характерным для жилищного сектора увеличением продолжительности электропотребления в вечерние часы, т.е. увеличением “пиковой” зоны графика нагрузки.

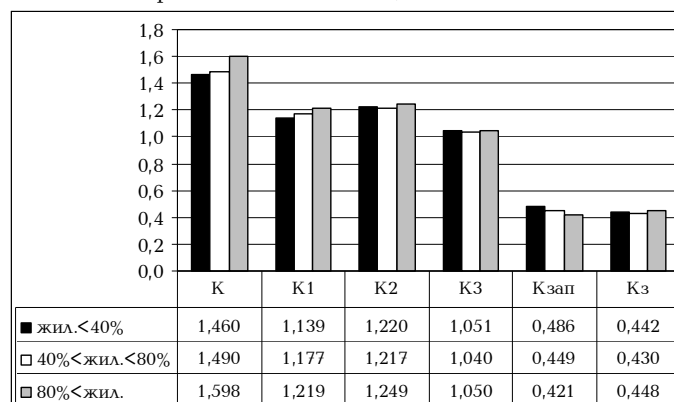


а)

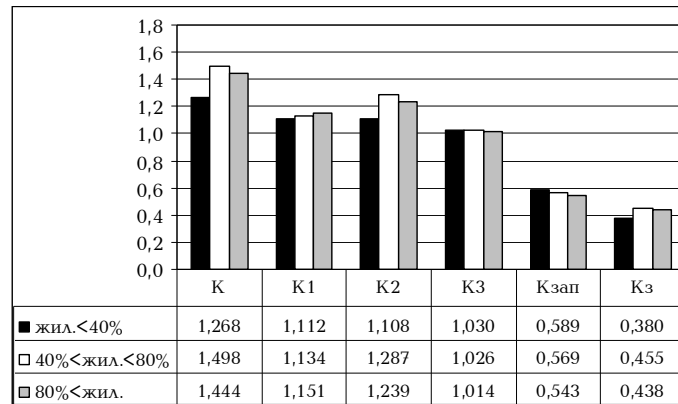


б)

Рис. 1. Коэффициенты, характеризующие суточные графики нагрузок г. Еревана: а - летний сезон; б - зимний сезон



а)



б)

Рис. 2. Коэффициенты, характеризующие суточные графики нагрузок регионов: а - летний сезон; б - зимний сезон

4. Значение коэффициента K_2 имеет тенденцию к снижению по мере увеличения объема электропотребления абонентами жилищного сектора в г. Ереване. В большей степени это характерно для зимнего сезона, когда “симметрирование” нагрузки в г. Ереване обусловлено массовым использованием жилищными потребителями электроэнергии в целях отопления. Для суточных графиков регионов характерно увеличение уровня несимметрии при увеличении доли потребления жилищным сектором, причем в зимний сезон такое увеличение имеет место в большей мере. В отличие от традиционного мнения [1, 4] о снижении уровня несимметрии при увеличении степени распределенности нагрузки по длине линии, следует признать, что для регионов Армении это не характерно. Здесь, в отличие от г.Еревана, использование электроэнергии для отопления и приготовления горячей воды не носит массового характера и доступно ограниченным слоям населения. Это приводит к тому, что отрицательный эффект неравномерной загрузки фаз превалирует над эффектом распределенности нагрузки. К тем же выводам позволяет прийти анализ значений коэффициента неравномерности загрузки фаз k_3 .

5. Поведенческие свойства коэффициента неравномерности K для графиков нагрузки регионов и г.Еревана имеют различную тенденцию. Для г.Еревана по мере увеличения доли потребления абонентами жилищного сектора значение K уменьшается, причем в большей мере это имеет место в зимний сезон. Для регионов наоборот - значение K имеет тенденцию к увеличению. Такие поведенческие свойства обусловлены причинами, изложенными в пункте 4.

Выводы

1. На основе данных натурных измерений режимных параметров головных участков трехфазных магистральных линий электроснабжения сетей 0.38/0.22 кВ Армении сформированы выборки, состоящие из коэффициентов, характеризующих суточные графики нагрузки. Выборки сгруппированы по признакам сезонности, типа населенных пунктов, состава потребителей.
2. Указанные выборки подвергнуты статистическому анализу, на основе которого проверены гипотезы о теоретическом законе их распределения.
3. Проведен развернутый анализ тенденций изменения коэффициентов, характеризующих сгруппированные по признакам суточные графики нагрузки.
4. Определены уточненные значения коэффициентов неравномерности K для сгруппированных по признакам графиков нагрузок. Уточненные значения K оказались смещенными к моде логнормального распределения, т.е. в сторону меньших значений. Использование уточненных коэффициентов обеспечит повышение точности результатов расчетов технических потерь электроэнергии в электрических сетях 0.38/0.22 кВ, а их группирование по признакам - реализацию принципов дифференцированного подхода.
5. В сетях 0.38/0.22 кВ Армении основной потенциал снижения технических потерь электроэнергии заключен в симметрировании режимов нагрузок фаз. Основное внимание при этом следует уделять вопросам снижения уровня амплитудной несимметрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В.** Расчет, анализ и нормирование потерь электрической энергии в сетях: Руководство для практических расчетов. –М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003. – 280с.
2. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Под ред. **В.Н. Казанцева.** –М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Методика расчета технологических потерь электроэнергии в электрических сетях напряжением 0.38-35 кВ / Утверждена решением Комиссии по регулированию секторов общественных услуг РА № 65а от 8 октября 2002г.
4. **Троицкий А.И.** Уравновешивание токов нулевой последовательности: Монография / Юж.-Рос. гос. тех. ун-т. - Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. - 170 с.
5. **Гнуни Т.С.** Исследование величины коэффициента неравномерности графика нагрузки в электрических сетях 0.4 кВ Армении// Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). -2005. -No 6. - С. 13-20.
6. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. –М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. –543 с.

ЗАО “Научно-исследовательский институт энергетики” РА. Материал поступил в редакцию 19.06.2006.

S.U. ԳՆՈՒՆԻ

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ 0.38/0.22 կՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ՕՐԱԿԱՆ ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ
ԳՐԱՖԻԿՆԵՐԸ ԲՆՈՒԹԱԳՐՈՂ ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ**

Հետազոտված են Հայաստանի 0.38/0.22 կՎ էլեկտրական ցանցերի օրական բեռնվածքի գրաֆիկները բնութագրող գործակիցները: Հայաստանի 0.38/0.22 կՎ էլեկտրամատակարարման եռաֆազ մագիստրալ գծերի գլխամասային հանգույցների ռեժիմային հարաչափերի փաստացի չափումների տվյալներով ձևավորվել են ընտրաքանակներ, որոնք բաղկացած են օրական բեռնվածքի գրաֆիկները բնութագրող գործակիցներից և խմբավորված են ըստ սեզոնայնության, Երևանի և տարածաշրջանների, սպառողների կազմի հատկանիշներով: Ընտրաքանակների վիճակագրական վերլուծության հիման վրա բացահայտվել են դրանց բաշխման տեսական օրենքները և որոշվել են անհավասարաչափության գործակիցների ճշտգրված մեծությունները:

Առանցքային բառեր. գործակից, բնական չափումներ, էլեկտրական ցանցեր, վիճակագրական վերլուծություն, բաշխվածության օրենք:

T.S. GNUNI

**INVESTIGATION OF COEFFICIENT VALUES CHARACTERIZING THE DAILY LOAD CURVE IN
0.38/0.22 kV NETWORK OF ARMENIA**

The values of coefficients characterizing the daily load curve in 0.38/0.22 kV network of Armenia are investigated. On the basis of data received from onsite measurements of regime parameters in head district of the Armenian 0.38/0.22 kV electricity supply three-phase main lines, the selections have been formed. The selections consisted of coefficients characterizing the daily load curve and grouped according to seasonal, settlement type, consumer structure principles. On the basis of selections' statistical analysis, the theoretical distribution function is derived and adjusted values of irregularity coefficients are evaluated.

Keywords: coefficients, in-situ measurements, electric network, statistical analysis, distribution law.

Ш.В. ПОГОСЯН, Ц.А. МАЛАКЯН, А.М. АМИРДЖАНЫ, А.А. ГЕВОРКЯН

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СЦЕНАРИЕВ, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИВОДЯЩИХ К ХОЛОДНОЙ ОПРЕССОВКЕ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-440 ПРИ РАБОТЕ ЭНЕРГБЛОКА НА МОЩНОСТИ И ГОРЯЧЕМ ОСТАНОВЕ

Выявлены возможные аварийные сценарии, при которых возникает угроза достижения параметров первого контура значений, соответствующих кривой холодной опрессовки корпуса реактора при работе энергоблока на мощности и нахождении реакторной установки в режиме «горячего останова». Для выявления конкретных аварийных сценариев, потенциально приводящих к холодной опрессовке корпуса реактора, разработан и применен метод поэтапного анализа с использованием вероятностного анализа путем комбинации методов деревьев событий и деревьев отказов.

Ключевые слова: корпус реактора, холодная опрессовка, работа на мощности, вероятностный анализ, аварийный сценарий, авария, исходное событие.

Проблема целостности корпуса реактора остается актуальной и должна поддерживаться в течение всего срока эксплуатации, так как не существует реальных средств, которые могли бы смягчить последствия катастрофического разрушения корпуса реактора. Целостность корпуса реактора зависит от взаимоотношения количества прочности, заложенной проектировщиком и обусловленной свойствами материала, включая фактор старения, и воздействующей нагрузки, которая может возникнуть в течение эксплуатации реакторной установки. В процессе эксплуатации свойства материала подвержены деградации за счет облучения нейтронным потоком, усталости, старению и т.д., снижающими сопротивление корпуса относительно такого специфического явления, как холодная опрессовка. Характерной особенностью холодной опрессовки является относительно низкая температура теплоносителя при высоком давлении в первом контуре АЭС, что может привести к нарушению целостности (разрушению) корпуса реактора. Критическое взаимоотношение температуры и давления первого контура для реактора ВВЭР-440, которое приводит к возникновению холодной опрессовки реактора, представлено на рис.1 [1,2].

На основе вышесказанного возникает необходимость создания эффективных средств защиты реакторной установки от холодной опрессовки. Для решения данной задачи необходимо выявить аварийные сценарии, способные привести к достижению параметров первого контура значений кривой холодной опрессовки, и произвести их детерминистический анализ. Анализ международного опыта в данной области показывает, что общепринятый подход к выявлению аварийных сценариев основан на детерминистических суждениях с применением консервативных предположений о возможности развития аварий [2].

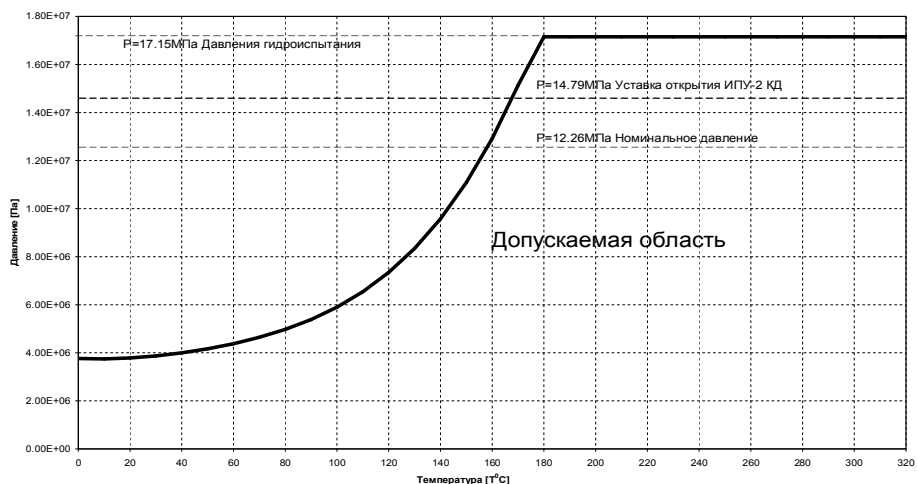


Рис 1. Кривая значений температуры теплоносителя и давления первого контура, соответствующих наступлению холодной опрессовки реактора ВВЭР-440

Исследование результатов подобных анализов, проведенных в странах, эксплуатирующих реакторы ВВЭР-440 (Россия, Финляндия, Болгария, Словакия, Украина, Венгрия и т.д.), позволило выявить следующие недостатки применения вышеуказанного подхода:

1. Не обоснована полнота списка выявленных аварийных сценариев, применяемых при разработке систем защиты реактора от холодной опрессовки. Этот недостаток является одним из важнейших замечаний надзорных органов стран, эксплуатирующих реакторы ВВЭР-440, и специалистов МАГАТЭ (VVER Regulators Forum, WG on Regulatory use of PSA, Vienna, Austria, 11-13 December 2006). Например, подобный анализ для АЭС Богунице 1-4 (Словакия) и АЭС Ловииса (Финляндия) с энергоблоками ВВЭР-440 не выявил такие аварии, как обесточивание блока и невключение ДГ 1-4 в горячем состоянии, несанкционированное подключение неработающей петли в холодном состоянии, ошибки оператора при гидроиспытаниях и т.д. [2].

2. Выявленные аварийные сценарии содержат большое количество предположений об отказах оборудования, что приводит к очень малой вероятности их одновременного возникновения, а это, в свою очередь, вносит большой консерватизм в результаты анализа. Вследствие этого возможно возникновение вопроса о нарушении пределов безопасности относительно холодной опрессовки реактора при тех или иных аварийных сценариях, что может привести к запрету на дальнейшую эксплуатацию рассматриваемой АЭС.

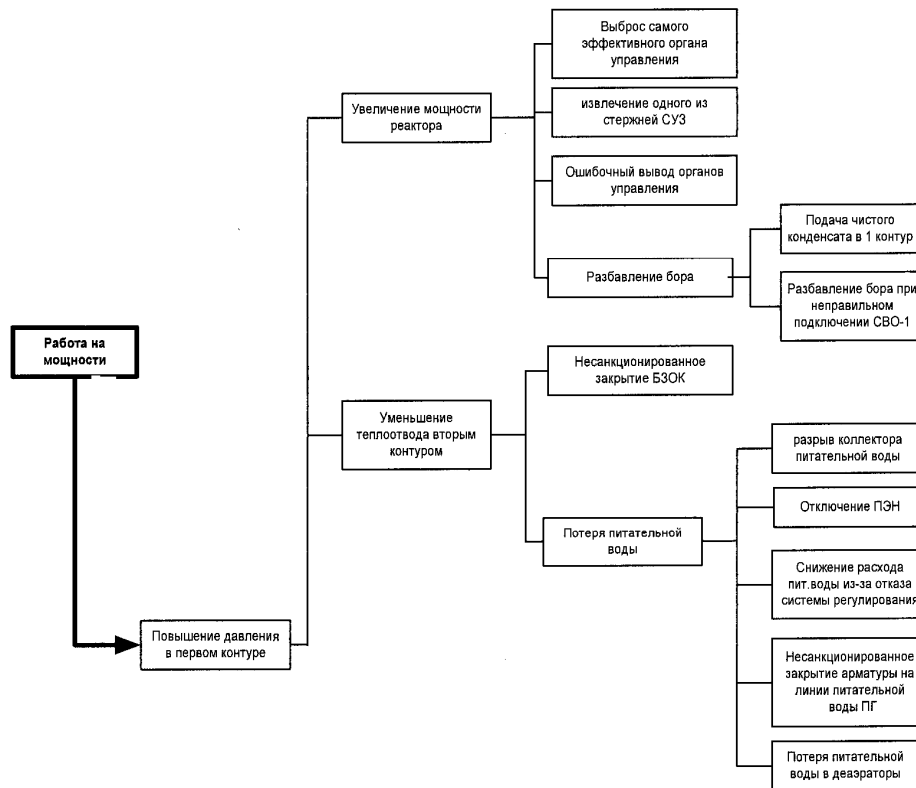


Рис 2. Фрагмент логической диаграммы исходных событий, приводящих к повышению давления при работе энергоблока на мощности

Во избежание приведенных недостатков и для более реалистической оценки нами был разработан поэтапный метод анализа аварийных сценариев, приводящих к холодной опрессовке реактора, с применением комбинации методов логических диаграмм (рис. 2) и вероятностного анализа. Используя предложенный метод, проведен анализ по выявлению возможных аварийных сценариев, при которых возникает угроза достижения параметрами первого контура значений, соответствующих кривой холодной опрессовки корпуса реактора для режимов работы энергоблока на мощности и нахождения реакторной установки в режиме «горячего останова». В качестве рассматриваемого объекта выбран 2-й энергоблок Армянской АЭС с реактором ВВЭР-440/В-270, разработанным на основе реактора ВВЭР-440/В-230, с учетом сейсмической активности площадки.

Для достижения вышеуказанных целей было предусмотрено проведение следующих двух основных этапов работы, согласно предложенному методу:

- выявление аварий, при которых возникает угроза холодной опрессовки;

- определение конкретных сценариев развития аварий (аварийных сценариев), приводящих к холодной опрессовке.

На первом этапе проведено выявление исходных событий, при которых возникает угроза холодной опрессовки. Для выбора исходных событий, которые потенциально могут привести к холодной опрессовке, был использован метод логических диаграмм [3]. Метод логических диаграмм является дедуктивным - от общего к частному. Принцип метода состоит в последовательном построении графов, шаг за шагом выявляющих потенциальные угрозы (возможные исходные события), которые потенциально могут привести к холодной опрессовке (рис. 2). Для выбора исходных событий были рассмотрены два фактора, которые могут привести к холодной опрессовке:

- повышение давления в первом контуре;
- снижение температуры теплоносителя в первом контуре.

Вышеприведенные факторы были исследованы независимо друг от друга, что позволило изучить наиболее обширный спектр исходных событий и обосновать полноту списка рассматриваемых исходных событий. На основе вышесказанного были разработаны два графа: на вершине первого стоит повышение давления в первом контуре, на вершине второго - понижение температуры теплоносителя. Возникновение того или иного исходного события рассматривалось в пределах следующих режимов энергоблока:

- Работа на мощности:

Работа энергоблока на мощности в диапазоне $N=(1...100\%)N_{ном}$ с учетом работы как с одной, так и с двумя работающими турбинами, согласно технологическому регламенту энергоблока №2 ААЭС [4]. В рамках проведенного анализа режим работы энергоблока на мощности включает процесс набора мощности от МКУ и снижение мощности до перехода на МКУ. Состояние «работа на мощности» характеризуется следующими основными параметрами 1-го контура: $T_{вх}=269^{\circ}\text{C}$, $T_{вых}=300^{\circ}\text{C}$, $P_{1к}=12,5\pm 0,2 \text{ МПа}$.

- Горячий останов:

Режим горячего останова, согласно технологическому регламенту энергоблока №2 ААЭС [4], включает в себя нахождение реактора в критическом состоянии на мощности не более 1% от номинальной или нахождение в подкритическом состоянии. Состояние «горячий останов» характеризуется следующими основными параметрами 1-го контура: $T_{1к}= 245...260^{\circ}\text{C}$, $P_{1к}=12,5\pm 0,2 \text{ МПа}$.

После выбора обширного спектра исходных событий, приводящих либо к повышению давления в первом контуре, либо к понижению температуры теплоносителя, был проведен отсев исходных событий, не приводящих к холодной опрессовке. Отсев исходных событий был осуществлен на основе первичной оценки потенциальной опасности достижения параметров первого контура значений, соответствующих холодной опрессовке для каждого рассматриваемого исходного события. При рассмотрении каждого из исходных событий были учтены возможные комбинации отказов оборудования, которые могут привести к холодной опрессовке. Отсев позволил разработать конечный список рассматриваемых исходных событий.

После составления конечного списка рассматриваемых исходных событий была проведена их группировка. Принципом группировки исходных событий является разбиение на группы тех исходных событий, которые приводят к идентичным последствиям. Репрезентативным исходным событием в группе было выбрано событие, которое приводит к более тяжелым последствиям с точки зрения опасности холодной опрессовки.

На основе проведенной работы первого этапа был составлен конечный список аварий (см. табл. 1, [5]), подлежащих анализу на предмет выявления конкретных аварийных сценариев, приводящих к холодной опрессовке.

Таблица 1

Конечный список аварий на основе сгруппированных исходных событий

№	Авария
1	Несанкционированное включение АПН при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
2	Несанкционированное включение ПН при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
3	Несанкционированное включение нагревателей КД при работе энергоблока на мощности
4	Обесточивание блока и невключение ДГ 1-4 при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
5	Разрыв ГПК при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
6	Разрыв паропроводов при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
7	Течи из первого контура во второй контур при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
8	Отказ на открытие паросбросной арматуры (БРУ-А и БРУ-К) при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
9	Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 200 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
10	Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 100 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
11	Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 32 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова
12	Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 18 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова

На втором этапе проведено определение конкретных сценариев развития аварий (аварийных сценариев), приводящих к холодной опрессовке, на основе списка аварий, представленного в табл. 1. Для определения возможных сценариев развития аварий был использован метод “дерева событий” [6,7] для каждой аварии, выявленной при работе над первым этапом анализа (на рис.3 приведено типичное “дерево событий”, разработанное для аварии с потерей теплоносителя). В верхней части дерева событий показаны системы, необходимые для ликвидации рассматриваемой аварии (в данном случае для аварии с потерей теплоносителя необходима работоспособность систем САОЗ, спринклерной системы, бака Б-8/2 и.т.д.). Знак «+» означает возможность данной системы выполнять возложенную на нее функцию, знак «-» - отказ системы. Построение деревьев событий позволяет определить возможные пути

развития данной аварии (аварийные сценарии) при отказе той или иной системы, участвующей в процедуре ликвидации аварии (таким образом, на рис. 3 представлены 5 аварийных сценариев, каждый из которых имеет определенную вероятность возникновения).

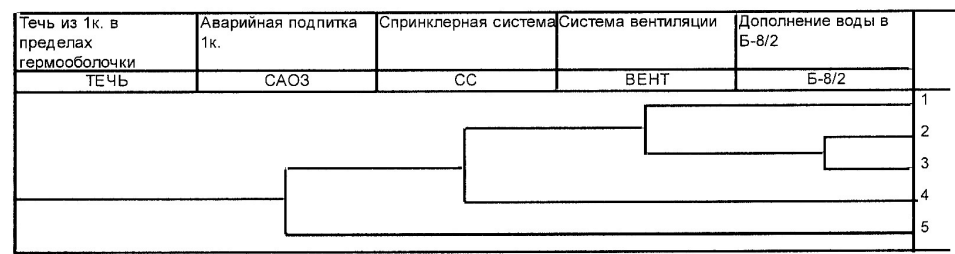


Рис. 3. Дерево событий для аварии с потерей теплоносителя

После определения возможных путей развития аварий возникла необходимость определения вероятности возникновения того или иного сценария, имеющего место в разработанных деревьях событий. Для решения этой задачи был использован метод деревьев отказов [8], позволяющий определить вероятность отказа данной системы путем построения модели ее надежности (на рис.4 приведено дерево отказов, разработанное для системы защиты от превышения давления второго контура - БРУ-А на ТГ-3).

Верхний блок дерева отказов отражает нежелательное событие – отказ системы, взятый из соответствующего дерева событий (на рис. 4 нежелательным событием является отказ системы БРУА-3 открыться при повышении давления в ГПК). Далее представлены возможные причины возникновения нежелательного события с использованием соответствующих логических операторов:

$\cup$ - или, $\cap$ - и, Δ - трансфер на другое дерево отказов, $\triangle$ - отказ оборудования с присвоенной ему вероятностью отказов. Вероятность отказа для конкретного оборудования определяется путем обработки статистических данных по отказу однотипного оборудования на рассматриваемой АЭС или других аналогичных энергоблоках [9-11]. Рассчитанная вероятность данного нежелательного события дерева отказов присваивается соответственному блоку в деревьях событий (в основу расчета вероятности нежелательного события заложена булева алгебра).

При разработке деревьев событий и отказов были использованы следующие предположения:

- действия оператора, направленные на смягчение/предотвращение влияния холодной опрессовки реактора, не были рассмотрены, так как: а) на Армянской АЭС нет конкретной подробной процедуры действий оператора при возникновении опасности холодной опрессовки, что может в значительной мере повысить вероятность ошибки оператора; б) обычно авария с возникновением холодной опрессовки является быстротечным процессом, что ограничивает возможности оператора

провести диагностику возникшей ситуации и принять соответствующее решение;

- действия оператора, направленные на восстановление работоспособности оборудования в случае отказа, не были рассмотрены по причине “б”) (см. первое предположение).

Разработка моделей надежности систем (деревьев отказов) и деревьев событий была выполнена с помощью программного кода Risk Spectrum Professional 2.0 (Швеция) [9,10,11], обеспечивающего интерфейс для разработки, связи и расчета комбинированных моделей деревьев событий и отказов.

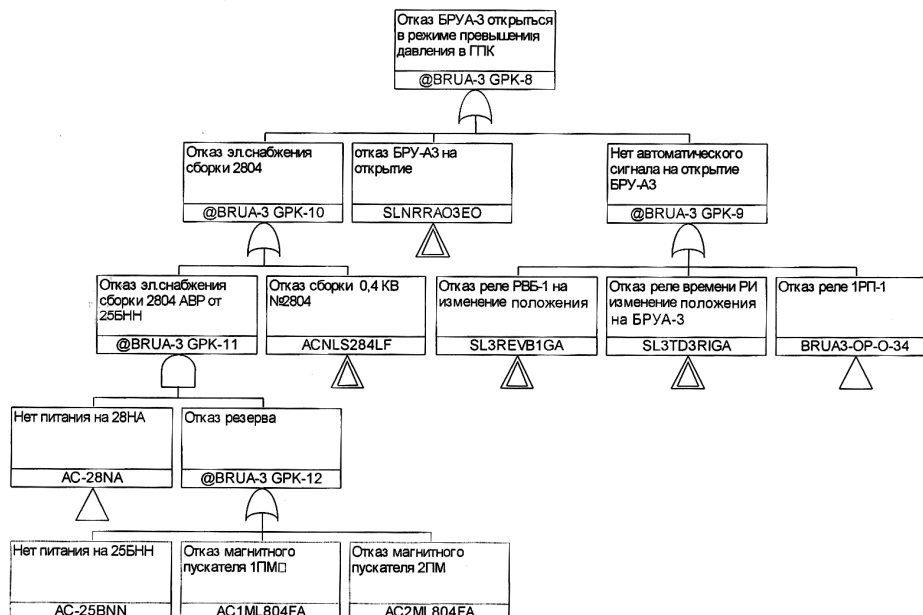


Рис 4. Дерево отказов – модель надежности системы сброса пара в атмосферу при повышении давления в ГПК

Существует ряд программных кодов в области применения методов вероятностного анализа безопасности, таких как Risk Spectrum Professional (используется в России, Венгрии, Чехии, Словакии и т.д.), SAPHIRE (используется в США, Испании, Болгарии и т.д.), FINPSA (Финляндия) и т.д (см. материалы конференции VVER Regulators Forum, WG on Regulatory use of PSA, Vienna, Austria, 11-13 December 2006). Программный код Risk Spectrum Professional 2.0 является наиболее распространенным ввиду ряда преимуществ по сравнению с другими кодами (автоматическое моделирование отказов по общей причине в моделях надежности систем, доступный графический интерфейс, возможность моделирования постулируемых событий и т.д.) [12]. Используя расчетный блок программного кода Risk Spectrum Professional, был проведен расчет комбинированной математической модели и определены

вероятности возникновения аварийных сценариев. Результаты расчета позволили определить конкретные сценарии развития аварий, наиболее опасные с точки зрения холодной опрессовки реактора, с применением соответствующего вероятностного критерия. В качестве вероятностного критерия отбора аварийных сценариев было применено значение $1 \cdot 10^{-7}$, рекомендованное и применяемое в международной практике выбора исходных событий как приемлемое для повреждения активной зоны реактора [2,3,13].

В результате проведенных расчетов были определены конкретные сценарии развития аварий, наиболее опасные с точки зрения холодной опрессовки реактора и удовлетворяющие примененному вероятностному критерию отсева (частота возникновения сценария $F_{сц.} > 1 \cdot 10^{-7}$). Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Список аварийных сценариев, потенциально приводящих к холодной опрессовке реактора ВВЭР-440 при работе на мощности и нахождении в режиме горячего останова

№	Исходное событие	Частота (1/год)
1	“Несанкционированное включение АПН при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры БРУ-А после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре” + “Ошибка оператора отключить насос АПН по сигналу повышения уровня в КД”	$2,29 \cdot 10^{-6}$
2	“Несанкционированное включение ПН при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры БРУ-А после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре” + “Отказ автоматики сигнала « $\uparrow N_{КД} = +300 \text{ мм}$ » и ошибка оператора отключить насос ПН по сигналу повышения уровня в КД”	$4,84 \cdot 10^{-5}$
3	Несанкционированное включение нагревателей КД при работе энергоблока на мощности	$4,35 \cdot 10^{-3}$
4	“Обесточивание блока и не включение ДГ 1-4 при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры БРУ-А после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре”	$7,19 \cdot 10^{-7}$
5	“Разрыв ГПК при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие 2-х из 7 быстродействующих запорно-отсечных клапанов по сигналу снижения уровня в полусекции ГПК до 30 кг/см^2 ”	$1,55 \cdot 10^{-6}$

1	2	3
6	“Разрыв паропроводов при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие 2-х из 7 быстродействующих запорно-отсечных клапанов по сигналу снижения уровня в полусекции ГПК до 30 кг/см ² ”	$2,79 \cdot 10^{-7}$
7	“Течи из первого контура во второй контур при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры ИПУ ПГ после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре” + “Ошибка оператора отключить насос АПН по сигналу повышения уровня в КД после успешной изоляции течи путем закрытия главных запорных задвижек на поврежденной петле”	$4,01 \cdot 10^{-6}$
8	Отказ на открытие паросбросной арматуры (БРУ-А и БРУ-К) при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова	$7,25 \cdot 10^{-4}$
9	“Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 200 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры БРУ-А после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре”	$1,74 \cdot 10^{-7}$
10	“Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 200 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Ошибка оператора отключить насос АПН по сигналу повышения уровня в КД после успешной изоляции течи путем закрытия главных запорных задвижек на поврежденной петле ”	$4,54 \cdot 10^{-7}$
11	“Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 100 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры БРУ-А после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре” + “Ошибка оператора отключить насос АПН по сигналу повышения уровня в КД после успешной изоляции течи путем закрытия главных запорных задвижек на поврежденной петле”	$1,65 \cdot 10^{-7}$
12	“Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 32 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры БРУ-А после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре” + “Ошибка оператора отключить насос АПН по сигналу повышения уровня в КД после успешной изоляции течи путем закрытия главных запорных задвижек на поврежденной петле”	$4,19 \cdot 10^{-6}$
13	“Разрывы трубопровода эквивалентным диаметром 18 мм при нахождении энергоблока в состоянии горячего останова” + “Отказ на закрытие паросбросной арматуры БРУ-А после выполнения функции защиты от превышения давления во втором контуре” + “Ошибка оператора отключить насос АПН по сигналу повышения уровня в КД после успешной изоляции течи путем закрытия главных запорных задвижек на поврежденной петле ”	$6,32 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, учитывая недостатки общепринятого подхода к выявлению аварийных сценариев, в качестве основы для разработки средств защиты от холодной опрессовки разработан поэтапный метод анализа аварийных сценариев с применением комбинации методов логических диаграмм и вероятностного анализа.

С использованием данного метода обоснована полнота списка аварийных сценариев, потенциально приводящих к холодной опрессовке и удовлетворяющих вероятностному критерию [2,3,13]. В частности, использование предложенного поэтапного метода позволило отсеять ряд аварийных сценариев с пренебрежительно малой вероятностью, которые учитывались в ранее проведенных исследованиях при обосновании безопасности с точки зрения холодной опрессовки (например, разрыв ГПК с отказом БЗОК и обесточением АЭС), и реалистически оценить безопасность относительно холодной опрессовки реактора.

Результаты, приведенные в данной статье, планируется использовать в качестве основы для проектирования автоматизированных систем и оптимизации существующих средств защиты от холодной опрессовки на АЭС с реакторами типа ВВЭР, в частности, на Армянской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Установка реакторная В-270, Расчет прочности, Сопротивление хрупкому разрушению корпуса реактора. – М.: ОКБ «Гидропресс», 2000. – С. 24-26.
2. Guidelines on pressurized thermal shock analysis for WWER Nuclear Power Plant // IAEA-EBP-WWER-08 (Rev 1). - Austria, January, 2006. - P. 9-14.
3. **Ланкин М.Ю.** Отбор и группировка исходных событий в вероятностном анализе безопасности: Техническое совещание по вопросам ВАБ. – Ереван, 2003. - С.27-32.
4. Технологический регламент эксплуатации энергоблока №2 Армянской атомной электростанции с реактором ВВЭР-440(В-270) / Республика Армения, Министерство Энергетики и топлива, Армянская АЭС, 1995. - С. 45,72-75.
5. **Амирджанян А., Погосян Ш., Малакян Ц., Оганесян Л.** Исследование аварийных последовательностей, потенциально приводящих к холодной опрессовке корпуса реактора для АЭС ВВЭР-440 // Сборник материалов годичной научной конференции ГИУА. Том 1. - Ереван, 2006. - С. 181-185.
6. "Procedure Guides for a Probabilistic Risk Assessment", NUREG/CR-6572, Brookhaven National Laboratory. – 2005. - P. 3-20-3-32.
7. 50-P-4 «Procedure For Conducting Probabilistic Safety Assessment Of Nuclear Power Plants (Level 1)» // IAEA, Safety Series № 50-P-4. - Vienna, 1992. - P. 39-59.
8. NUREG-0492, Fault Tree Handbook, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C. 1982. - С. V-1-V-8.
9. Risk Spectrum Professional, User Manual, RELCON, 2003. - P. 51-63.
10. Risk Spectrum Professional, Theory Manual, RELCON, 2003. - P. 14-23
11. **Գևորգյան Ա., Պողոսյան Շ.** Հայկական ԱԷԿ-ի առաջին կոնստրուկցիոն արտահոսքի դեպքում ռեակտորի անվտանգ կանգը ապահովող համակարգերի հավանականային վերլուծությունը // ՀՊՃՀ տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու, Հատոր 1.- Երևան, 2005. - էջ 307-313:
12. **Щевелев В.Н.** Обзор программных кодов для выполнения ВАБ: Техническое совещание по вопросам ВАБ. – Ереван, 2003. - С.43-51.
13. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций, ОПБ-88/97 (ПНАЭ Г-01-011-97). – М.,1997. - С.13, пп.1.2.15.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 22.03.2007.

Շ.Վ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Յ.Հ. ՄԱԼԱՔՅԱՆ, Ա.Մ. ԱՄԻՐՋԱՆՅԱՆ, Ա.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

**ՋՋԷՌ-440 ՌԵԱԿՏՈՐԻ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՏԱԿ ԵՎ ՏԱՔ ՎԻՃԱԿՈՒՄ ՇԱՀԱԳՈՐԾՄԱՆ ԸՆԹԱՅՔՈՒՄ
ՍԱՌԸ ՓԽՐՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԲԵՐԵԼՈՒ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ՎԹԱՐԱՅԻՆ ՍՑԵՆԱՐԵՐԻ
ՀԱՎԱՆԱԿԱՆԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ**

Ի հայտ են բերվել՝ ռեակտորի հզորության տակ աշխատանքի և տաք վիճակում գտնվելու ժամանակ հնարավոր այն վթարները, որոնց դեպքում առկա է առաջին կոնտուրի պարամետրերի սառը փխրունության կորին հասնելու վտանգ: Ի հայտ բերված վթարների համար կատարվել է հավանականային վերլուծություն, որտեղ պատահարների և խափանումների ծառերի մեթոդների կիրառմամբ որոշվել են սառը փխրունության հանգեցնող վթարային սցենարները:

Առանցքային բառեր. ռեակտորի իրան, սառը փխրունություն, հզորության տակ աշխատանք, հավանականային վերլուծություն, վթարային սցենար, սկզբնական պատահար:

Sh.V. POGHOSYAN, Ts.H. MALAKYAN, A.M. AMIRJANYAN, A.A. GEVORKYAN

**PROBABILISTIC ANALYSIS OF ACCIDENTAL SCENARIOS POTENTIALLY LEADING TO
COLD OVERPRESSURE FOR WWER-440 TYPE REACTORS DURING POWER OPERATION
AND HOT SHUTDOWN**

Accidents potentially leading to cold overpressure at reactor installation during power operation and hot shutdown are revealed as a result of the performed analysis. The probabilistic analysis is done for identified accidents using combination of event tree and fault tree methods to reflect particular accidental scenarios potentially leading to cold overpressure occurrence.

Keywords: reactor vessel, cold overpressure, power operation, probabilistic analysis, accidental scenario, accident, initiating event.

А.М. МУРАДЯН, С.Н. ЕНГИБАРЯН, В.К. АБРААМЯН

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕССОВАННЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Показано, что прессование мелкозернистого, диэлектрического, кристаллического нитрата свинца сопровождается электризацией образца, которое в порах и микротрещинах прессованного образца образует “частичные разряды” (ЧР). Определены условия образования, исчезновения и поглощения энергии, а также энергетические и частотные характеристики ЧР.

Ключевые слова: электризация, частичные разряды, частота, заряд, электростатика, диэлектрический, прессование, проницаемость.

В горной промышленности при проведении взрывных работ широко используются изделия с двухкомпонентной диэлектрической системой, одним из которых является прессованный высокочувствительный порошкообразный материал. В процессе прессования верхний слой, обладающий высокими диэлектрическими свойствами, приобретает “электростатические” заряды, которые создают сильное электрическое поле с потенциалом на поверхности слоя около $(1...2) \cdot 10^3$ В. Проведенный анализ случаев несанкционированных срабатываний изделий при производстве, транспортировке и хранении свидетельствует о необходимости тщательного изучения качественного и количественного изменения физико-химических характеристик таких систем под влиянием поля “статического электричества”.

Важным фактором в процессе исследования влияния поля и обусловленных этим полем “частичных разрядов” (ЧР) является образование пор и микротрещин в образце и их развитие. Из-за остаточных перенапряжений и электродинамических сил ЧР, возникающих, в частности, при нарушении адгезионных связей [1], завершение образования микроструктуры образца после прессования продолжается довольно долго. Наложение внешнего электрического поля на этот процесс приводит к существенному увеличению энергии ЧР и повышению их роли в массо-теплообменных процессах, в том числе в инициировании зажигания высокочувствительного компонента изделия. Например, процесс прессования порошкообразных диэлектрических материалов оказывает существенное влияние на релаксацию зарядов в двухкомпонентной диэлектрической системе. В рассматриваемых изделиях движение “электростатических” зарядов направлено с верхнего заряженного слоя на нижний слой. Это обусловлено высокими диэлектрическими свойствами ($\sim 10^{13}$ Ом·м) верхнего заряженного слоя и слабым выражением диэлектрических свойств ($\sim 10^9$ Ом·м) нижнего слоя. В этих условиях постоянная времени релаксации, рассчитанная по приближенному методу Хоу [2], выражается по формуле

$$T = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \rho}{1 + r/h - \sqrt{1 + (r/h)^2}},$$

где ε_0 - электрическая постоянная; ε и ρ - диэлектрическая проницаемость и удельное электрическое сопротивление образца; r и h - радиус и высота образца.

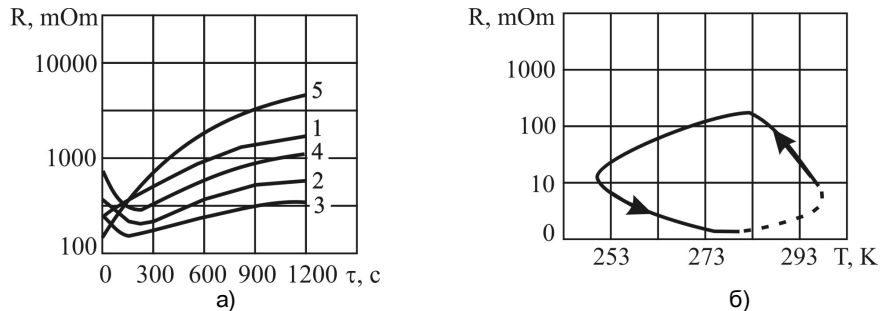


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления: а – прессованных при различных давлениях образцов от времени после прессования.

1 - $P=125$ МПа; 2 - $P=150$ МПа; 3 - $P=175$ МПа; 4 - 200 МПа; 5 - 225 МПа;
б - прессованного при $P=180$ МПа образца от температуры

Однако следует учесть, что значение T существенно изменяется из-за изменения ρ образца в процессе и после завершения прессования. Причем изменение ρ зависит от характера процесса прессования. В качестве примера на рис.1а приводится характерное изменение сопротивления R образца в течение времени после прессования сухого, порошкообразного $Pb(NO_3)_2$ при различных давлениях в интервале $(1,25 \dots 2,25) \cdot 10^8$ Па. На рис.1б приводится изменение сопротивления R прессованного при $P(1,8(10^8$ Па образца в зависимости от температуры T , К. Следует отметить, что указанный характер изменения R в зависимости от температуры T , К является общим для большой группы материалов, испытанных нами.

Важным в этих испытаниях является то обстоятельство, что при достижении сопротивления образца $10^6 \dots 10^7$ Ом в нем возникают ЧР при очень низких, приложенных к образцу напряжениях (около 10 В). В этой аномалии, по-видимому, существенную роль играет эмиссия электронов, обнаруженная Б.В. Дерягиным и его сотрудниками при образовании микротрещин в монолитных телах [1], которые служат в качестве “спускового механизма” для возникновения более мощных ЧР.

Восстановление первоначального значения сопротивления образца при комнатной температуре происходит в течение 3...4 ч. Этот участок характеристики на рис.1б указан пунктиром. О важной роли ЧР в изменении электрофизических характеристик прессованных образцов свидетельствует характерная зависимость пробивной напряженности образца от его плотности (рис.2а). Увеличение плотности упаковки (давление прессования) образца приводит к сжатию пор и, в соответствии с законом Пашена, увеличению

пробивной напряженности поля. В соответствии с этим законом существуют также критические значения размеров пор и трещин, при которых пробивная напряженность поля минимальная. Сказанное в полной мере подтверждается снятой зависимостью напряжения возникновения ЧР от давления прессования PbCNS (рис. 2б).

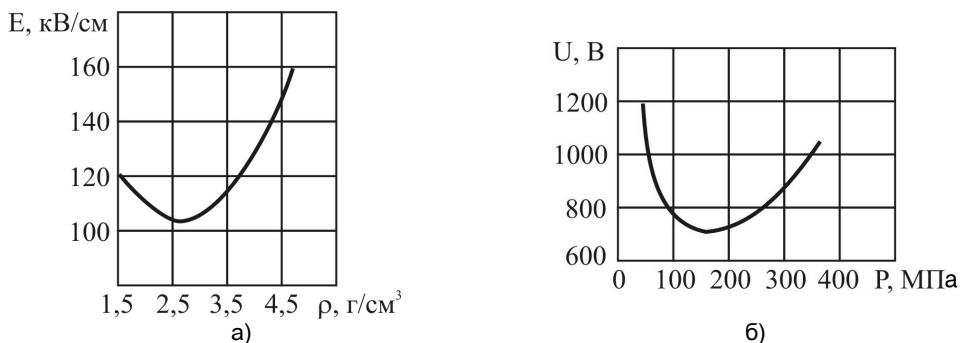


Рис. 2. Зависимости: а - пробивной напряженности поля от плотности образца;
б - напряжения возникновения ЧР от давления прессования образца

При этом, как показывает опыт, увеличивается также частота следования ЧР. Например, при увеличении давления от $2,5 \cdot 10^8$ до $4,5 \cdot 10^8$ Па частота ЧР уменьшается от 35 до 4 Гц. Характерно, что при одной и той же большой плотности образцов увеличение размера кристаллов продукта снижает значение пробивной напряженности поля.

Насыщение прессованных образцов глицерином, обладающим примерно такой же электрической прочностью, что и образец, не приводит к существенному изменению пробивной напряженности поля. В то же время при насыщении образца парафином, имеющим более высокую электрическую прочность, существенно увеличивается пробивное значение напряженности поля.

При снятии зависимости частоты следования ЧР от величины приложенного напряжения при различных давлениях прессования наблюдается изменение частоты в течение времени. Этот факт свидетельствует о нарастании ЧР вследствие лавинообразного переключения и включения пор и трещин в образце. Анализ экспериментальных результатов зависимости частоты ЧР от времени при различных толщинах образца свидетельствует о том, что существуют определенное количество, размеры и формы пор и трещин, при которых отсутствует лавинообразное нарастание ЧР в образце. Уменьшение толщины образца объективно приводит к увеличению пробивной напряженности поля. Наблюдаемые нарастания ЧР в образце оставляют темные следы, которые углубляются клинообразно внутрь образца. Они свидетельствуют о важной роли ЧР в физико-химических превращениях в образце, в частности, в диффузионном тепломассообмене.

Определенный практический интерес представляет анализ влияния на величину омического тока, частоту и амплитуду ЧР введенного в состав прессованного диэлектрического образца небольшого количества (0,5...1,5%)

графита. Выяснилось, что содержание такого количества графита практически не оказывает влияния на величину омического тока, в то же время существенно влияет на амплитуду (энергию) ЧР. Это, в конечном итоге, приводит к несанкционированному срабатыванию изделия. Увеличение содержания графита до 3,5...4,0% приводит к резкому увеличению омического тока до 1000 мкА при полном отсутствии ЧР. При этом не были зафиксированы случаи срабатывания изделия.

Таким образом, подтверждена решающая роль ЧР в инициировании зажигания в проведенных экспериментах. Однако возникают трудности, связанные с объяснением зажигающей способности ЧР, если учесть их небольшую энергию (порядка $10^{-9} \dots 10^{-8}$ Дж). Спектроскопические исследования показали, что выделяемая ЧР энергия в основном приходится на диапазон длин волн $\lambda = 2500 \dots 4300$ Å. Характерно, что ряд экспериментов для взрывчатых веществ подтверждает резонансное поглощение электромагнитной энергии в этом диапазоне длин волн [3]. Полученные результаты, наряду с применением теории протекания [4], позволяют выработать конкретные предложения по устранению опасных проявлений "технологической" электризации в рассматриваемых изделиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П.** Адгезия твердых тел. -М.:Наука,1973. -27с.
2. **Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.А.** и др. Методы расчета электрических полей.- М.: Высшая школа, 1963.-415с.
3. **Кук Мелвин А.** Наука о промышленных взрывчатых веществах / Пер. с англ. Б.Н. Кукиба; Под ред. Г.П. Демидова.-М.: Недра, 1980.- 455с.
4. **Шкловский Б.И., Эфрос А.Л.** Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // УФН.-1975. - Т.117, вып.3.-С.401-403.

Институт общей и неорганической химии РАН РА. Материал поступил в редакцию 06.06.2006.

Ա.Մ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ, Ս.Ն. ԵՆԳԻԲԱՐՅԱՆ, Վ.Ղ. ԱԲՐԱՆՅԱՆ

ՍԵՂՍԱԾ ԵՐԿԲԱՂԱԴՐԱՄԱՍ ՄԵԿՈՒՄԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ

ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ

Ցույց է տրված, որ մանրահատիկ մեկուսիչ կապարի նիտրատի բյուրեղների սեղմումը ընթանում է նմուշի էլեկտրականացումով, որը նրա ծակոտիներում և մանրաճեղքերում առաջ է բերում «մասնակի պարպումներ» (ՄՊ): Որոշված են ՄՊ-ի առաջացման և վերացման պայմանները, էներգետիկ և հաճախականային բնութագրերը և էներգիայի կլանման պայմանները:

Առանցքային բառեր. էլեկտրականացում, մասնակի պարպում, հաճախականություն, լիցք, մեկուսիչ, սեղմում, թափանցելիություն:

A.M. MOURADYAN, S.N. YENGIBARYAN, V.K. ABRAMYAN

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE PRESSED BICOMPONENT DIELECTRIC SYSTEMS

It is shown that pressing of fine-grained dielectric crystalline lead nitrate is accompanied by electrization of the specimen, which forms "partial charges" in the pores and splits of the pressed specimen. The conditions of formation, disappearing and absorption of the energy are defined and the energetic and frequency characteristics of "partial charges" are also specified.

Keywords: electrization, partial charges, frequency, charge, dielectric, pressing, permeability.

М.Г. АЗАРЯН

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО МИКРОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Описываются способ микропозиционирования и реализующий его стенд. Приведены некоторые результаты испытаний осуществления как горизонтального, так и вертикального микроперемещений, необходимых и в зондовой микроскопии.

Ключевые слова: позиционирование, пьезоэлементы, стенд, двигатель, электромагнит, постоянный магнит, пластинка-держатель.

Введение. Работа зондового микроскопа сопряжена с изначальным X,Y,Z - позиционированием кончика твердотельного зонда, укрепленного на подвижном держателе, относительно выбранной области исследуемой поверхности (ИП) на расстоянии в несколько десятков нанометров от нее. Такое позиционирование призвано обеспечить регистрацию информативного сигнала, используемого в данном типе зондового микроскопа.

В конструкцию механизмов обеспечения достаточно тонкого достижения этой стартовой позиции необходимо привлечь механические редукторы перемещений [1-3]. Они преобразуют вращательное движение, которое обеспечивается электродвигателем или ручным управлением, в поступательное. Однако есть ситуации, в которых требуется проведение такой операции в труднодоступных условиях (например, высокого вакуума). Здесь предпочтительно дистанционное управление процессом перемещений. По этой причине прибегают к электрическим шаговым (с использованием вакуумно-совместимого специального редуктора), паучковым [4,5] и инерционными двигателям [6,7].

Работа с инерционными двигателями показала, что перемещение (в результате инерционного акта) держателя столика (или зонда), требуя поперечной, по отношению к направлению перемещения, фиксации (под собственным весом в направляющем пазе – горизонтальная конфигурация двигателя [8] или упругим цанговым прижимом – вертикальная конфигурация [9]), зависит и от сцепления с направляющими элементами. Оно диктуется фиксирующей силой, состоянием трущихся поверхностей держателя и направляющей, а это приводит к нестабильной работе двигателя. Решение же задачи обеспечения в одном инерционном двигателе и ортогональных X,Y - перемещений вовсе затруднительно, поскольку требует значительных конструктивных усложнений, что трудно совместить с необходимой малогабаритностью электромеханики тела микроскопа. Такая же зависимость от состояния рабочей поверхности присуща и "паучковым" двигателям с электростатической фиксацией.

В работе предлагается описание простого принципа работы и конструкции стенда и двигателя, способного обеспечить также и X,Y-перемещения. При его разработке учитывались следующие требования:

- двигатель должен работать и в вертикальной конфигурации;

- принцип его работы должен позволить организацию большого диапазона ортогональных перемещений;
- в позиции, уже достигнутой перемещением, фиксация должна обеспечиваться без привлечения электрического тока.

Эти условия можно удовлетворить, если в конструкцию двигателя, наряду с электромагнитами (ЭМ), ввести и постоянный магнит (ПМ), а держатель выполнить в виде пластинки. ЭМ реализуют "лапки", которые при подаче тока на катушки ЭМ "захватывают" сцеплением держатель для "протаскивания" его относительно поверхности ПМ. После завершения такого перемещения над ПМ сцепление с ЭМ приводится к нулю, в то время как новое положение пластинки-держателя фиксируется неизменным сцеплением с ПМ. Таким образом, функция ПМ заключается в удержании перемещаемого держателя в статической позиции. Само перемещение обеспечивается стандартным для подобных двигателей способом – исполнительный элемент (ИЭ) под действием приложенного электрического сигнала увеличивается (уменьшается) в размерах, что приводит к смещению закрепленного на нем ПМ из первоначального положения. Так как, по определению, держатель в зондовых микроскопах малогабаритен, удержание его и в вертикальной конфигурации ПМ вполне осуществимо.

Конструкция стенда. Для экспериментальной проверки выдвинутой идеи были сконструированы стенды однокоординатных перемещений с пьезокерамическим и электромагнитным ИЭ. Конструктивно они отличаются лишь используемыми ИЭ. Стенд с электромагнитным ИЭ, имеющим большую амплитуду колебаний упругой мембраны (ИЭ был сформирован на базе электромеханики телефона), с легкостью реализовывал перемещение. Однако из-за предпочтительности использования в реальных зондовых микроскопах пьезодвижителей после проработки технических, конструктивных и функциональных особенностей конфигурации был сконструирован стенд с пьезоэлектрическим ИМ.

На рис.1 приведена схема конструкции этого стенда. Здесь одна из двух жестких массивных стоек 1, скрепленных с основанием 2 несущей конструкции из кварцевого стекла (условие, приближающее к конструктивным особенностям реального зондового микроскопа), служит упором, и к ней крепится ИЭ 3. На его противоположной, свободной стороне прикреплен "удерживающий" ПМ 4. К внешним сторонам этой и второй стойки приклеены ЭМ 5. Столовые поверхности сердечников ЭМ и ПМ находятся в одной плоскости. К ним плотно прилегает предварительно отшлифованная поверхность перемещаемой пластинки – держателя 6. На рисунке изображена также система, позволяющая записывать ход кривой, отображающей движение держателя. Это - светодиод 7 и фотоприемник 8, зафиксированные относительно перемещаемого держателя, оптическая связь которых меняется заслоняющим излучением светодиода непрозрачным флажком 9. Он представляет собой треугольный отрезок фотобумаги, который свободно крепится к внешней поверхности держателя прижимным магнитиком. Такой прием позволяет легко зафиксировать флажок на держателе в таком месте, чтобы граница тени его располагалась в середине динамического диапазона ($\approx 0,5$ мм) этого опторегистратора.

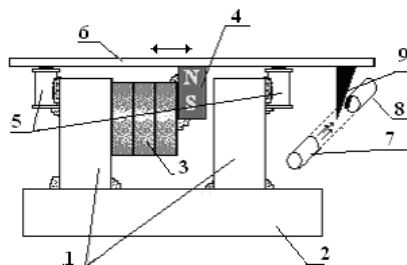


Рис.1. 1 – стойки; 2 - основание; 3 - стопка пьезодисков, приклеенных к одной из стоек, реализующих ИЭ; 4 - ПМ; 5 - скрепленные со стойками ЭМ; 6 -перемещаемая пластинка-держатель; 7 - светодиод и 8 - фотоприемник, организующие оптопару; 9 - флажок

В конструкции этого исследовательского макета в качестве ИЭ выступают собранные в стопку 3 дисковых пьезоэлемента с внутренним и внешними диаметрами d , D и толщиной h ($d = 12,8 \text{ мм}$, $D = 23 \text{ мм}$, $h = 5,5 \text{ мм}$). Суммарная величина смещения этого ИЭ доведена до $\approx 1,2 \text{ мкм}$ (расширение пьезопакета) и $\approx 0,8 \text{ мкм}$ (сжатие пьезопакета) при величине прикладываемого к стопке напряжения $\approx 390 \text{ В}$. В стендах использовались ЭМ от РЭС-9, имеющие сопротивление $\approx 526 \text{ Ом}$. Это потребовало для его питания транзисторное усиление тока с встроенной карты цифро-аналогового преобразования до величины $\approx 30 \text{ мА}$.

Алгоритм работы стенда. В исходном состоянии ЭМ обесточены, и пластинка - держатель покоится на поверхности торцов сердечников ЭМ и ПМ. После подачи на ИЭ соответствующего сигнала ПМ (а значит, и держатель, сцепленный магнитной силой ФПМ только с ним), скользя по поверхностям сердечников ЭМ, совершает перемещение. Для фиксации достигнутого перемещения (шага) на ЭМ подается ток такой величины, чтобы формирующаяся сумма сил сцепления ЭМ - пластинка - держатель $2F_{ЭМ}$ превзошла силу ФПМ. После этого с ИЭ убирается сигнал, что возвращает ПМ в исходное положение. Однако, благодаря обеспечению условия $2F_{ЭМ} \gg F_{ПМ}$, держатель не сдвигается с новой позиции, а ПМ лишь "проскальзывает" под ним. Последний этап – сведение к нулю сил $F_{ЭМ}$. Таким образом, совершается элементарный шаг движения.

Испытания его подсказали необходимость увеличения величины перемещения ПМ (в шаге) для реализации нужного движения. Причина – плохое удовлетворение условия $2F_{ЭМ} \gg F_{ПМ}$, что являлось причиной неэффективного "протаскивания" над ПМ и частичного проскальзывания держателя над сердечниками ЭМ.

Для исключения явления остаточного магнетизма в сердечниках ЭМ сведение к нулю $F_{ЭМ}$ проводится с учетом его гистерезисной природы. С этой целью обнуление тока обмоток ЭМ производится по закону знакопеременного затухающего колебания. Эта операция, будучи наиболее длительной среди этапов движения, является основным ограничителем скорости движения.

Измерительный прибор, позволяющий организовать необходимую последовательность операций, организующих движение, управлять параметрами их этапов и отображать поведение отслеживающего сигнала, оформлен в виде программы (LabVIEW).

На рис.2 и.3 приведены типичные результаты измерений.

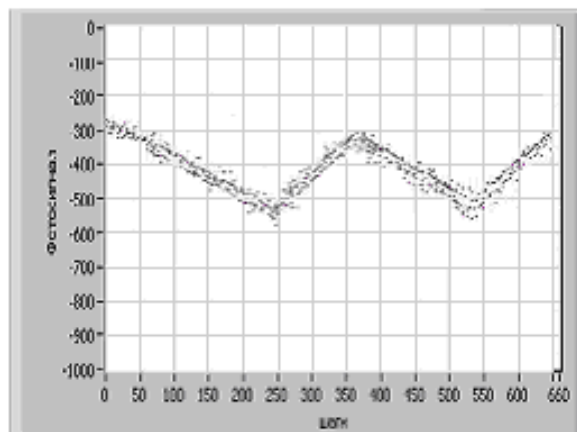


Рис.2. Ход зависимости сигнала с фотоприемника от количества шагов двигателя в прямом и обратном направлениях в горизонтальной конфигурации

Как видно на рис.2, максимуму изменения фотосигнала соответствует перемещение в горизонтальном направлении на расстояние около 150 мкм. В одном направлении для достижения этого результата понадобилось 120 "шагов", а в другом – 210. Варьированием амплитудой сигнала на ИМ можно менять и величину шага (для конкретно используемого ПМ).

Наблюдаемая асимметрия в перемещении вызвана неодинаковостью сжатия и расширения примененной пьезокерамики. Если роль такой операции сводится лишь к надежному осуществлению осторожного подвода (и отвода) зонда (в технике зондовой микроскопии) к поверхности исследуемого объекта на расстояние, при котором происходит устойчивая регистрация информативного сигнала, то такая асимметрия не столь существенна. Однако осуществление X,Y-перемещений (для позиционирования зонда над выбранной областью ИП в зондовой микроскопии) потребует, используя более совершенный ИЭ, свести к минимуму это явление.

Ход сигнала на рис.3 получен при работе стенда в вертикальной конфигурации.

Хорошо проявляющийся наклон трех (одинаковых по количеству шагов) этапов движения (подъем и опускание) объясняется необходимостью преодоления силы тяжести на этапе подъема и, наоборот, суммированием с ней при опускании. Вес используемой в стенде пластинки держателя ≈ 14 г. В этом случае длина диапазона относительного перемещения составляла около 230 мкм. На результатах измерения сказывается и нелинейность опторегистратора.

Приведенное измерение демонстрирует стабильность и надежность работы двигателя и в вертикальном положении.

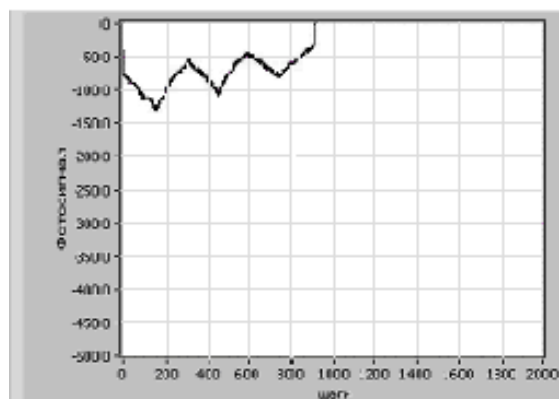


Рис.3. Ход зависимости сигнала с фотоприемника от количества шагов при подъеме и опускании пластинки

Таким образом, экспериментальное опробование предлагаемого способа операции предварительного позиционирования продемонстрировало его эффективность и простоту осуществления.

Из описанного следует, что перемещение диктуется направлением и направленностью изменения размеров ИЭ. Следовательно, используя ИЭ, реализующий ортогональные смещения (например, актюатор ортогональных смещений PICA-Shear Piezo Actuator, P-111.01. с характерными размерами 3х3х3.5 мм), можно создать малогабаритный двигатель X,Y-позиционирования предметных столиков зондовых микроскопов. Из принципа функционирования такого двигателя следует, что диапазон обеспечиваемых им перемещений ограничивается лишь размерами пластинки-столика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Эдельман В.С.** Сканирующая туннельная микроскопия // ПТЭ.-1989.-Т.5.-С.25-49.
2. **Быков В.А.** Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследований и модификации поверхностей: Дис. ... докт.техн.наук. - М., 2000.- 393 с.
3. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии / РАН ИФМ.-2004.-110с.
4. **Адамчук В.К., Ермаков А.В., Любинецкий И.В.** и др. Сканирующий туннельный микроскоп на основе монолитного пьезоэлемента крестообразного сечения // ПТЭ.-1989.-Т.5.-С.182-184.
5. **Coratger R., Beauvillain J., Ajustron F. et al** A stage for submicron displacements using electromagnetic coils and its application to scanning tunneling microscopy // Rev.Sci. Instrum. -1991.- 62, № 3.- P.830-831.
6. **Zeglinski D.M., Ogletree D.F., Beebe T.P., Hwang R.Q., Somorjai G.A., Salmeron M.B.** An ultrahigh scanning tunneling microscope for surface studies // Rev.Sci. Instrum. -1990. – 61, №.12.- P.3769-3774.
7. А.с. CU, 1541741 A1. Пьезоэлектрическое устройство перемещения / **А.О. Голубок, Д.Н. Давыдов, В.А. Тимофеев, С.Я. Типисцев.** – Оpubл. 21.12.1987.

8. **Azaryan M.H.** Device for investigation of semiconductor nanostructures //National Conf, Sevan.-10-12 September,-2001.-P. 283-288.
9. **Володин А.П., Степанян Г.А., Хайкин М.С., Эдельман В.С.** Сканирующий туннельный микроскоп с большим полем зрения, совместимый с растровым электронным микроскопом // ПТЭ.-1989.-Т.5.-С.185-187.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 01.12.2006.

Մ.Հ. ԱԶԱՐՅԱՆ

ՄԻԿՐՈՂԻԳՍԿՈՒՄ ԻՐԱԿԱՆԱՑՆՈՂ ՄԵԹՈԴ ԵՎ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄ

Նկարագրվում են միկրոդիրքավորում իրականացնող մեթոդ և սարքավորում: Բերված են զոնդային միկրոսկոպիային անհրաժեշտ հորիզոնական և ուղղահայաց միկրոտեղաշարժեր իրականացնող փորձերի որոշ արդյունքներ:

Առանցքային բառեր. դիրքավորում, պիեզոէլեմենտ, ստենդ, շարժիչ, էլեկտրամագնիս, հաստատուն մագնիս, թիթեղակալ:

M.H. AZARYAN

TECHNIQUE AND DEVICE FOR MICROPOSITIONING

The technique and the stand realizing micropositioning are represented. Some results of test accomplishing the operation of horizontal and vertical microdisplacement that are necessary for probe microscopy are given.

Keywords: positioning, piezoelement, stand, engine, electromagnet, constant magnet, plate-holder.

Ա.Ս. ՇԱՂԱՍՅԱՆ

ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ՉԱՓՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ներկայացված են ջերմային էներգիայի չափման ճշգրտության բարձրացման ուղիները, չափիչ սարքերի ընտրման ու շահագործման պահանջները և սխալների հաշվարկի բանաձևերը:

Առանցքային բառեր. ջերմային էներգիա, ջերմամատակարարման բաց և փակ համակարգեր:

Ջերմային էներգիայի չափման ճշգրտության բարձրացումն ունի կարևոր տնտեսական նշանակություն ինչպես ջերմամատակարարող կազմակերպության, այնպես էլ սպառողի համար:

Փակ ջերմամատակարարման համակարգերում ջերմային էներգիայի ծախսը որոշվում է օրենսդրական չափագիտության Միջազգային կազմակերպության կողմից R75 փաստաթղթով [1] առաջարկված բանաձևով՝

$$Q = Q_1 - Q_2 = M(h_1 - h_2), \quad (1)$$

որտեղ M -ը ջերմակրիչի հոսքն է տաք (ուղիղ) և սառը (հետադարձ) խողովակաշարերով, h_1 -ը և h_2 -ը ջերմակրիչի էնթալպիաներն են համապատասխանաբար տաք և սառը խողովակաշարերում:

Այս դեպքում ջերմային էներգիայի մատակարարը հաշվի է առնում նաև ջերմակրիչի ներքին կորուստները: Բանաձևից հետևում է, որ շատ կարևոր է ոչ միայն ջերմաստիճանների և դրանց տարբերության ճշգրիտ չափումը, որոնցից կախված են էնթալպիաները, այլ նաև ջերմակրիչի ծախսի (M) չափումը:

Բաց ջերմամատակարարման համակարգերում ջերմային էներգիայի ծախսը որոշվում է ըստ

$$Q = M_1 h_1 - M_2 h_2 \quad (2)$$

բանաձևի, որտեղ M_1 -ը և M_2 -ը՝ ջերմակրիչի հոսքն են (ծախսը) համապատասխանաբար տաք և սառը խողովակաշարերով:

Ջերմային էներգիայի ծախսի չափման սխալը հիմնականում պայմանավորված է սարքերի մշտառկա սխալներով ու դրանց նշանով, սակայն սարքերի ստուգաչափման դեպքում որոշվում է դրանց պատկանելիությունը նշված ճշգրտության դասին: Այս դեպքում ջերմային էներգիայի չափման սխալը հնարավոր է որոշել սարքերի մշտառկա սխալների հանրահաշվական գումարման միջոցով:

Եթե ջերմային էներգիայի չափման սխալը որոշվի ըստ սարքերի ճշգրտության դասերի, առանց հաշվի առնելու դրանց սխալների նշաններն ու իրական արժեքները, ապա կորոշվի չափման սխալի ամենամեծ սահմանային արժեքը, որը չի համապատասխանի իրականությանը: Հետևաբար նպատակահարմար է պարբերական ստուգաչափումից հետո շահագործողներին տրամադրել մշտառկա սխալների ստացված արժեքները ստուգման կետերում, որը կնպաստի չափման սխալի ավելի ճշգրիտ որոշմանը:

Փակ ջերմամատակարարման համակարգում չափված ջերմային էներգիան՝

$$Q_{\square} = M(h_1 - h_2) + M\delta_M(h_1 - h_2) + M(h_1\delta_{h1} - h_2\delta_{h2}) + M\delta_M(h_1\delta_{h1} - h_2\delta_{h2}), \quad (3)$$

որտեղ δ_{M1} -ը ջրի զանգվածի չափման սխալն է, δ_{h1} -ը և δ_{h2} -ը՝ էնթալպիաների չափման սխալները:

Հետևաբար, ջերմային էներգիայի չափման բացարձակ սխալը՝

$$\Delta Q = M(h_1 - h_2) \left[\delta_M + \frac{h_1\delta_{h1} - h_2\delta_{h2}}{h_1 - h_2} + \frac{\delta_M(h_1\delta_{h1} - h_2\delta_{h2})}{h_1 - h_2} \right], \quad (4)$$

իսկ հարաբերական սխալը՝

$$\delta Q = \delta_M + \frac{h_1\delta_{h1} - h_2\delta_{h2}}{h_1 - h_2} (1 + \delta_M): \quad (5)$$

Գործնականում բանաձև (5)-ի աջ մասում կարելի է անտեսել $\delta_M \ll 1$, հետևաբար կստանանք՝

$$\delta Q \approx \delta_M + \frac{h_1\delta_{h1} - h_2\delta_{h2}}{h_1 - h_2} : \quad (6)$$

Եթե ընդունենք $\delta_{h1} = \delta_{h2} = \delta_h$, ապա

$$\delta Q \approx \delta_M + \delta_h : \quad (7)$$

Բանաձև (7)-ից հետևում է, որ ջերմության քանակի չափման սխալը ամենամեծն է, երբ ջերմակրիչի ծախսի ու ջերմաստիճանների չափման սխալներն ուղիղ ու հետադարձ խողովակաշարերում նույն նշանի են և այդ տվիչներն ընտրված (համաձայնեցված) չեն:

Բաց ջերմամատակարարման համակարգում ջերմային էներգիայի չափման սխալը կստացվի՝

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\square F} &= M_1 h_1 (\delta_{M1} + \delta_{h1} + \delta_{M1} \delta_{h1}) - M_2 h_2 (\delta_{M2} + \delta_{h2} + \delta_{M2} \delta_{h2}) \approx \\ &\approx M_1 h_1 (\delta_{M1} + \delta_{h1}) - M_2 h_2 (\delta_{M2} + \delta_{h2}) : \end{aligned} \quad (8)$$

Եթե ընդունենք $M_1 h_1 = k M_2 h_2$, ապա

$$\Delta Q \approx M_1 h_1 \left[\delta_{M1} + \delta_{h1} - \frac{1}{k} (\delta_{M2} + \delta_{h2}) \right], \quad (9)$$

իսկ հարաբերական սխալը՝

$$\delta Q = \frac{k}{k-1} \left[\delta_{M1} + \delta_{h1} - \frac{1}{k} (\delta_{M2} + \delta_{h2}) \right] = \frac{k}{1-k} (\delta_M + \delta_h), \quad (10)$$

որտեղ $k = M_1 h_1 / M_2 h_2 > 1$, $\delta_M = \delta_{M1} - \delta_{M2}/k$, $\delta_h = \delta_{h1} - \delta_{h2}/k$:

(5) ու (10) բանաձևերից հետևում է, որ մշտառկա սխալի փոքրացման համար անհրաժեշտ է, որ էնթալպիաների և ջրի ծախսի չափման մշտառկա սխալները լինեն նույն նշանով: Քանի որ կարելի է ընդունել $h \approx k_t t$ ($k_t = 4,21 \text{ ՄՋ/}^\circ\text{C}$, երբ

ջերմաստիճանները գտնվում են 10°C -ից մինչև 150°C , իսկ ճնշումը՝ $0,1$ -ից մինչև $1,0$ ՄՊա), ապա ջերմային էներգիայի չափման համակարգերում անհրաժեշտ է օգտագործել զույգ ընտրված պլատինե դիմադրության ջերմակերպափոխիչներ (ԴՋ), որոնցից յուրաքանչյուրը հետագայում չի կարելի փոխարինել այլ ԴՋ-ով, այսինքն համափոխարինելիությունը կարելի է ապահովել միայն զույգ ընտրված ԴՋ-ներով: Նշված պահանջը չբավարարելու դեպքում կարող է առաջանալ զգալի սխալ: Քանի որ շահագործման ընթացքում ԴՋ-ների բնութագրերը կարող են փոփոխվել, ապա անհրաժեշտ է պարբերաբար (տարեկան մեկ անգամ) կատարել դրանց ստուգաչափում և արդյունքները գրանցել համապատասխան գրանցամատյանում: Ստուգաչափումից հետո ԴՋ-ները պետք է տեղադրել նախկին դիրքերում (մտնող ու դուրս եկող խողովակաշարերում), նախապես համարակալելով, որովհետև տեղերը փոխելիս կփոխվի չափման սխալի նշանը (դա կարող է հանգեցնել ինչպես համարժեք սխալի փոքրացմանը, այնպես էլ մեծացմանը): Նույնը կարելի է նշել նաև ջերմակրիչի զանգվածի չափման սարքերի ընտրության համար:

Ընդհանուր դեպքում δ_M և δ_n սխալները պատահական են ու անկախ, հետևաբար կստանանք՝

$$\tilde{\delta}_Q = \sqrt{\tilde{\delta}_M^2 + \tilde{\delta}_n^2} : \quad (11)$$

Ջրի ջերմաստիճանի չափման համար ԴՋ-ը ամրացվում է խողովակի ներսում, իսկ խողովակի հետ միացման կետի ջերմաստիճանը տարբերվում է աշխատանքային նյութի(ջրի) ջերմաստիճանից: Դրա հետևանքով առաջանում է ջերմաստիճանի չափման մեթոդական սխալ, որը կախված է նաև ԴՋ-ի պատյանով դեպի խողովակը ջերմության հաղորդմամբ ու ճառագայթման ջերմափոխանակությամբ: Այդ սխալը կարելի է ճիշտ որոշել միայն փորձնական հետազոտությունների միջոցով: Ընդունելով, որ ԴՋ-ի ջերմաստիճանը գծայնորեն է կախված ընկղմված մասի երկարությունից, ջերմաստիճանի չափման մեթոդական սխալը կստացվի [2]՝

$$\Delta_{\square\square} = t_{\square} - t_{\square} = -\frac{t_{\square} - t_{\square}}{\text{ch}(\text{lm})}, \quad (12)$$

որտեղ $t_{\square}$ -ն ջրի իրական ջերմաստիճանն է, $t_{\square}$ -ն՝ չափումից ստացված ջերմաստիճանը, $t_{\square}$ -ն՝ խողովակի ջերմաստիճանը միացման կետում,

$m = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}}$, l -ը ԴՋ-ի երկարությունն է խողովակի ներսում, λ -ն՝ ԴՋ-ի պատյանի ջերմահաղորդականության գործակիցը, δ -ն՝ ԴՋ-ի պատյանի հաստությունը, α -ն՝ հեղուկից ԴՋ-ին ջերմահաղորդականության գործակիցը:

Ջերմամատակարարման համակարգերում ջերմաստիճանների տարբերության չափման մեթոդական սխալը՝

$$\begin{aligned} \Delta_{\square\square} &= (t_{\square\square} - t_{\square\square}) - (t_{\square\square} - t_{\square\square}) = \Delta_{\square\square.\square\square\square} \Delta_{\square\square.\square\square\square} \\ &= -\frac{t_{\square.\square\square\square} - t_{\square.\square\square\square}}{\text{ch}(\text{lm})} + \frac{t_{\square.\square\square\square} - t_{\square.\square\square\square}}{\text{ch}(\text{lm})} = \frac{\Delta t_{\square} + \Delta t_{\square}}{\text{ch}(\text{lm})}, \end{aligned} \quad (13)$$

որտեղ $\Delta t_2 = -(t_{2 \text{ տաք}} - t_{2 \text{ սառը}})$, $\Delta t_1 = t_{1 \text{ տաք}} - t_{1 \text{ սառը}}$:

Եթե ԴՋ-ի զգայուն մասի երկարությունն l_{qq} է, ապա մեթոդական սխալի բանաձևում կմտնի նաև $b = l_{qq}/l$ գործակիցը [2]՝

$$\Delta_{\square\square} = \frac{\Delta t_{\square} + \Delta t_{\square}}{ch(lm)} \cdot \frac{sh(lm)}{lmb} = (\Delta t_{\square} + \Delta t_{\square}) \frac{sh(lmb)}{lmbch(lm)} : \quad (14)$$

Եթե $l=0,2$ մ, $l_{qq}=0,1$ մ, $\lambda \approx 68$ Վմ/(մ·Կ), $\delta=0,002$ մ, $\alpha \approx 0,95$, կստանանք՝
 $m \approx 2,6$, $lmb=0,26$ և $ch=(0,52)=1,138$, $sh=(0,26)=0,263$:

Հետևաբար՝

$$\frac{sh(lmb)}{lmbch(lm)} \approx 0,888 \quad \text{և} \quad \Delta_{\square\square} \approx 0,89(\Delta t_{\square} + \Delta t_{\square}) : \quad (15)$$

(13) բանաձևից հետևում է, որ $\Delta t_{\square}$ -ն և $\Delta t_{\square}$ -ն տարբեր նշաններ ունեն, հետևաբար սխալի փոքրացման համար անհրաժեշտ է ջերմամեկուսացնել ԴՋ-ի՝ խողովակի հետ միացման հանգույցը (այդ դեպքում $\Delta t_{\square} \approx \Delta t_{\square}$): Եթե ջերմամեկուսացում չկատարվի, ապա մեծ $\Delta t_{\square}$ -ի դեպքում այդ սխալը կարող է ստացվել զգալիորեն մեծ:

Ջերմակրիչի զանգվածային ծախսը՝ $M=V\rho$, սովորաբար որոշվում է ծավալային ծախսաչափի միջոցով, որտեղ ρ -ն ջրի խտությունն է, որը կախված է ջերմաստիճանից ու ճնշումից (սովորաբար ընդունվում է $\rho=983$ կգ/մ³, երբ $t=60$ °C, $P=1,6 \cdot 10^6$ Պա), V-ն՝ ծախսված ջերմակրիչի ծավալը:

Հետևաբար, ջերմակրիչի զանգվածի չափման հարաբերական սխալը կորոշվի

$$\delta_M = \delta_v + \delta_{\rho} \quad (16)$$

բանաձևով, որտեղ δ_v -ն ջերմակրիչի ծավալի չափման սխալն է, δ_{ρ} -ն՝ ջերմակրիչի խտության որոշման սխալը:

Հիմնականում $\delta_{\rho} < 0,2\%$, հետևաբար կարելի է ընդունել

$$\delta_Q = \delta_M = \delta_v : \quad (17)$$

Ջերմային էներգիայի չափման համակարգերում ջրի ծախսի չափման համար նպատակահարմար է օգտագործել էլեկտրամագնիսական և ուլտրաձայնային կերպափոխիչներ, որոնք չեն մտցնում ճնշման լրացուցիչ փոփոխություն, ունեն էլեկտրական ելքային ազդանշան ու բարձր ճշգրտություն լայն աշխատանքային տիրույթում:

Սխալի փոքրացման հարցում կարևոր նշանակություն ունի ջերմաստիճանների և դրանց տարբերության չափումը բարձր ճշգրտությամբ, որը հնարավոր է միայն թվային չափիչ սարքերի օգտագործման դեպքում: Ելնելով ընտրված ջերմաստիճանի տվիչների և ծախսաչափերի բնութագրերից՝ պետք է մշակվի ջերմության քանակի չափման թվային սարքավորման կառուցման սկզբունքը՝ ժամանակակից տարրերի օգտագործումով: Նպատակահարմար է ջերմային էներգիայի ծախսի կերպափոխումը հաճախության, որի ինտեգրման միջոցով կարելի է բարձր ճշգրտությամբ չափել ջերմային էներգիայի ծախսը: Ջերմային էներգիայի հաշվիչը (ՋԷՀ) չափիչ համակարգ է, որը նախատեսված է ջերմային էներգիայի կոմերցիոն հաշվառման համար, և բաղկացած է մուտքային ու ելքային խողովակներում ջերմակրիչի առանձին ֆիզիկական պարամետրերի չափման

միջոցներից և հաշվիչ սարքավորումից, որի միջոցով որոշվում է ծախսված ջերմաքանակը՝ պարամետրերի չափման միջոցների ազդանշաններով:

Աղյուսակ

ՋԷՀ-ի դասը	$\delta_0, \%$	$\Delta t_g, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_p, ^\circ\text{C}$
C	$\pm(2+4 \Delta t_g / \Delta t+0,01 M_p/M)$	1;2;3	$t_{w2p} - 5 ^\circ\text{C}$
B	$\pm(3+4 \Delta t_g / \Delta t+0,02 M_p/M)$	2;3;5	
A	$\pm(4+4 \Delta t_g / \Delta t+0,05 M_p/M)$	3;5;10	

ՋԷՀ-ների տեխնիկական ու չափագիտական բնութագրերը պետք է բավարարեն ГОСТ Р 51649-2000-ի պահանջները [4,5]: Ըստ այդ ստանդարտի՝ ջերմային էներգիայի հաշվիչները (ՋԷՀ) պետք է պատրաստվեն C, B և A դասերով, որոնց թույլատրելի հարաբերական սխալների սահմանային արժեքները (δ_0) բերված են աղյուսակում (որտեղ M-ը ջերմակրիչի ծախսն է, իսկ M_p -ն՝ դրա ամենամեծ արժեքը, Δt -G՝ մտնող և դուրս եկող ջերմակրիչի ջերմաստիճանների տարբերությունը): Ջրի ծախսի չափման սարքավորման պայմանական տրամագիծը գտնվում է $10 \text{ մմ} \leq d \leq 200 \text{ մմ}$ սահմաններում և պետք է ընտրվի ստանդարտից, իսկ ամենամեծ ծախսը՝ M_p , որոշվում է ջրի միջին արագության 0,3-ից մինչև 10 մ/վրկ արժեքների դեպքում: Ջերմակրիչի պայմանական ճնշումը պետք է լինի 1,6...2,0 ՄՊա: Ջերմակրիչի նվազագույն ծախսը, որի դեպքում հաշվվում է ջերմության քանակը, պետք է լինի $0,001 M_p$ -ից մինչև $0,1 M_p$ սահմաններում: Նորմալ պայմաններում ՋԷՀ-ի սխալը պետք է որոշվի հետևյալ ռեժիմներում՝

1. $\Delta t_g \leq \Delta t \leq 1,2 \Delta t_g$, $0,9 M_p \leq M \leq M_p$,
2. $10^\circ\text{C} \leq \Delta t \leq 20^\circ\text{C}$, $0,2 M_p \leq M \leq 0,22 M_p$,
3. $\Delta t_{w2p} - 5^\circ\text{C} \leq \Delta t \leq \Delta t_p$, $M_p \leq G \leq 1,1 M_p$:

ՋԷՀ-ի համար տրվում են չափման սահմաններն ըստ ջերմաստիճանի (t_g , t_p) և ջերմակրիչի ծախսի (M_g , M_p): Ստանդարտում ընդունված է, որ ջերմակրիչի կորուստները բացակայում են, իսկ ճնշումները մուտքում (P_1) ու ելքում (P_2) հավասար են:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Рекомендация OIML R75.Теплосчетчики.
2. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы.-М.: Энергия,1978. - 704с.
3. МИ2412-97. Рекомендации ГСОВИ. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерения энергии и количества теплоносителя.
4. Беляев Б.М. и др. Так что же все-таки измеряют теплосчетчики // Законодательная и прикладная метрология. 2001.№3. с.25-31.
5. ГОСТ Р 51649-2000. Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения. Общие технические условия.

ՀՊՃՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն՝ 15.04.2007:

А.С. ШАХКАМЯН

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрены пути повышения точности измерения тепловой энергии. Изучены требования по выбору и эксплуатации измерительных приборов. Приведены формулы расчета погрешностей.

Ключевые слова: тепловая энергия, системы открытого и закрытого теплоснабжения.

A.S. SHAGHGAMYAN

HEAT ENERGY MEASUREMENT PECULIARITIES

The methods for increasing heat energy measurement accuracy are examined. The requirements for selection and usage of measurement instruments are studied. Error evaluation formulas are provided.

Keywords: heat energy, systems of open and close heating, error.

В.Г. АВETИСЯН, М.В. МАРКОСЯН, А.А. ОГАНЕСЯН, С.Г. ЭЙРАМДЖЯН

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Сообщение 1. Методика тестирования

Предлагается методика тестирования модулей активной фазированной антенной решетки (АФАР). Модуль состоит из четырех элементарных приемо-передающих ячеек, каждая из которых содержит электронно-управляемые аттенуатор и фазовращатель, усилители мощности, маломощные усилители и излучатель, параметры которых достаточно просто тестируются по предлагаемой методике.

Ключевые слова: активная фазированная антенная решетка, приемо-передающая ячейка, методика тестирования.

В настоящее время в СВЧ радиотехнических системах различного рода широко применяются АФАР. Несомненным преимуществом АФАР является обеспечение ее высокой направленности вместе с возможностью оперативного управления параметрами АФАР в различных режимах работы радиотехнической системы [1]. Особенностью АФАР является наличие активных элементов в ее приемо-передающих ячейках, а именно: усилителей мощности в режиме передачи, маломощных усилителей для режима приема, аттенуаторов, фазовращателей и т.д.

Цель настоящей работы - рассмотреть вопрос тестирования параметров приемо-передающих модулей АФАР.

В нашем случае модуль АФАР состоит из четырех элементарных приемо-передающих ячеек, каждая из которых включает в себя узлы согласно приведенной на рис.1 блок-схеме.

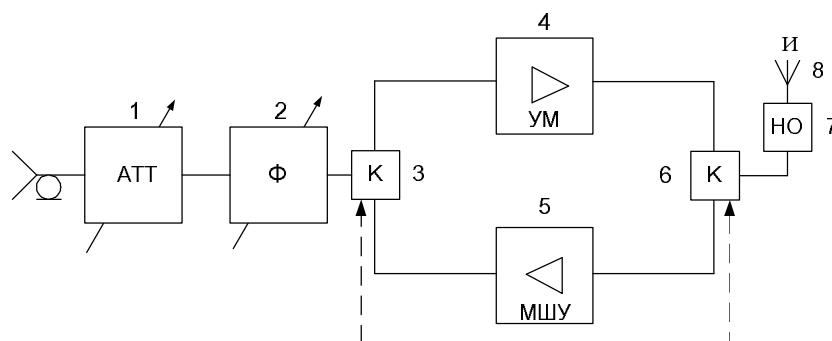


Рис.1. Блок-схема приемо-передающей ячейки: 1 - электронно-управляемый дискретный аттенуатор, 2 - электронно-управляемый дискретный фазовращатель, 3, 6 - синхронно-работающие коммутаторы, 4 - цепочка усилителей мощности, 5 - цепочка маломощных усилителей, 7 - направленный ответвитель, 8 - излучатель

Ослабление аттенюатора 1 управляется в определенном интервале и с определенным дискретом. Управляемый фазовращатель 2 осуществляет изменение фазы в определенном интервале углов и с определенным дискретом угла. В режиме излучения сигнал усиливается цепочкой балансных микрополосковых усилителей мощности 4. В режиме приема работает цепочка малошумящих усилителей (МШУ) 5. Переключение каналов приема и передачи осуществляется синхронно работающими коммутаторами 3 и 6. Направленный ответвитель 7 в виде моста Ланге [2] следует за коммутатором 6. Мост обеспечивает квадратурные сигналы для получения волны правой круговой поляризации, излучаемый квадратным микрополосковым излучателем 11 размерами $\lambda/2 \cdot \lambda/2$.

Методика тестирования включает проверку работоспособности вышеперечисленных узлов и соответствия их основных параметров техническому заданию (ТЗ) и паспортным данным. Параметры аттенюатора 1, фазовращателя 2, цепочки усилителей мощности 4 и излучателя 8 тестируются посредством определения амплитуд E_y , E_x и фаз φ_y , φ_x вертикальной $\vec{E}_y$ и горизонтальной $\vec{E}_x$ комплексных составляющих электрического поля $\vec{E}$ ($\vec{E} = \vec{x}\vec{E}_x + \vec{y}\vec{E}_y$) в дальней зоне излучателя 8 тестируемого модуля. Блок-схема тестирования E_y , E_x , φ_y , φ_x приведена на рис. 2.

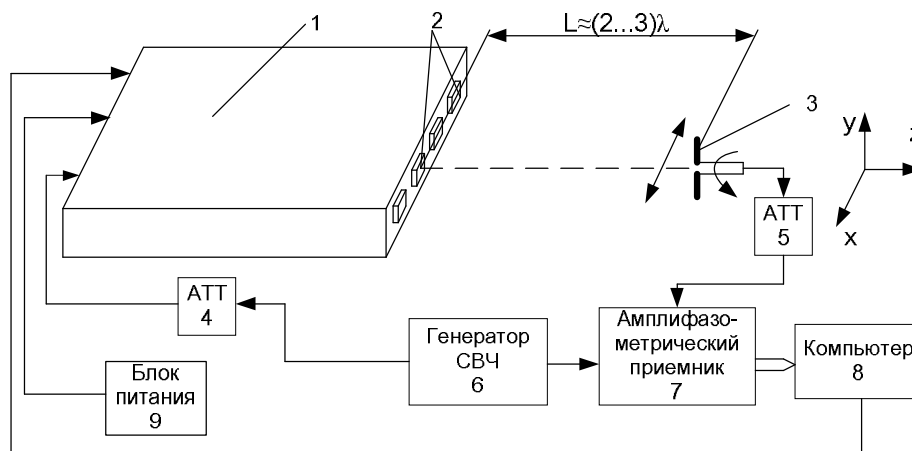


Рис.2. Блок-схема тестирования модуля АФАР: 1 - модуль АФАР, 2 - микрополосковый квадратный излучатель элементарной приемопередающей ячейки, 3 - измерительная антенна (полуволновой вибратор), 4, 5 - калибрующие аттенюаторы, 6 - СВЧ генератор, 7 - амплифазометрический приемник, 8 - компьютер, 9 - блок питания

Управление подачей рабочих напряжений от блока питания на приемо-передающие ячейки осуществляется компьютером через модуль. Расстояние $L \approx (2...3)\lambda$ между плоскостью расположения излучателей элементарных ячеек 2 модуля 1 и плоскостью, в которой перемещается измерительная антенна 3 в виде полуволнового вибратора, обеспечивает дальнюю зону излучателя ячейки [3]. Продольная ось Z измерительной антенны 3 совмещается с нормалью, проведенной через центр симметрии излучателя тестируемой ячейки. При этом остальные ячейки обесточены. Для определения составляющих $\dot{E}_y$ и $\dot{E}_x$ измерительная антенна 3 имеет возможность дискретного поворота вокруг продольной оси Z на 90° . Выходными сигналами амплифазометрического приемника 7 [4] являются амплифазные ортогональные компоненты U_{1y} , U_{2y} составляющей $\dot{E}_y$:

$$\dot{E}_y = U_{1y} + jU_{2y} = E_y \cos \varphi_y + jE_y \sin \varphi_y = E_y e^{j\varphi_y} \quad (1)$$

или амплифазные компоненты U_{1x} , U_{2x} составляющей $\dot{E}_x$:

$$\dot{E}_x = U_{1x} + jU_{2x} = E_x \cos \varphi_x + jE_x \sin \varphi_x = E_x e^{j\varphi_x} \quad (2)$$

в зависимости от ориентации полуволнового вибратора измерительной антенны 3. Причем амплитуды E_y , E_x и фазы φ_y , φ_x соответственно составляющих $\dot{E}_y$ и $\dot{E}_x$ поля $\vec{E}$ вычисляются компьютером 8 по измеренным амплифазным компонентам посредством очевидных выражений

$$E_x = \sqrt{U_{1x}^2 + U_{2x}^2}; E_y = \sqrt{U_{1y}^2 + U_{2y}^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_x = \arctg \frac{U_{2x}}{U_{1x}}; \varphi_y = \arctg \frac{U_{2y}}{U_{1y}}. \quad (4)$$

Прежде чем описать методику тестирования параметров вышеотмеченных узлов, отметим, что важным из тестируемых параметров является заданный в ТЗ уровень излучаемой мощности $P_{\text{мод}}^0$ на входе излучателя 8 тестируемой ячейки. Он обеспечивается опять же заданными в ТЗ уровнем мощности $P_{\text{вх}}^0$ на входе ячейки и коэффициентом усиления $K_{\text{ум}}^0$ по мощности ячейки. Поэтому в процессе тестирования необходимо обеспечение заданных $P_{\text{вх}}^0$ и $P_{\text{мод}}^0$.

Уровень $P_{\text{вх}}^0$ калибруется показанием калибрующего аттенюатора 4 блок-схемы 2 путем измерения его выходной мощности. Предположим, что показанию ослабления $G_{\text{дБ}}^0$ аттенюатора 4 соответствует $P_{\text{вх}}^0$.

Для обеспечения $P_{\text{мод}}^0$ производится следующая начальная калибровка. Выход аттенюатора 4 подсоединяется к входу коаксиально-волноводного перехода (КВП), который располагается перед измерительной антенной 3 так, чтобы их продольные оси симметрии совмещались, а расстояние от плоскости волноводного фланца КВП до измерительной антенны равнялось L . Затем измерителем мощности и вторым КВП, подсоединенным к первому КВП, ручкой аттенюатора 4 устанавливается

уровень мощности $P_{\text{мод}}^0/2$ на выходе фланца первого КВП. После этого второй КВП убирается, аттенюатор 5 выводится из закрытого состояния, ручкой аттенюатора 5 устанавливается ослабление $G_5^0(\text{дБ})$, необходимое для нормальной работы амплифазометрического приемника, и фиксируется вычисляемая компьютером 8 амплитуда E_{y0} , соответствующая вертикальной составляющей поля в точке расположения измерительной антенны 3, ориентированной вдоль оси Y. Ясно, что при тестировании элементарной ячейки модуля по блок-схеме, изображенной на рис.2, величина E_{y0} с учетом круговой поляризации волны, излучаемой излучателем ячейки, будет фиксироваться при входной мощности излучателя, равной $P_{\text{мод}}^0$, и показании 0G_5 аттенюатора 5, равном

$$^0G_5 = G_5^0 + (G_{\text{изл}} - G_{\text{КВП}}), \quad (5)$$

где $G_{\text{изл}} = G_{\text{изл}}(\text{дБ})$ - коэффициент усиления излучателя, а $G_{\text{КВП}} = G_{\text{КВП}}(\text{дБ})$ - коэффициент усиления открытого конца КВП.

Таким образом, после начальных калибровок тестирование итогового коэффициента усиления $K_{\text{ум}}$ по мощности ячейки модуля в режиме передачи сводится к следующему: а) ручка аттенюатора 5 устанавливается на показание ослабления 0G_5 ; б) ручка аттенюатора 4 устанавливается на показание ослабления в районе величины G_4^0 ; в) определяется отклонение $\Delta K_{\text{ум}}(\text{дБ})$ коэффициента усиления по мощности от величины $K_{\text{ум}}^0$, заданной в ТЗ, согласно выражению

$$\Delta K_{\text{ум}}(\text{дБ}) = K_{\text{ум}}(\text{дБ}) - K_{\text{ум}}^0(\text{дБ}) = G_4 - G_4^0, \quad (6)$$

где $G_4(\text{дБ})$ - показания аттенюатора 4, при котором компьютер 8 выдает величину E_{y0} , которая свидетельствует о наличии на входе излучателя тестируемой ячейки уровня мощности $P_{\text{мод}}^0$. Очевидно, что результаты вычислений фаз φ_y при такой процедуре тестирования ячеек определяют разброс фазовых передаточных характеристик ячеек в режиме излучения.

После вышеупомянутых процедур (величин $K_{\text{ум}}^0$ и φ_y) процедура тестирования фазовращателя 2 и аттенюатора 1 (рис.1) тестируемой ячейки сводится к следующему. На электронно-управляемый аттенюатор 1 подается управляющее напряжение, и при неизменном значении E_{y0} путем отсчета разности показаний $(G_5 - ^0G_5)$ аттенюатора 5 определяются вводимые аттенюатором 1 дискрет и интервал ослабления. Тестирование же электронно-управляемого фазовращателя 2 осуществляется путем отсчета изменения фазы φ_y , вычисляемой компьютером 8.

Следующими тестируемыми параметрами в режиме излучения являются поляризационные характеристики волны, излучаемой излучателем. Для их тестирования измерительная антенна 3 поворачивается на угол 90° вокруг своей продольной оси Z, и при показаниях G_4 и 0G_5 соответственно калибрующих аттенюаторов 4 и 5 компьютером 8 вычисляется амплитуда E_{x0} и фаза φ_x горизонтальной составляющей поля $\vec{E}$. Затем компьютер 8

последовательно вычисляет угол наклона α поляризационного эллипса излучаемой волны [5]:

$$\alpha = \arctg \frac{2(E_{x0}/E_{y0})\cos(\varphi_y - \varphi_x)}{(E_{x0}/E_{y0})^2 - 1}, \quad (7)$$

коэффициент эллиптичности m этой волны:

$$m = \frac{\sqrt{1 - (E_{x0}/E_{y0})^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}{\sqrt{(E_{x0}/E_{y0})^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha}} \quad (8)$$

и, наконец, уровень кросс-поляризации Δ_k волны паразитной круговой левой поляризации:

$$\Delta_k (\text{дБ}) = 20 \lg \frac{E_{\text{л}}}{E_{\text{п}}} = 20 \lg \frac{1 - m}{1 + m}, \quad (9)$$

где $E_{\text{л}}$ и $E_{\text{п}}$ - амплитуды волн соответственно левой и правой круговых поляризаций волны.

Тестирование заданного в ТЗ итогового коэффициента усиления $K_{\text{МШУ}}^0$ цепочки малошумящих усилителей выполняется в приемном режиме элементарной ячейки модуля. Для этого опять применяется блок-схема рис.2, но в ней модуль 1 и измерительная антенна 3 переставляются местами.

В этом случае также производятся начальные калибровки. Однако, прежде чем описать выполнение калибровок, отметим следующее. При блок-схеме рис.2 в режиме приема элементарной ячейки модуля мощность $P_{\text{вх}}^{\text{МШУ}}$ на входе цепочки МШУ 5 (см рис.1), с учетом деления мощности пополам мостом Ланге, определится, согласно [6], соотношением

$$P_{\text{вх}}^{\text{МШУ}} = 0,5 \times P_0^{\text{ИА}} G_{\text{ИА}} G_{\text{изл}} \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 G_6, \quad (10)$$

где $P_0^{\text{ИА}}$ - мощность на входе измерительной антенны 3; $G_{\text{ИА}}$ - коэффициент усиления измерительной антенны 3; G_6 - коэффициент передачи коммутатора 6; λ - длина рабочей СВЧ волны.

Мощность на выходе ячейки $P_{\text{вых}}^0$ (на входном разъеме аттенюатора 1 рис.1) определяется выражением

$$P_{\text{вых}}^0 = P_{\text{вх}}^{\text{МШУ}} K_{\text{МШУ}}^0 G_3 G_2 G_1 = 0,5 \times P_0^{\text{ИА}} G_{\text{ИА}} G_{\text{изл}} \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 K_{\text{МШУ}}^0 G_6 G_3 G_2 G_1, \quad (11)$$

где G_1 и G_2 - коэффициенты передачи соответственно обесточенных аттенюатора 1 и фазовращателя 2 схемы рис.1; G_3 - коэффициент передачи коммутатора 3.

Если принять $G_{\text{ИА}} G_{\text{изл}} G_6 G_3 G_2 G_1 \approx 1$ ($G_{\text{изл}} \leq 6\text{дБ}$, $G_{\text{ИА}} \approx 2\text{дБ}$), усиление цепочки усилителей $K_{\text{МШУ}}^0 \approx 30\text{дБ}$, $L \approx (2...3)\lambda$ и $P_{\text{вых}}^0 \approx 10\text{мВт} \approx 0,1P_{\text{нас}}$, где $P_{\text{нас}}$ – выходная мощность насыщения МШУ, из (11) получим $P_{\text{ИА}}^0 \approx 10...26\text{мВт}$. Выберем $P_{\text{ИА}}^0 = 10\text{ мВт}$ и при конкретных величинах, входящих в (11), рассчитаем величину $P_{\text{вых}}^0$.

Далее производим первую начальную калибровку. Она заключается в калибровке уровня выбранной мощности $P_{\text{ИА}}^0$ на входе измерительной антенны 3. Для этого выход аттенюатора 4 подсоединяется к измерителю мощности, и ручкой аттенюатора 4 устанавливается ослабление, соответствующее выбранному уровню $P_{\text{ИА}}^0 = 10\text{мВт}$. Предположим, что показание ослабления G_4^{01} аттенюатора 4 соответствует этому уровню.

Вторая начальная калибровка заключается в следующем. К выходу аттенюатора 4 (рис.2) подключается измеритель мощности, и ручкой аттенюатора 4 на его выходе устанавливается расчетный уровень мощности $P_{\text{вых}}^0$. Измеритель мощности убирается, и к выходу аттенюатора 4 подключается вход закрытого аттенюатора 5. Ручкой аттенюатора 5 устанавливается показание ослабления G_5^{01} , обеспечивающее нормальную работу амплифазометрического приемника 7, и фиксируется величина E^{01} , вычисляемая компьютером 8 при установленных ослаблениях аттенюаторов 4 и 5. На этом процесс второй начальной калибровки завершается.

После выполнения описанных калибровок производится тестирование итогового коэффициента усиления $K_{\text{МШУ}}$ ячейки модуля в режиме приема по блок-схеме рис.2. Для этого: а) ручкой аттенюатора 4 устанавливается показание ослабления G_4^{01} ; б) аттенюатор 5 выводится из закрытого состояния, его ручкой устанавливается показание ослабления в районе величины G_5^{01} ; в) определяется отклонение $\Delta K_{\text{МШУ}}$ (дБ) коэффициента усиления $K_{\text{МШУ}}$ цепочки малошумящих усилителей ячейки от заданного в ТЗ значения $K_{\text{МШУ}}^0$ по выражению

$$\Delta K_{\text{МШУ}} (\text{дБ}) = K_{\text{МШУ}} (\text{дБ}) - K_{\text{МШУ}}^0 (\text{дБ}) = G_5 (\text{дБ}) - G_5^{01} (\text{дБ}), \quad (12)$$

где $G_5 (\text{дБ})$ - показание ослабления аттенюатора 5, при котором значение вычисляемой компьютером 8 величины амплитуды равно E^{01} .

Ясно, что результаты вычисления компьютером φ_y или φ_x (в зависимости от ориентации измерительной антенны) при этой процедуре тестирования ячеек определяют разброс фазовых передаточных характеристик ячеек в режиме приема.

В результате предлагаемая методика позволяет просто осуществить проверку работоспособности узлов, входящих в элементарные приемо-передающие ячейки модуля АФАР, и тестирование на соответствие с ТЗ и с паспортными данными следующих параметров входящих узлов:

- дискреты и интервалы ослаблений, вводимых электронно-управляемыми аттенюаторами;
- дискреты и интервалы фазовых сдвигов, вводимых электронно-управляемыми фазовращателями;
- разбросы комплексных передаточных характеристик ячеек как в режиме передачи сигнала, так и в режиме его приема;

- поляризационные характеристики волн, излучаемых элементарными ячейками.

Предметное описание стенда тестирования, анализ погрешностей и экспериментальные результаты тестирования модулей АФАР будут приведены в Сообщении 2 данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн / Под ред. **Г.А.Ерохина**. - М.: Радио и связь, 1996.-352 с.
2. **Edwards T.C., Steer M.B.** Foundations of interconnect and microstrip design, Third edition, Hardcover, 2000.
3. **Фрадин А.З., Рыжков Е.В.** Измерения параметров антенно-фидерных устройств.- М.: Связь, 1972.-352с.
4. **Эйрамджян С.Г., Оганесян А.А., Саакян Г.Б.** Разработка и испытание миниатюрных амплифазометров для измерительных систем // Труды 5-й Международной конференции по компьютерным наукам и информационным технологиям (CSIT-2005).- Ереван: Изд. НАН РА, 2005. – С. 624 – 627.
5. **Драбкин А.Л., Зуенко В.Л., Кислов А.Г.** Антенно-фидерные устройства. - М.: Сов.радио, 1974. – 536 с.
6. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Под ред. **Н.М. Цейтлина**. – М.: Радио и связь, 1985. – 368с.

АОЗТ “ЕрНИИСС”. Материал поступил в редакцию 27.09.2006.

**Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Մ.Վ. ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ,
Ս.Գ. ԷՅՐԱՄՅԱՆ**

**ԱԿՏԻՎ ՓՈՒԼԱՎՈՐՎԱԾ ԱՆՏԵՆԱՑԻՆ ՑԱՆՑԻ ՄՈՂՈՒԼՆԵՐԻ ԹԵՍԹԱՎՈՐՈՒՄԸ
Հաղորդում 1. Թեստավորման եղանակ**

Առաջարկվում է ակտիվ փուլավորված անտենային ցանցի (ԱՓԱՑ) մոդուլների թեստավորման եղանակ: Մոդուլը բաղկացած է չորս տարրական ընդունող-հաղորդող բջիջներից, որոնցից յուրաքանչյուրը պարունակում է էլեկտրոնային դեկավարվող մարիչ և փուլաշրջիչ, հզորության ուժեղարարներ, սակավադմկող ուժեղարարներ և ճառագայթիչ, որոնց պարամետրերը բավականին պարզ թեստավորվում են առաջարկվող եղանակով:

Առանցքային բառեր. ակտիվ փուլավորված անտենային ցանց, ընունող-հաղորդող բջիջ, թեստավորման եղանակ:

**V.H. AVETISSYAN, M.V. MARKOSYAN, A.A. HOVHANNISYAN,
S.G. EYRAMJYAN**

**ACTIVE PHASED ARRAY MODULE TESTING
Report 1. Testing methodology**

The methodology of active phased array module testing is suggested. The module consists of four elementary receiving-transmitting cells, each of which contains an electronically controlled attenuator and phase shifter, power amplifiers, low-noise amplifiers and radiator, parameters of which are tested sufficiently simply by the suggested methodology.

Keywords: active phased array, receiving-transmitting cell, testing methodology.

А.А. ТЕРЗЯН, Г.С. СУКИАСЯН, А.Е. ПАРОНИКЯН

ОБ УГЛАХ ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКИ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Исследована зависимость сходимости процесса последовательных приближений от геометрических параметров дискретизационной сетки при решении нелинейных полевых задач методом конечных элементов. Даны оценки критических значений параметров, при превышении которых задача расходится.

Ключевые слова: электромагнитное поле, метод конечных элементов, критические значения геометрических параметров расчетной сетки.

Введение. Точность вычислительного алгоритма и сходимость процесса последовательных приближений при решении нелинейных полевых задач методом конечных элементов в значительной степени зависят от конфигурации расчетной сетки, дискретизирующей исследуемую непрерывную область. В этой связи в последние годы появился ряд работ, посвященных методам построения расчетных сеток [1-5]. Задача построения оптимальной сетки становится особенно актуальной при адаптивной сетке, когда осуществляется автоматическая динамическая декомпозиция элементов дискретизации в процессе решения краевой задачи (см. [6]).

Накопленный опыт свидетельствует, что при численном решении краевых задач наличие в расчетной сетке тупоугольных треугольников отрицательно сказывается на сходимости процесса решения. В настоящей работе дано строгое математическое обоснование этого явления и приведены оценки критического значения угла, при превышении которого задача расходится.

Численный расчет магнитного поля методом конечных элементов. Постоянное магнитное поле, созданное электрическим током, подчиняется уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \delta,$$

где A – векторный магнитный потенциал; δ – плотность тока; v – величина, обратная магнитной проницаемости.

Численный расчет двумерного магнитного поля методом конечных элементов сводится к решению системы уравнений

$$\sum_e \left(v_e \sum_{i=1}^K A_i \beta_{ij}^e - \frac{\delta_e \Lambda_e}{3} \right) = 0, \quad j=1,2,\dots,N, \quad (1)$$

где A_i - значение потенциала A в узле i ; v_e - значение v внутри элемента e ; δ_e - значение δ внутри e ; Δ_e - площадь треугольника e ; β_{ij}^e - коэффициент взаимодействия вершин i и j в элементе e ; N - число некраевых узлов.

В (1) внешнее суммирование осуществляется по всем элементам e , содержащим узел j , а внутреннее суммирование - по всем узлам i , содержащимся в элементе e (K - число таких узлов).

В случае сетки из плоских треугольных элементов коэффициент β_{ij} по вершинам i, j, m треугольника e имеет следующий вид (здесь $K=3$):

$$\begin{cases} \beta_{ii}^e = \frac{1}{4\Delta_e} [(y_j - y_m)^2 + (x_j - x_m)^2], \\ \beta_{ij}^e = \frac{1}{4\Delta_e} [(y_j - y_m)(y_m - y_i) + (x_j - x_m)(x_m - x_i)] \end{cases} \quad (2)$$

где (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , (x_m, y_m) - декартовы координаты узлов i, j, m соответственно.

Заметим, что для каждого узла j в (1) принимают участие только непосредственные соседи узла j . Таким образом, получается система уравнений с неизвестными A_i , причем количество уравнений равно количеству неизвестных и количеству некраевых узлов.

Принцип доминирования диагонали. Рассмотрим систему линейных уравнений относительно неизвестных $A_1, \dots, A_N$ с матрицей коэффициентов (c_{ij}) :

$$\sum_{i=1}^N c_{ij} A_i = d_j, \quad j=1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

Хорошо известен (см. [7], стр. 494) достаточный признак сходимости итерационного процесса решения системы (3), называемый принципом доминирования диагонали: если диагональные элементы c_{jj} существенно превосходят недиагональные, то итерационный процесс решения системы (3) сходится. Рассмотрим разности

$$g_j = |c_{jj}| - \sum_{i \neq j}^N |c_{ij}|, \quad j=1, 2, \dots, N.$$

В соответствии с принципом доминирования диагонали, если для всех j величины g_j положительны, то итерационный процесс решения системы линейных уравнений (3) обязательно сходится при любом начальном приближении. В качестве критерия сходимости обычно используется понятие невязки.

Под невязкой понимается максимальная разность двух последовательных приближений к решению. Если невязка стремится к нулю,

то процесс решения системы линейных уравнений сходится; если невязка стремится к бесконечности, то процесс решения расходится; если же невязка не имеет предела, то процесс колеблется. Если величины g_j равны нулю или отрицательны, то в зависимости от начального приближения могут иметь место все три случая (сходимость, расходимость, колебательный процесс). При этом чем меньше величины g_j , тем сходимость менее вероятна. И, наконец, при очень малых диагональных элементах процесс расходится.

Можно сформулировать следующий признак расходимости: если для всех j существует номер i такой, что

$$|c_{ji}| < |c_{ij}|, \quad j=1,2,\dots,N,$$

то итерационный процесс решения системы (3) расходится.

Основные результаты. Путем несложных преобразований коэффициентов (2) получаем

$$\beta_{jj}^e = \frac{1}{4\Delta_e} b^2, \quad \beta_{ij}^e = -\frac{1}{2} \operatorname{ctg} \beta_m, \quad (4)$$

где b - длина стороны с вершинами i, m ; β_m - угол при вершине m (рис. 1). Но длина отрезка, величина угла и площадь треугольника не зависят от выбора декартовой системы координат. Отсюда следует, что система уравнений, получающаяся при численном расчете двумерного магнитного поля (1) методом конечных элементов, не зависит от выбора декартовой системы координат.

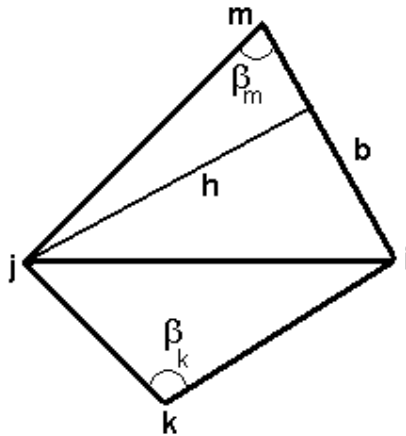


Рис. 1

Заметим, что данное утверждение неочевидно, так как коэффициенты (2) формально зависят от координат (x,y) вершин треугольника, а те, в свою очередь, от положения начала координат и направления осей.

Теперь вычислим коэффициенты получающейся матрицы (с_{ij}). Из (1), (3) и (4) получаем

$$c_{jj} = \sum_e v_e \beta_{jj}^e = \sum_e v_e \frac{b_e^2}{4\Delta_e},$$

где суммирование осуществляется по всем элементам e, содержащим узел j; b_e – длина стороны треугольника e, лежащей против вершины j; Δ_e – площадь треугольника e.

Рассмотрим два произвольных соседних узла j и i сетки. Пусть их соединяющий отрезок лежит на границе элементов e'=(j,i,m) и e''=(j,i,k). Из (1), (3) и (4) следует

$$c_{ij} = v_{e'} \beta_{ij}^{e'} + v_{e''} \beta_{ij}^{e''} = -\frac{1}{2}(v_{e'} \operatorname{ctg} \beta_m + v_{e''} \operatorname{ctg} \beta_k). \quad (5)$$

С помощью элементарных тригонометрических преобразований получаем

$$\operatorname{ctg} \beta_m + \operatorname{ctg} \beta_k = \frac{b_e^2}{2\Delta_e}.$$

В силу (5) отсюда следует, что для любой конфигурации треугольной сетки и любом распределении магнитной проницаемости имеет место

$$\sum_{i=1}^N c_{ij} = 0, \quad j=1,2,\dots,N.$$

Следовательно, на каждой строке матрицы диагональный элемент равен сумме недиагональных элементов данной строки, взятых с противоположным знаком, т.е.

$$c_{jj} = -\sum_{i \neq j}^N c_{ij}, \quad j=1,2,\dots,N. \quad (6)$$

Если в треугольной сетке нет ни одного тупоугольного треугольника, то в (5) все котангенсы будут неотрицательными. Следовательно, все недиагональные элементы отрицательны (или равны нулю). Для слагаемых, имеющих одинаковый знак, имеет место тождество

(7)

$$\left| \sum_{i \neq j}^N c_{ij} \right| = \sum_{i \neq j}^N |c_{ij}|, \quad j=1,2,\dots,N.$$

Отсюда в силу (6) следует, что все g_i равны нулю. Следовательно, если в треугольной сетке, используемой при численном расчете двумерного магнитного поля (1) методом конечных элементов, нет ни одного тупоугольного треугольника, то все величины g_i равны нулю, то есть при подходящем выборе начального приближения итерационный процесс сходится.

Совсем иная картина получается в случае наличия тупоугольных треугольников. Если узел j является вершиной острого угла тупоугольного треугольника, т.е. в (5) угол β_m тупой, то $\text{ctg } \beta_m < 0$, и соответствующий недиагональный элемент может стать положительным, тогда как основная масса недиагональных элементов неположительна. Однако для слагаемых, имеющих разные знаки, тождество (7) заменяется неравенством

$$\left| \sum_{i \neq j}^N c_{ij} \right| < \sum_{i \neq j}^N |c_{ij}|, \quad j=1,2,\dots,N.$$

Следовательно, для таких узлов j имеем $g_j < 0$ и доминирования диагонали не происходит. Оценим, при каких углах происходит доминирование недиагональных элементов и задача обязательно расходится, т.е. когда имеет место $|c_{jj}| < |c_{ij}|$. Пренебрегая влиянием магнитной проницаемости, т.е. считая значение v вокруг узла j приблизительно одинаковым, получим условие

$$c_{jj} = \sum_e \frac{b_e^2}{4\Delta_e} < \frac{1}{2} \text{ctg } \beta.$$

Обозначим через h_e высоту, проведенную к стороне b_e треугольника e (рис. 1). Тогда $2\Delta_e = h_e b_e$, и условие доминирования недиагональных элементов примет вид

$$\text{ctg } \beta > \sum_e \frac{b_e}{2h_e}.$$

Последнюю сумму можно оценить как периметр окружности, описанной вокруг узла, деленный на ее диагональ, т.е. числом π . Следовательно, задача расходится, когда $\text{ctg } \beta > \pi$ или $\beta < 12^\circ$. Такие углы обязательно появятся, если в сетке присутствует треугольник с тупым углом большим, чем 156° .

Следовательно, если в треугольной сетке, используемой при численном расчете двумерного магнитного поля (1) методом конечных элементов, есть треугольники с тупым углом большим, чем 156° , то, независимо от начального приближения, итерационный процесс расходится.

Заметим, что полученные результаты относятся к системе уравнений с постоянными коэффициентами. Вместе с тем при численном решении полевой нелинейной задачи методом конечных элементов возникает система уравнений с переменными коэффициентами, зависящими от магнитной проницаемости. Данное обстоятельство также влияет на процесс сходимости решения. Вышеприведенные оценки получены без учета влияния пересчета ν после каждой итерации.

Численный эксперимент. Полученные результаты опробованы на задаче численного определения магнитного поля в области, представленной на рис. 2.

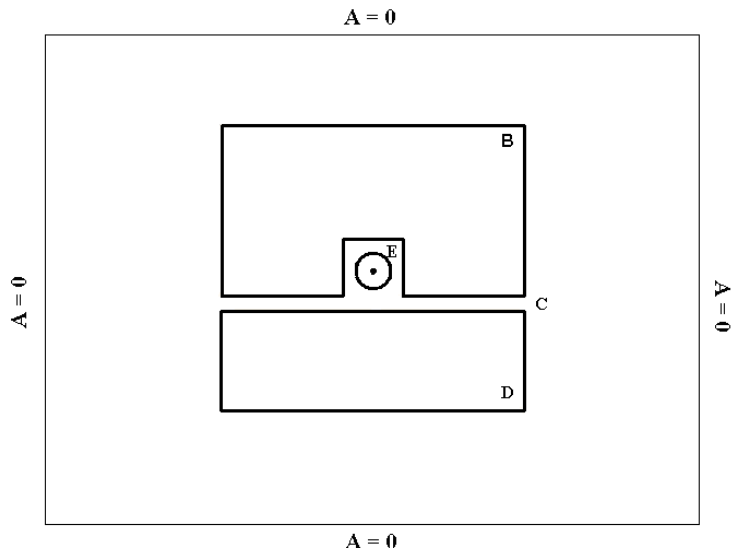


Рис. 2

На рисунке показано электромагнитное устройство с ферромагнитными участками B и D, разделенными воздушным зазором C. Устройство содержит обмотку E, обтекаемую током. Для решения задачи рассмотрена конечная область, на границах которой приняты нулевые значения потенциалов ($A=0$).

На рис. 3а представлена расчетная сетка, где отсутствуют тупоугольные треугольники. Как видно из рис 3б, процесс решения задачи сходится достаточно успешно.

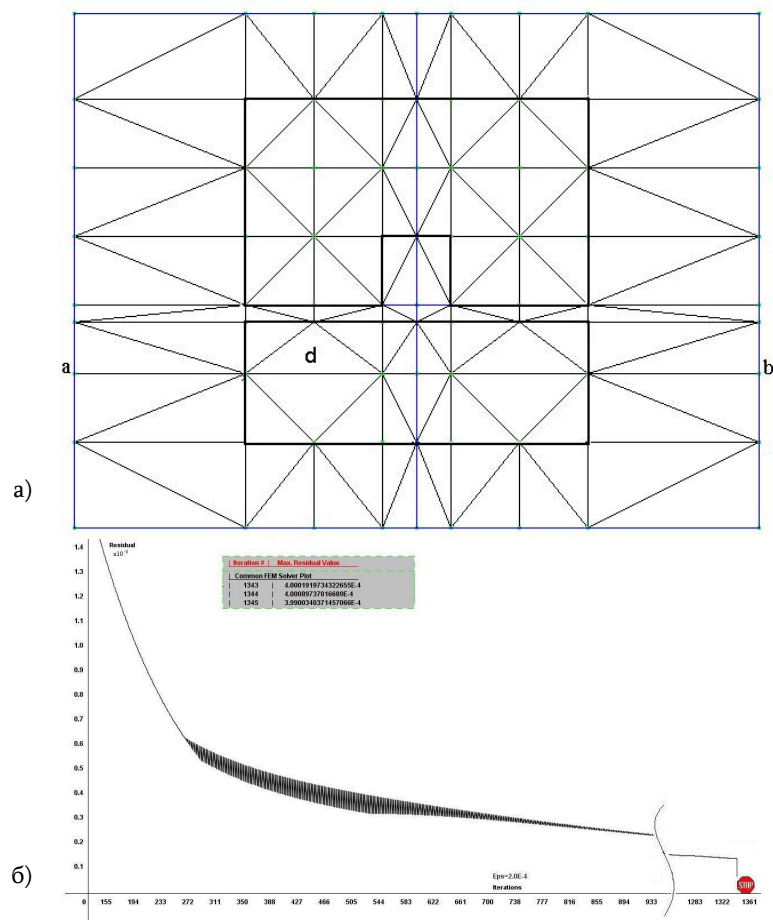


Рис. 3

С изменением положения линии ab (рис. 4а) в расчетной сетке образуются два симметричных тупоугольных треугольника d с тупым углом, равным 148° . Это обстоятельство приводит к заметному осложнению процесса сходимости. Если в случае расчетной сетки, представленной на рис. 3 а, процесс решения сходится за 1345 итераций, то во втором случае (рис. 4а) количество итерации возрастает до 2998 (рис. 4б).

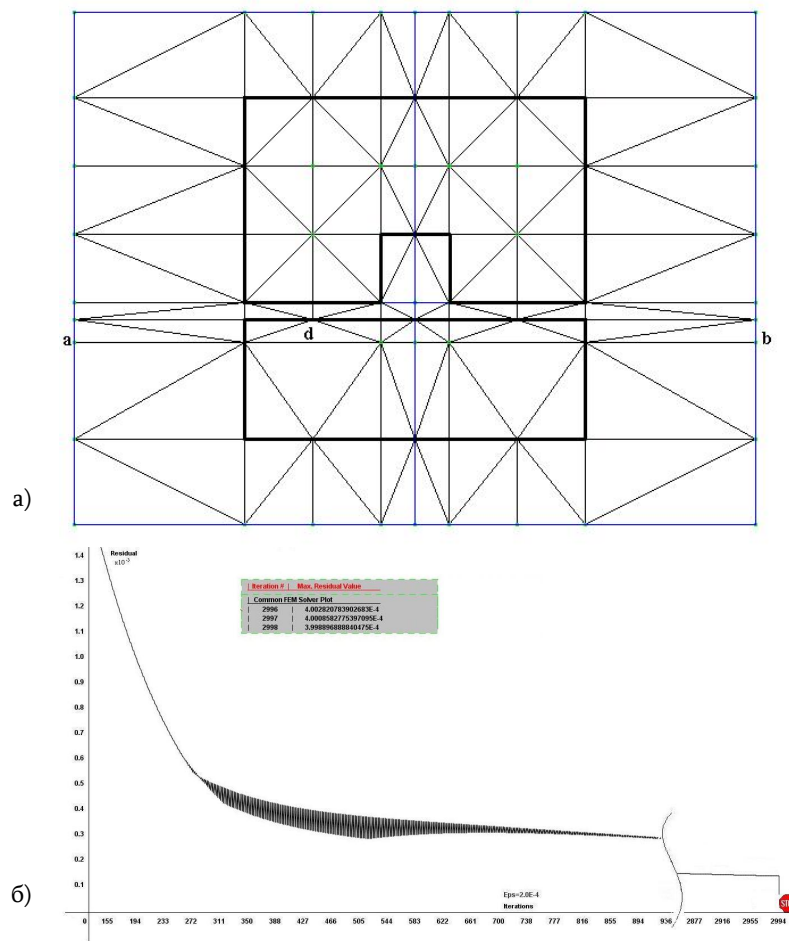


Рис. 4

С появлением же в расчетной сетке тупоугольного треугольника (двух симметричных тупоугольных треугольников d) с критическим углом 156° (рис. 5а) процесс решения задачи расходится (рис. 5б).

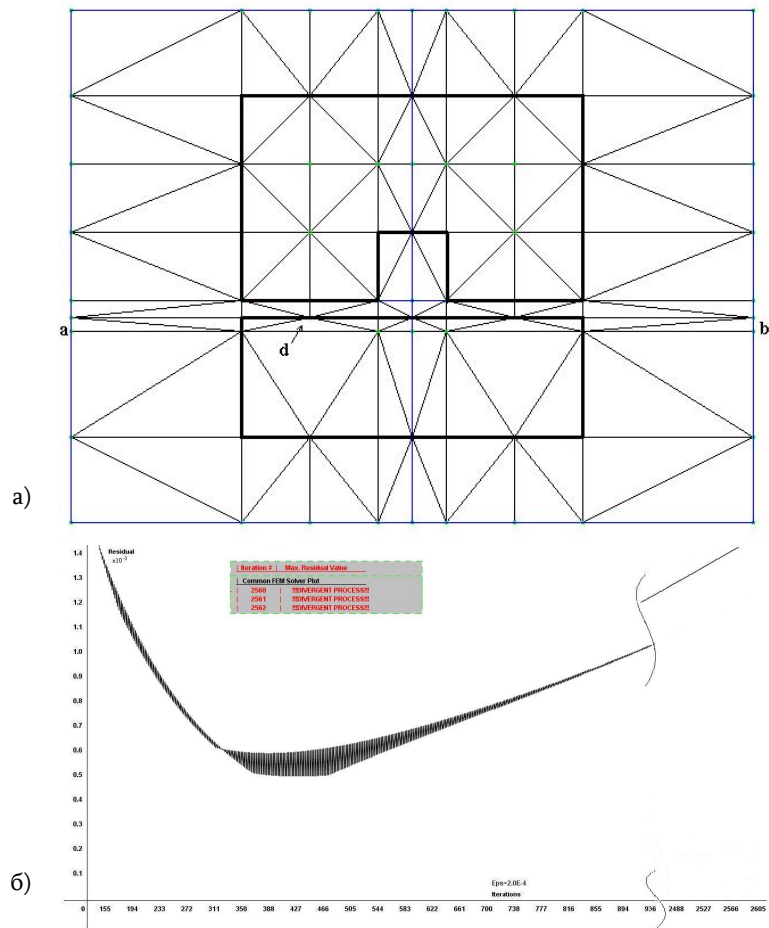


Рис. 5

На рис. 3б, 4б, 5б затемненные участки процесса изменения невязки отражают колебательный процесс, связанный с пересчетом магнитной проницаемости ν (в зоне чувствительных изменений) ν после каждой итерации.

Таким образом, полученные результаты численного эксперимента подтверждают вывод о том, что в треугольной сетке, используемой при численном расчете двумерного магнитного поля методом конечных элементов, наибольший угол в треугольных элементах не должен превышать критического значения 156° .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ruppert J.** A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation. NASA Ames Research Center //Submission to Journal of Algorithms.- 1994.
2. **Иваненко С.А.** Адаптивные криволинейные сетки в методе конечных элементов //Ж. вычисл. матем. и матем. физ.- 1995.- Т. 35, № 11.- С. 1334 – 1355.
3. **Лисейкин В.Д.** Обзор методов построения адаптивных сеток //Ж. вычисл. матем. и матем. физ.- 1996.- Т. 36, № 1.- С. 3 – 41.
4. **Скворцов А.В.** Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Издательство ТУ, 2002. – 128 с.
5. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е.** О расчете магнитных полей методом конечных элементов с динамической композицией элементов дискретизации //Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2005. - Т. 58, № 2. – С. 332-339.
6. **Терзян А.А., Сукиасян Г.С., Пароникян А.Е.** Об оптимизации сетки для расчета магнитных полей методом конечных элементов //Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2005. - Т. 58, № 3. – С. 570-578.
7. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике.- М.: Наука, 1986.- 544с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 19.05.2007.

ՀԱ. ԹԵՐԶՅԱՆ, ՀՍ ՍՈՒԳԻԱՍՅԱՆ, Ա. Ե. ՊԱՐՈՆԻԿՅԱՆ

ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐՐԵՐԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՀԱՄԱՐ ԵՌԱՆԿՑՈՒՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ԱՆԿՑՈՒՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Վերջավոր տարրերի մեթոդով ոչ գծային դաշտային խնդիրների լուծման դեպքում հետազոտված է հաջորդական մոտեցումների գործընթացի զուգամիտման կախվածությունը ընդհատավորման ցանցի երկրաչափական պարամետրերից: Տրված են պարամետրերի կրիտիկական արժեքների գնահատականները, որոնց գերազանցելու դեպքում խնդիրը չի զուգամիտում:

Առանցքային բաներ. Էլեկտրամագնիսական դաշտ, վերջավոր տարրերի մեթոդ, հաշվարկային ցանցի երկրաչափական պարամետրերի կրիտիկական արժեքներ:

H.A. TERZIAN, H.S. SOUKIASYAN, A.E. PARONIKYAN

ON TRIANGULAR MESH ANGLES BUILT FOR FINITE-ELEMENT SOLUTION OF MAGNETIC FIELD PROBLEMS

Convergence dependence of consecutive approach process on geometrical parametres of a finite-element mesh is investigated. Estimations of critical parametres values at which the excess of the problem disperses at the solution of nonlinear field problems by the finite-element method are given.

Keywords: electromagnetic field, finite-element method, critical values of geometrical parametres, finite of the element mesh.

С.О. СИМОНЯН, А.Г. АВЕТИСЯН, О.С. КУЧАТЯН

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ НАБЛЮДАЕМОСТИ ЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Предложен эффективный метод определения элементов матрицы усиления наблюдающего устройства полного порядка в линейных нестационарных системах управления на основе дифференциальных преобразований Г.Е. Пухова.

Ключевые слова: линейные нестационарные системы управления, наблюдающее устройство, ошибка оценивания, дифференциальные преобразования.

На рис.1 изображена структурная схема линейной нестационарной системы управления (ОУ-объект управления, а НУ- наблюдающее устройство), движение которой описывается соотношениями [1, 2]

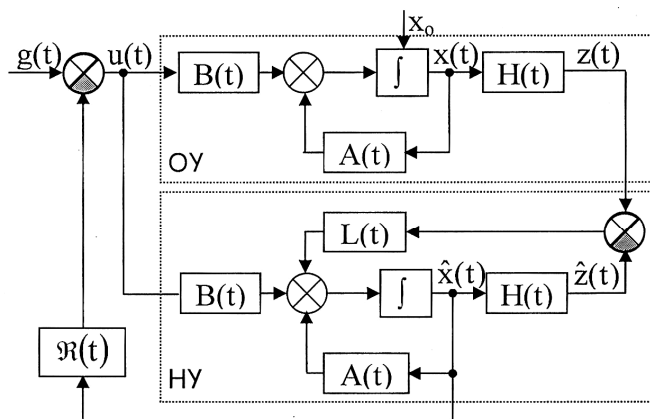


Рис.1. Структурная схема линейной нестационарной системы с наблюдателем полного порядка

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(t) \cdot X(t) + B(t) \cdot U(t), & X(t_0) = fix, & (1) \\ \dot{\hat{X}}(t) = A(t) \cdot \hat{X}(t) + B(t) \cdot U(t) + L(t) \cdot H(t) \cdot (X(t) - \hat{X}(t)), & (2) \\ U(t) = -R(t) \cdot \hat{X}(t), & (3) \end{cases}$$

где $X(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$ – вектор переменных состояния, причем $X(t_0)$ – вектор начальных условий; $A(t) = (a_{ij}(t))$, $i, j = \overline{1, n}$ – матрица переменных состояния системы; $B(t) = (b_{j,k}(t))$, $j = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, r}$ – матрица управляющих переменных $U(t) = (u_1(t), \dots, u_r(t))^T$, причем $r \leq n$; $\hat{X}(t) = (\hat{x}_1(t), \dots, \hat{x}_n(t))^T$ – оценка вектора $X(t)$; $L(t) = (l_{ij}(t))$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, p}$ – матрица коэффициентов усиления сигналов ошибок, вводимых на вход наблюдателя; $H(t) = (h_{jk}(t))$, $j = \overline{1, p}$, $k = \overline{1, n}$ – матрица выходных переменных $Z(t) = (z_1(t), \dots, z_n(t))^T$; $\mathfrak{R}(t) = (\mathfrak{R}_{k,i}(t))$, $k = \overline{1, r}$, $i = \overline{1, n}$ – матрица усиления обратной связи.

Введем ошибку оценивания:

$$E(t) = X(t) - \hat{X}(t). \quad (4)$$

Подставив $\hat{X}(t)$ из (4) в (3), получим

$$U(t) = -\mathfrak{R}(t) \cdot (X(t) - E(t)). \quad (5)$$

Далее из (1) с учетом (5) имеем

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A(t) \cdot X(t) - B(t) \cdot \mathfrak{R}(t) \cdot (X(t) - E(t)) = \\ &= [A(t) - B(t) \cdot \mathfrak{R}(t)] \cdot X(t) + B(t) \cdot \mathfrak{R}(t) \cdot E(t), \quad X(t_0) = \text{fix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Выполнив дифференцирование (4) и подставляя (1) и (2) в полученное выражение, получим

$$\begin{aligned} \dot{E}(t) &= \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t) = A(t) \cdot (X(t) - \hat{X}(t)) - L(t) \cdot H(t) \cdot (X(t) - \hat{X}(t)) = \\ &= A(t) \cdot E(t) - L(t) \cdot H(t) \cdot E(t) = [A(t) - L(t) \cdot H(t)] \cdot E(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Конечный результат соотношений (6) и (7) представим следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = [A(t) - B(t) \cdot \mathfrak{R}(t)] \cdot X(t) + B(t) \cdot \mathfrak{R}(t) \cdot E(t), & X(t_0) = \text{fix}, \\ \dot{E}(t) = [A(t) - L(t) \cdot H(t)] \cdot E(t). \end{cases} \quad (8)$$

Для обеспечения наблюдаемости системы матрица $L(t)$ должна выбираться так, чтобы система (7) была устойчивой, т.е. $E(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$. Тогда $\hat{X}(t) \rightarrow X(t)$ при $t \rightarrow \infty$, и, следовательно, наблюдатель (2) будет обеспечивать асимптотическое восстановление вектора состояния $X(t)$.

Характеристический полином системы (8) будет иметь вид

$$N(s) = N_y(s) \cdot N_H(s),$$

где $N_y(s) = \det[sI - A(t) + B(t) \cdot \mathcal{R}(t)]$ – характеристический полином объекта управления, а $N_H(s) = \det[sI - A(t) + L(t) \cdot H(t)]$ – характеристический полином наблюдающего устройства.

Таким образом, расчет матриц $\mathcal{R}(t)$ и $L(t)$ может выполняться раздельно, независимо друг от друга, за исключением этапа, связанного с назначением корней наблюдателя. Сначала вычисляется матрица $\mathcal{R}(t)$ [3], затем рассчитывается матрица $L(t)$ так, чтобы обеспечить заданные корни полинома $N_H(s)$. При этом корни $N_H(s)$ должны быть расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости корней и находиться левее корней $N_y(s)$ для увеличения скорости оценивания.

После определения элементов матрицы $\mathcal{R}(t)$ на основе дифференциальных преобразований в соответствии с [3] перейдем к решению второй части задачи, а именно, к определению элементов матрицы $L(t)$ [2].

Потребуем, чтобы выполнялось следующее условие:

$$A(t) - L(t) \cdot H(t) = v(t) = \text{diag}(v_i(t)), \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где $v_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ – заранее заданные собственные значения наблюдающего устройства, которые определяют качественные характеристики последнего. При этом $v_i(t) < 0$, $|v_i(t)| > |\mu_j(t)|$, $\forall i, j = \overline{1, n}$ (здесь $\mu_j(t)$, $j = \overline{1, n}$ – корни полинома $N_y(s)$ и задаются заранее), а $v(t)$ – диагональная матрица с элементами $v_i(t)$, $i = \overline{1, n}$.

Предположив, что все элементы матриц $A(t)$, $L(t)$, $H(t)$ и $v(t)$ имеют частные производные бесконечного порядка ($K = \overline{0, \infty}$), переведем систему (9) из области оригиналов в область дифференциальных изображений при центре аппроксимации $t = t_v$ [4]. При этом имеем

$$A(K) - \sum_{m=0}^K L(m) \cdot H(K - m) = v(K), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad (10)$$

откуда

$$A(K) - \sum_{m=0}^{K-1} L(m) \cdot H(K - m) - L(K) \cdot H(0) = v(K), \quad K = \overline{0, \infty}$$

или

$$L(K) \cdot H(0) = -v(K) + A(K) - \sum_{m=0}^{K-1} L(m) \cdot H(K-m), \quad K = \overline{0, \infty}. \quad (11)$$

Здесь возможны следующие случаи:

1. Если

$$p = n, \quad \text{rang } H(0) = n \Leftrightarrow \exists H^{-1}(0),$$

то

$$L(K) = \left[-v(K) + A(K) - \sum_{m=0}^{K-1} L(m) \cdot H(K-m) \right] \cdot H^{-1}(0). \quad (12)$$

2. Если

$$\left. \begin{array}{l} a) \quad p = n, \quad \text{rang } H(0) < n \Leftrightarrow \nexists H^{-1}(0), \exists H^{+}(0) \\ b) \quad p \neq n \end{array} \right\} \Leftrightarrow \exists H^{+}(0), \quad H(0)^+ \cdot H(0) = E,$$

то

$$L(K) = \left[-v(K) + A(K) - \sum_{m=0}^{K-1} L(m) \cdot H(K-m) \right] \cdot H^{+}(0). \quad (13)$$

3. Если

$$\left. \begin{array}{l} a) \quad p = n, \quad \text{rang } H(0) < n \Leftrightarrow \nexists H^{-1}(0), \exists H^{+}(0) \\ b) \quad p \neq n \end{array} \right\} \Leftrightarrow \exists H^{+}(0), \quad H(0)^+ \cdot H(0) \neq E,$$

то

$$L(K) = \left[-v(K) + A(K) - \sum_{m=0}^{K-1} L(m) \cdot H(K-m) \right] \cdot H^{+}(0) + \\ + [E - H^{+}(0) \cdot H(0)] \cdot Y(K), \quad (14)$$

где $Y(K)$ – произвольная матрица порядка $n \times p$ [5].

Таким образом, имея матричные дискретные $L(K)$, $K = \overline{0, \infty}$, легко можно восстановить матрицу $L(t)$ по какому-нибудь обратному дифференциальному преобразованию [4].

Пример. Пусть

$$A(t) = \begin{bmatrix} t^2 & -t+1 & 1 \\ t+1 & t & t^2 \\ 0 & 1 & t \end{bmatrix}, \quad B(t) = H(t) = \begin{bmatrix} t^2 & t & t+1 \\ t & t-1 & 0 \\ 1 & 0 & t \end{bmatrix},$$

$$e_1(t_0) = 7, \quad e_2(t_0) = -1, \quad e_3(t_0) = 4,$$

$$x_1(t_0) = 2, \quad x_2(t_0) = 5, \quad x_3(t_0) = -3, \quad t_0 = 0.$$

Аналитическое решение. Можно убедиться, что

$$B^{-1}(t) = B^{-1}(t) = \Delta^{-1} \begin{bmatrix} t(t-1) & -t^2 & 1-t^2 \\ -t^2 & t^3-t-1 & t(t+1) \\ 1-t & t & t^2(t-2) \end{bmatrix}.$$

Тогда, в частности, при выборе матрицы $\mu(t) = \text{diag}(-1-t-t^2)$,
 $\mu_i(t) = -1-t-t^2 < 0$, $i = \overline{1,3}$, $\forall t \in (-\infty, +\infty)$, $v(t) = \text{diag}(-3-t-t^2)$, $v_i(t) =$
 $= -3-t-t^2 < \mu_j(t)$, $i, j = \overline{1,3}$, $\forall t \in (-\infty, +\infty)$ матрица усиления обратной связи имеет вид

$$\mathcal{R}(t) = \Delta^{-1} \begin{bmatrix} t(2t^3-2t^2-t-1) & -t^4-3t^3-t+1 & -2t^4-2t^3+t^2+t+1 \\ -t^4-2t^2-2t-1 & t^5+2t^4+t^3-3t^2-2t-1 & t(t^4+t^3+2t^2+t+1) \\ -2t^3+2t^2+t+1 & 2t^3+t^2-t+1 & t^5-2t^3-2t^2-t+1 \end{bmatrix},$$

а матрица наблюдения:

$$L(t) = \Delta^{-1} \begin{bmatrix} (t-1)(2t^3+2t^2+3t-1) & -3t^4-2t^2+t-1 & -2t^4-t^3-3t^2+2t+3 \\ -t^4-2t^3-2t^2-t & t^5+2t^4+2t^3-4t^2-5t-3 & t^5-t^4+2t^3+4t^2+4t+1 \\ -t^3-2t^2-t+3 & 2t^3+2t^2+2t-1 & t(t^4-t^2-5t+1) \end{bmatrix},$$

где $\Delta = t^4 - 2t^3 - t^2 + 1 = (t - 0,7213) \cdot (t - 2,3486) \cdot (t + 0,5349 - j \cdot 0,5515) \times$
 $\times (t + 0,5349 + j \cdot 0,5515)$. При этом аналитическое решение задачи следующее:

$$e_1(t) = 7 \cdot \exp N(t), \quad e_2(t) = -\exp N(t), \quad e_3(t) = 4 \cdot \exp N(t),$$

$$x_1(t) = \left(-\exp(-2t) \left(7t^2 + 11t + \frac{21}{2} \right) + \frac{25}{2} \right) \cdot \exp M(t),$$

$$x_2(t) = \left(-\exp(-2t) \left(\frac{3}{2}t^2 + 4t + 5 \right) + 10 \right) \cdot \exp M(t),$$

$$x_3(t) = \left(-\exp(-2t) \left(2t^2 + 6t + \frac{9}{2} \right) + \frac{3}{2} \right) \cdot \exp M(t),$$

где $M(t) = \int_0^t \mu(\tau) \cdot d\tau = -t - 1/2 \cdot t^2 - 1/3 \cdot t^3$, $N(t) = \int_0^t v(\tau) \cdot d\tau = -3t - 1/2 \cdot t^2 - 1/3 \cdot t^3$.

Решение на основе дифференциальных преобразований

Возьмем $t_v = t_0 = 0$, при котором имеем

$$B[0] = H[0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = B^{-1}[0] = H^{-1}[0],$$

а также следующие матричные дискреты (табл. 1).

Таблица 1

K	A(K) · H ^{-K}	B(K) · H ^{-K}	H(K) · H ^{-K}	μ(K) · H ^{-K}	v(K) · H ^{-K}	ℳ(K) · H ^{-K}	L(K) · H ^{-K}
0	0 1 1	0 0 1	0 0 1	-1 0 0	-3 0 0	0 1 1	1 -1 3
	1 0 0	0 -1 0	0 -1 0	0 -1 0	0 -3 0	-1 -1 0	0 -3 1
	0 1 0	1 0 0	1 0 0	0 0 -1	0 0 -3	1 1 1	3 -1 0
1	0 -1 0	0 1 1	0 1 1	-1 0 0	-1 0 0	-1 -1 1	-4 1 2
	1 1 0	1 1 0	1 1 0	0 -1 0	0 -1 0	-2 -2 1	-1 -5 4
	0 0 1	0 0 1	0 0 1	0 0 -1	0 0 -1	1 -1 -1	-1 2 1
2	1 0 0	1 0 0	1 0 0	-1 0 0	-1 0 0	-1 1 2	2 -3 0
	0 0 1	0 0 0	0 0 0	0 -1 0	0 -1 0	-3 -4 1	-2 -7 5
	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 -1	0 0 -1	3 2 -1	1 1 -5
3	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	-3 -2 1	-2 -1 7
	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	-4 -3 3	-3 -9 8
	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	1 3 -1	4 2 0

С учетом этих матричных дискрет получены численные результаты по определению $\mathfrak{R}(t)$ и $L(t)$ с применением дифференциально-маклореновских (ДМ) и дифференциально-падеевских (ДП) преобразований [6, 7], а также численные результаты аналитического решения, которые почти полностью совпадают с решением, полученным ДП-преобразованиями. При ДМ-преобразованиях, естественно, было положено $t_v = 0$, а количество используемых дискрет равно 6. При ДП-преобразованиях также $t_v = 0$, а количество используемых дискрет равно 15. Кроме того, при этом, с целью нахождения решения по возможности с большой точностью и ослабления так называемого феномена Рунге [8], степени алгебраических многочленов числителя (m) и знаменателя (n) аппроксимирующего соотношения Паде были взяты равными друг другу, и, в частности, было положено $m=n=7$. С учетом этих результатов были построены временные характеристики для всех элементов матриц $\mathfrak{R}(t)$ и $L(t)$, которые представлены на рис.1-18.

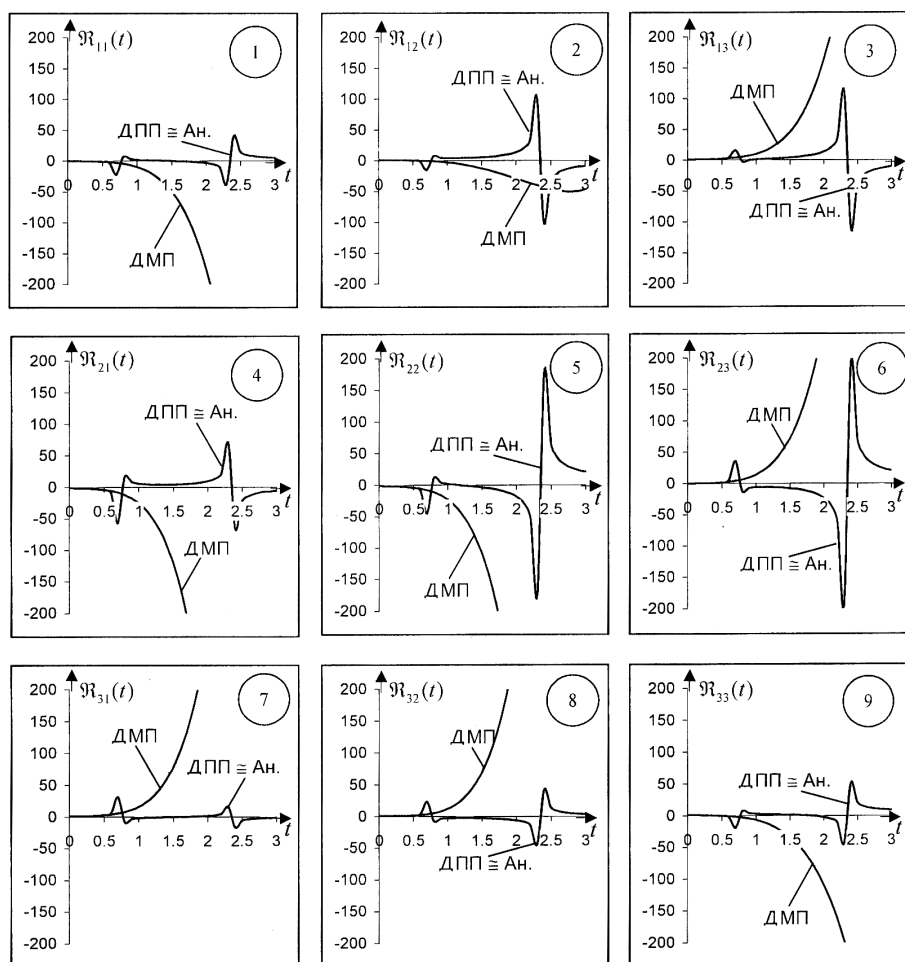


Рис.1-9. Временные характеристики элементов матрицы $\Re(t)$

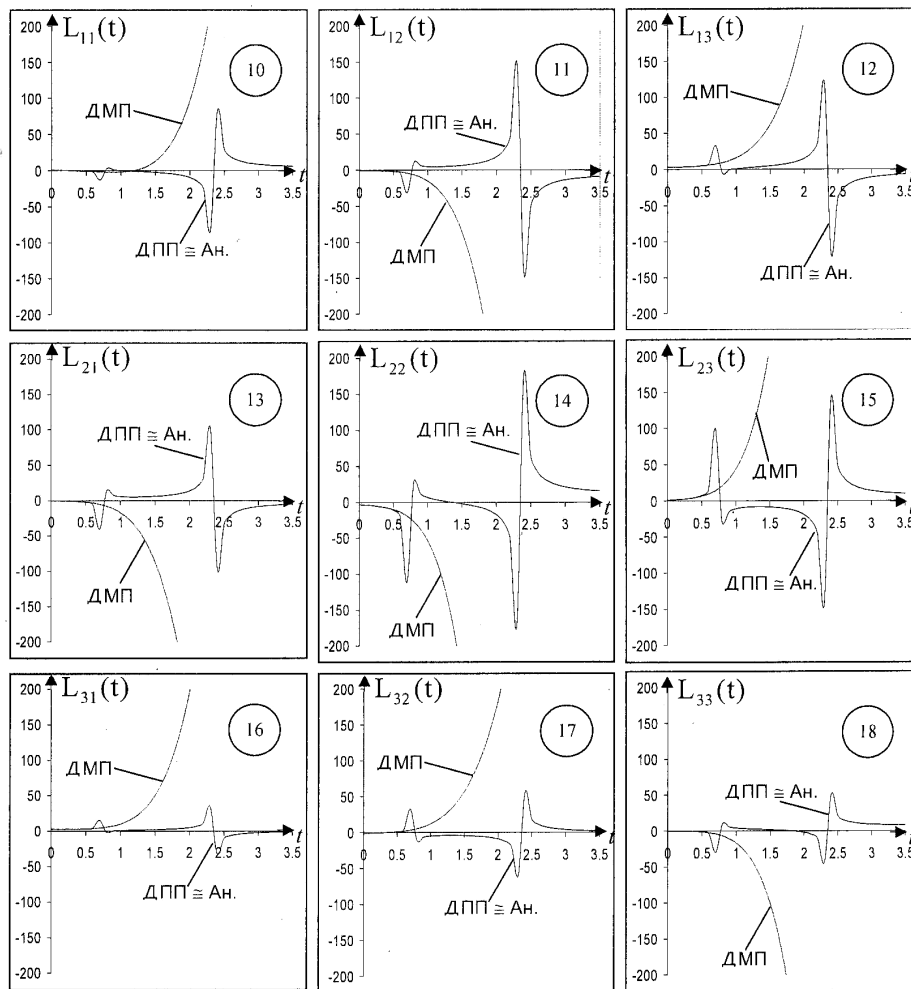


Рис.10-18. Временные характеристики элементов матрицы $L(t)$

Численные результаты аналитического решения для переменных ошибок $e_i(t)$, $i = \overline{1,3}$ и переменных состояния $x_i(t)$, $i = \overline{1,3}$, решения на основе ДДП при $\rho(t) = 0$, $q = -1$, $s = 4$ (при которых имеем табл. 2 для определения коэффициентов c_i , $i = \overline{1,4}$), а также решения на основе ДМП и ДПП представлены в табл. 3, а временные характеристики переменных $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ - на рис.19-24.

Таблица 2

c_i	E_1	E_2	E_3	X_1	X_2	X_3
c_1	-2,333	0,333	-1,333	6,667	1	5
c_2	3,499	-0,499	1,999	3,999	20,999	-14
c_3	7	-1	4	-12	-23,999	7
c_4	-1,167	0,1667	-0,667	3,333	6,999	-1

Таблица 3

t	E_1				X_1			
	ДПП	ДДП	Ан.	ДМП	ДПП	ДДП	Ан.	ДМП
0	7	7	7	7	2	2	2	2
1	0,151453	-0,05757	0,151462	0,15148	1,386279	2,457478	1,381832	1,38185
2	-0,0023	-0,23472	0,000163	29,6828	0,165506	0,946871	0,014498	7,86384
3	-0,00159	-0,10664	1,18E-09	221799,1	0,193205	0,340368	8,35E-07	218816,6
4	0,004085	-0,04152	7,84E-18	1,29E+08	0,106936	0,123373	4,15E-14	2,47E+08
5	0,006224	-0,01556	6,4E-30	1,82E+10	0,063109	0,045098	2,52E-25	5,26E+10
6	0,005617	-0,00576	8,74E-47	1,03E+12	0,046151	0,016549	2,54E-41	4,02E+12
7	0,004207	-0,00213	2,69E-69	3,15E+13	0,038159	0,006083	5,78E-63	1,54E+14
8	0,002907	-0,00078	2,54E-98	6,06E+14	0,03293	0,002237	4,03E-91	3,58E+15
9	0,001942	-0,00029	9,9E-135	8,23E+15	0,02872	0,000823	1,2E-126	5,69E+16
10	0,001287	-0,00011	2,2E-179	8,48E+16	0,025086	0,000303	1,9E-170	6,71E+17
t	E_2				X_2			
	ДПП	ДДП	Ан.	ДМП	ДПП	ДДП	Ан.	ДМП
0	-1	-1	-1	-1	5	5	5	5
1	-0,02164	0,008224	-0,02164	-0,02164	1,366541	2,143241	1,371605	1,37161
2	-0,00037	0,033531	-2,3E-05	-7,41528	0,445033	0,462822	0,012283	-36,3074
3	-0,00228	0,015234	-1,7E-10	-24702,6	0,268648	0,098922	6,77E-07	-272422
4	-0,00304	0,005931	-1,1E-18	-8080759	0,061939	0,025214	3,33E-14	-1,6E+08
5	-0,00256	0,002223	-9,1E-31	-7,3E+08	-0,02408	0,007684	2,01E-25	-2,1E+10
6	-0,00189	0,000823	-1,2E-47	-2,9E+10	-0,04624	0,002607	2,03E-41	-1,2E+12
7	-0,00136	0,000304	-3,8E-70	-6,4E+11	-0,0463	0,000929	4,63E-63	-3,6E+13
8	-0,00099	0,000112	-4E-99	-9,5E+12	-0,04028	0,000338	3,23E-91	-6,8E+14
9	-0,00073	0,000041	-1E-135	-1E+14	-0,03347	0,000124	9,3E-127	-9,1E+15
10	-0,00056	0,000015	-3E-180	-8,5E+14	-0,02742	0,000045	1,5E-170	-9,3E+16
t	E_3				X_3			
	ДПП	ДДП	Ан.	ДМП	ДПП	ДДП	Ан.	ДМП
0	4	4	4	4	-3	-3	-3	-3
1	0,086417	-0,0329	0,086549	0,08654	-0,02765	0,274897	-0,03065	-0,03064
2	0,005417	-0,13412	9,32E-05	-11,387	0,112647	0,437273	0,001338	13,64224
3	0,005695	-0,06094	6,77E-10	-57824,1	0,225042	0,215091	9,55E-08	74117,25
4	0,002951	-0,02373	4,48E-18	-2,6E+07	0,2059	0,086925	4,94E-15	32653235
5	0,001332	-0,00889	3,66E-30	-3,1E+09	0,156593	0,033056	3,01E-26	3,67E+09
6	0,000605	-0,00329	4,99E-47	-1,5E+11	0,115181	0,012308	3,05E-42	1,73E+11
7	0,000286	-0,00121	1,54E-69	-3,9E+12	0,085312	0,004548	6,94E-64	4,52E+12
8	0,000142	-0,00045	1,45E-98	-6,8E+13	0,064312	0,001676	4,84E-92	7,61E+13
9	0,000074	-0,00017	5,7E-135	-8,2E+14	0,049433	0,000617	1,4E-127	9,17E+14
10	0,00004	-6,1E-05	1,2E-179	-7,7E+15	0,038707	0,000227	2,3E-171	8,5E+15

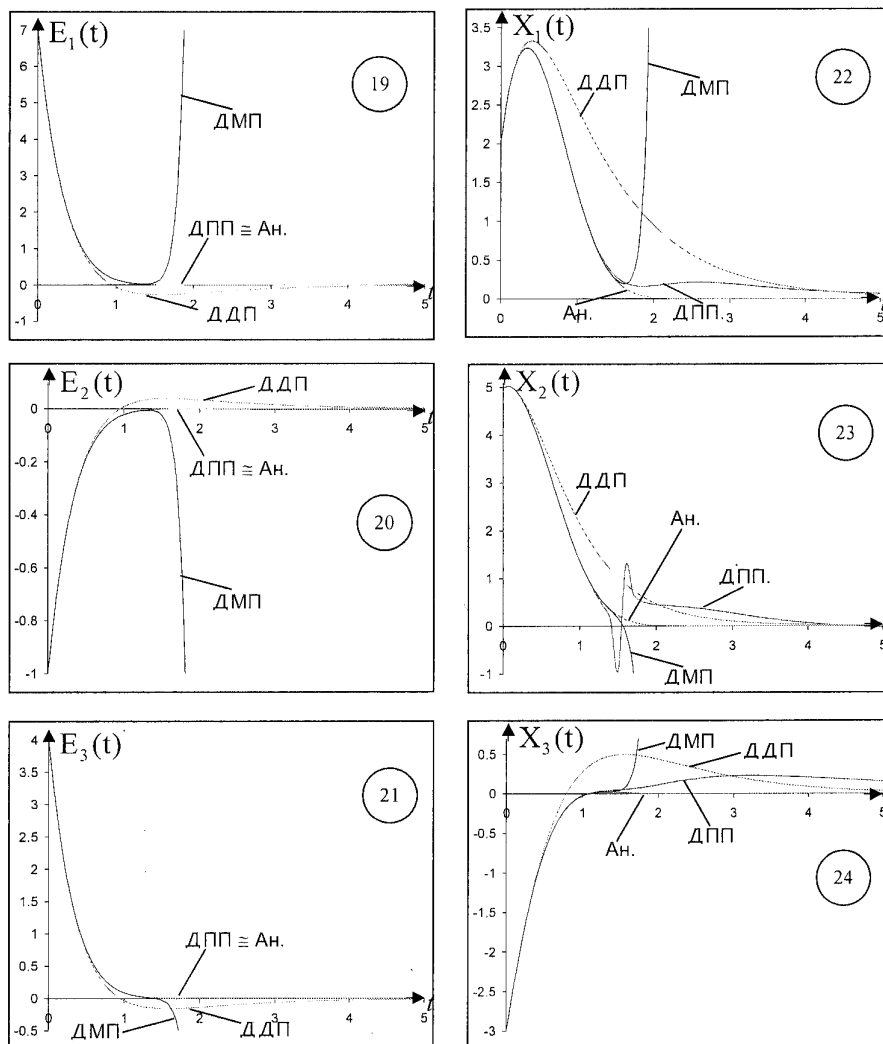


Рис.19-24. Временные характеристики элементов векторов $E(t)$ и $X(t)$

Высокая степень совпадения результатов аналитических решений задачи с результатами решений на основе предложенного метода говорит о высокой эффективности последнего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория автоматического управления / Под ред. В.Б. Яковлева - М.: Высшая школа, 2003.-567с.
2. Միսինյան Ս.Հ., Ավետիսյան Ա.Գ., Կուչատյան Օ.Ս. Գծային ոչ ավտոնոմ կառավարման համակարգերի դիտելիության պարզաբանման վերաբերյալ // ՀՊՃՀ տարեկան գիտաժողովի նյութեր. Հատոր 1.- 2006.- էջ 400-402:
3. Симонян С.О., Аветисян А.Г., Меликян А.В., Кучатян О.С. Стабилизация движений линейных нестационарных систем управления на основе дифференциальных преобразований (общий случай) // Вестник ГИУА. Серия “Моделирование, оптимизация, управление”.- Ереван, 2006.-Вып. 9, т. 1.-С.135-152.
4. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели.- Киев: Наукова думка, 1990.- 184 с.
5. Беклемишев Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры.-М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1983.-336 с.
6. Симонян С.О., Аветисян А.Г., Асланян Л.М. Дифференциально-падеевская матрично-векторная модель решения систем линейных неавтономных уравнений //Моделирование, оптимизация, управление.-Ереван, 1998.-Вып. 1.-С. 65-71.
7. Симонян С.О., Аветисян А.Г., Кюрегян А.Л. Дифференциально-падеевская матрично-векторная модель решения систем нелинейных уравнений // Моделирование, оптимизация, управление.- Ереван, 2001.- Вып. 4. -С. 41-50.
8. Метьюз Дж. Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB.-М., Санкт-Петербург, Киев: Изд. дом Вильямс, 2001.-720 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.03.2007.

Ս.Հ. ՄԻՍԻՆՅԱՆ, Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Օ.Ս. ԿՈՒՉԱՏՅԱՆ

ԳԾԱՅԻՆ ՈՉ ՍՏԱՑԻՈՆԱԼ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԴԻՏԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻ ԼՈՒԾՈՒՄԸ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

Առաջարկված է լրիվ կարգով դիտող սարքի ուժեղացման գործակիցների մատրիցի տարրերի որոշման արդյունավետ մեթոդ գծային ոչ ստացիոնար կառավարման համակարգերում՝ հիմնված Գ.Ե. Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա:

Առանցքային բառեր. գծային ոչ ստացիոնար կառավարման համակարգեր, դիտող սարք, գնահատման սխալ, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ:

S.H. SIMONYAN, A.G. AVETISSYAN, O.S. KUCHATYAN

DECISION OF OBSERVATION PROBLEM OF NON-AUTONOMOUS LINEAR CONTROL SYSTEMS BASED ON DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS

An effective method of full grade of amplification matrix elements definition observing object in non-autonomous linear control systems by applying differential-taylor transformations by G.E. Pukhov is proposed.

Keywords: non-autonomous linear control systems, observing object, error of estimation, differential transformations.

В.С. ЕГИАЗАРЯН, С.П. ПОГОСЯН

МИНИМАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ОТ ЧЕТЫРЕХ ПЕРЕМЕННЫХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

Приведены определения классов Р и NPN эквивалентностей и возможности их применения с целью создания базисных элементов для комбинационных схем, имеющих два и более входа. Описан алгоритм для получения минимальных представлений всех булевых функций от четырех переменных для предварительно заданного базиса функций от двух переменных.

Ключевые слова: оптимальные сети, двоичные разрешающие диаграммы (BDD), синтез, булевы функции, минимальное представление.

Введение. Проектирование цифровых схем тесно связано с теорией булевых функций (далее - функции). Одним из таких применений является их замена на эквивалентные функции, имеющие более короткую запись, что приводит к реализации функции с помощью меньшего количества логических элементов. Такая операция обычно применяется в процессе синтеза цифровых схем.

Целью настоящей работы является классификация функций по классам эквивалентностей, что уменьшает область наблюдения, нахождение минимального представления для всех функций от четырех переменных и применение этих классов для комбинаторной оптимизации цифровых схем. При этом подразумевается минимизация количества базисных элементов в представлении для предварительно выбранного базиса функций от двух переменных.

В табл. 1 показаны все 16 функций от двух переменных.

Таблица 1

AB	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	F ₉	F ₁₀	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₅
00	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
01	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
10	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Количество функций возрастает экспоненциально от числа переменных, делая невозможным оптимальное управление инструментами оптимизации (для $N = 4$ уже имеем 65536 функций).

В проектировании цифровых схем обычно используют только реализации 5-6 функций из всех 16-и от двух переменных, что облегчает работу инструментов в процессе проектирования и минимизирует возможные конструкторские недоработки.

Этот же подход можно применить к функциям, зависящим более чем от двух переменных. При этом нужно найти такой базис функции (точнее, реализацию этих функций) от N переменных, чтобы все остальные функции могли быть представлены с помощью них (т.е. схема будет собрана только из элементов, реализующих эти функции).

Объединим все функции, которые реализуются с помощью одной и той же схемы, в одном классе эквивалентности. В частности, можно использовать понятия P (Permutation) и NPN (Negation/Permutation, output Negation) эквивалентности [1,2].

Реализации функций от двух переменных. В табл. 2 показана реализация всех 16 функций от двух переменных. Следует отметить, что некоторые функции здесь реализованы с использованием одного и того же логического элемента.

Таблица 2

Реализации функций		Функция	Название функции
$F_0 = 0$		0	Константа 0 (FALSE)
$F_1 = \bar{A} \wedge \bar{B}$		$A \downarrow B$	Стрелка Пирса ИЛИ-НЕ (NOR)
$F_2 = \bar{A} \wedge B$		$A \leftarrow B$	Подавление A (INHIBIT)
$F_3 = \bar{A}$		$\bar{A}$	Инверсия A, НЕ A (NOT)
$F_4 = A \wedge \bar{B}$		$A \Rightarrow B$	Подавление B (INHIBIT)
$F_5 = \bar{B}$		$\bar{B}$	Инверсия B, НЕ B (NOT)
$F_6 = A \oplus B$		$A \oplus B$	Сложение по модулю 2 (XOR)
$F_7 = \bar{A} \wedge B$		A / B	Штрих Шеффера, И-НЕ (NAND)
$F_8 = A \wedge B$		$A \wedge B$	Конъюнкция – логическое умножение, И (AND)
$F_9 = \bar{A} \oplus B$		$A \sim B$	Эквивалентность (EQUIVALENCE)
$F_{10} = B$		B	Повторение B (IDENTITY)
$F_{11} = \bar{A} \wedge \bar{B}$		$A \rightarrow B$	Импликация из A в B (IMPLICATION)
$F_{12} = A$		A	Повторение A (IDENTITY)
$F_{13} = \bar{A} \wedge B$		$A \leftarrow B$	Импликация из B в A (IMPLICATION)
$F_{14} = \bar{A} \wedge \bar{B}$		$A \vee B$	Дизъюнкция – логическое сложение, ИЛИ (OR)
$F_{15} = 1$		1	Константа 1 (TRUE)

Понятие класса Р. *Определение.* Функции f_1 и f_2 от переменных $A_1, \dots, A_N$ называются *Р эквивалентными*, если существует перестановка $\omega: \{1, \dots, N\} \rightarrow \{1, \dots, N\}$ такая, что

$$f_1(A_1, \dots, A_N) = f_2(A_{\omega(1)}, \dots, A_{\omega(N)})$$

при всех возможных значениях $A_i, i = 1, \dots, N$, т.е. две функции Р эквивалентны, когда возможно получить идентичные таблицы истинности, переставляя переменные одной из функций.

Например, функции F_2 и F_4 в табл. 2 Р эквивалентны. Очевидно, что Р эквивалентность разбивает множество булевых функций на классы эквивалентности.

В табл. 3 приведены все 12 различных классов Р эквивалентных функций от двух переменных. Также приведены схемы, реализующие функции из соответствующего класса. Важным свойством Р эквивалентных функций является то, что они могут всегда реализоваться, используя один и тот же логический элемент.

Таблица 3

F_0	F_1	F_2, F_4	F_3, F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}, F_{12}	F_{11}, F_{13}	F_{14}	F_{15}

Понятие класса NPN. В табл. 3 показано, что некоторые классы Р эквивалентности также могут иметь схожие реализации. Например, функции $F_1, F_2, F_4, F_7, F_8, F_{11}, F_{13}$ и F_{14} имеют реализации на уровне логических элементов, основанные на единственном логическом элементе И-НЕ (NAND) плюс несколько инверторов.

Определение. Функции f_1 и f_2 от переменных $A_1, \dots, A_N$ называются *NPN эквивалентными*, если существуют перестановка $\omega: \{1, \dots, N\} \rightarrow \{1, \dots, N\}$ и набор $\{\sigma, \sigma_1, \dots, \sigma_N\}, \sigma, \sigma_i \in \{0, 1\}$ такие, что

$$f_1(A_1, \dots, A_N) = f_2^{\sigma}(A^{\sigma_1}_{\omega(1)}, \dots, A^{\sigma_N}_{\omega(N)})$$

при всех возможных значениях $A_i, i = 1, \dots, N$, где

$$x^{\sigma} \equiv \begin{cases} x, & \sigma = 1, \\ \bar{x}, & \sigma = 0, \end{cases}$$

т.е. две функции NPN эквивалентны, если можно получить идентичные таблицы истинности для этих функций, переставляя и/или инвертируя переменные одной из функций и/или инвертируя значение одной из функций.

Эти функции могут быть сгруппированы в класс эквивалентностей NPN. В табл. 4 показаны все 4 различных NPN класса для функций от двух

переменных, в каждой строке - по одному классу. Важно заметить, что, несмотря на существование 16 различных функций от двух переменных, есть только 4 различных класса NPN от двух переменных: 2 NPN класса, содержащих по две функции, один NPN класс, содержащий четыре функции, и один NPN класс, содержащий восемь функций. NPN эквивалентные функции могут быть реализованы единственной схемой плюс несколько инверторов (используемых для инвертирования входов и выходов - в случае необходимости).

Таблица 4

F_0		F_{15}									
F_1		F_2, F_4		F_7		F_8		F_{11}, F_{13}		F_{14}	
F_3, F_5		F_{10}, F_{12}	вход								
F_6		F_9									

В табл. 5 приведены количественные характеристики соответственно Р и NPN эквивалентностей для булевых функций, зависящих от 1, 2, 3 или 4 переменных [1,2].

Таблица 5

Кол. переменных	Кол. функций	Кол. Р классов	Кол. NPN классов
1	4	4	2
2	16	12	4
3	256	80	14
4	65536	3984	222

Из 222 различных NPN классов 208 содержат функции точно от четырех переменных, 10 – точно от трех переменных, 2 – от двух переменных, 1 – от одной переменной и 1 – от 0 переменных (константы).

Функции от трех или менее переменных рассматриваются как вырожденные функции от четырех переменных.

Для случая четырех переменных каждый NPN класс содержит не более чем 768 элементов:

$$\begin{aligned}
 &16 \text{ (количество всех возможных инверсий четырех переменных)} \\
 &\times 24 \text{ (4! - количество всех возможных перестановок четырех переменных)} \\
 &\times 2 \text{ (инвертирована функция или нет)} \\
 &= 768
 \end{aligned}$$

Так как различные комбинации инверсии и перестановок часто могут порождать одну и ту же самую функцию, то количество элементов NPN класса меньше 768.

Алгоритм получения минимальных представлений. Известно несколько схожих алгоритмов создания классов NPN эквивалентностей. Однако все они используют представление функции с помощью BDD (Binary

Decision Diagrams) [3-6]. Предлагаемый алгоритм имеет простую реализацию и не требует дополнительных усилий создания BDD.

Так как на практике в базис включаются функции от двух переменных (AND, NAND, OR, NOR, XOR), для нахождения Р и NPN классов эквивалентностей для функции от четырех переменных важно найти минимальные представления функций от четырех переменных в этом базисе. Нахождение минимального представления функций широко используется в моделировании цифровых схем с помощью оттранслированной программы, где скорость моделирования прямо пропорциональна числу логических элементов схемы.

Так как количество всех таких функций равно $2^{2^4} = 65536$, то можем кодировать функции с помощью 16-битных чисел (например, первый бит будет показывать значение функции на совокупности (0, 0, 0, 0), второй бит – на совокупности (0, 0, 0, 1) и т.д. и, наконец, шестнадцатый бит – на совокупности (1, 1, 1, 1)). Например, функция И-НЕ(A, B) имеет код 30583.

Алгоритм. Алгоритм основан на рекурсивном подходе. Так как функция всегда должна иметь вид $F(f_1, f_2)$, где F - функция от двух переменных, а f_1, f_2 - функции от четырех переменных (могут быть и вырожденными), то будем искать функции подобного вида. Алгоритм для нахождения представлений длины $L + 1$ будет подбирать все уже найденные пары f_1, f_2 функции, длины которых в сумме равны L , и, перебирая поочередно все базисные функции F , построит следующий возможный вариант - $F(f_1, f_2)$. Так как функции f_1 и f_2 являются независимыми аргументами для функции F , то, очевидно, с целью получения минимального представления для функции $F(f_1, f_2)$ необходимо использовать минимальные представления для функций f_1 и f_2 .

Имея очередной возможный вариант для представления функции, вычисляется ее код, и если этот код не был получен прежде, то он является одним из минимальных представлений для функции $F(f_1, f_2)$.

Заметим, что минимальное представление функции не является единственным.

Ниже на метаязыке приводятся основные фрагменты реализации алгоритма.

Получение следующего возможного представления для функции

Добавить примитивные функции 'a', 'b', 'c', 'd' к функциям длины 1.

Для длины L от 2 до 50 // 50 - максимальная предполагаемая длина функций

Для функции $F2$ из множества базиса

Для всех длин J от 1 до $[L/2]$

Взять все функции P длины J

```

Взять все функции Q длины (L-J)
  Функция := F2 + P + Q;
  Если не имеется Код (Функция), то
    увеличить количество найденных функций;
    добавить функцию во множество функций с длинами (L+1);
    проверить, если нашли 65536 функций, то выйти
  Конец // Q
Конец // P
Конец // J
Конец // F2
Конец // L

```

Получение кода функции (если дана функция)

```

Code := 0
Для бита K от 0 до 15
  Если вычисленное значение функции на K равно 1, то
    в K-й бит Code написать 1 (Code |= (1 << K)).
Конец // K

```

Вычисление функции (если даны K и функция)

Каждой функции, переменной и константам '0', '1' присваивается некий символ для хранения в стеке, где производится вычисление.

```

Берем пустой стек "символов".
Для индекса I от 0 до размера функции
  "символ" := I-й символ функции
  Если "символ" это функция, то
    в стек добавить эту функцию
  Иначе // это "символ" переменное 'a', 'b', 'c' или 'd'
    V := бит K для переменного "символ"
    Пока стек не пуст
      T := верхний "символ" стека
      Если это значение '0' или '1', то
        удаляем верхний элемент стека
        O := верхний "символ" стека
        удаляем верхний элемент стека
        V := Значение базисной функции символом O, на (T, V);
      Иначе
        Выход из цикла;
    Конец // пока стек не пуст
    Добавляется значение V в стек
  Конец // иначе
Конец // I
Возвращается единственно оставшийся элемент ('0' или '1') из стека.

```

Результаты. Результаты были получены для трех различных базисов функций от двух переменных. Первым рассматривался базис из всех 16 функций. Программа реализована на машине Intel P4 мощностью 1,8 ГГц с оперативной памятью 768 Мб под операционной системой RedHat Linux 7.2.

Результаты получены после работы программы примерно через 8 мин. 25 с. Последний код, который был найден, имел следующее представление длиной 15 (7 функций и 8 переменных):

$$32407 \rightarrow F_6(F_8(F_6(a,d), F_{14}(b,c)), F_8(F_{13}(a,d), F_7(b,c))) .$$

В табл. 6 приведена частота появления функций в представлениях.

Таблица 6

F_0	F_1	F_2	F_4	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{11}	F_{13}	F_{14}	F_{15}
1	69074	17835	13806	95229	55925	9274	23908	25012	18008	13204	1

Функции F_3 , F_5 (инверсия) и F_{10} , F_{12} (повторение) вообще не встречаются в представлениях. Если эти функции ($F_3 F_5 F_{10} F_{12} + F_0 F_{15}$) не включены в базис, то результаты будут получены примерно через 4 мин. 50 с.

Далее рассматривался базис из шести функций - F_1 (NOR), F_4 (INHIBIT), F_6 (XOR), F_7 (NAND), F_8 (AND) и F_{14} (OR) (табл. 7). Результаты получены после работы программы примерно за 2 мин. 38 с.

Таблица 7

F_1	F_4	F_6	F_7	F_8	F_{14}
32999	51733	121326	37459	49521	51586

И, наконец, рассматривался базис из пяти функций - F_1 (NOR), F_6 (XOR), F_7 (NAND), F_8 (AND) и F_{14} (OR) (табл. 8) (тот же самый базис, что на прежнем примере, но без функции F_4 (INHIBIT)). Результаты были получены после работы программы примерно за 3 мин. 40 с. Самое длинное представление уже имеет длину 17 (8 функций и 9 переменных).

Таблица 8

F_1	F_6	F_7	F_8	F_{14}
37908	138987	55477	71692	59982

Применение. Полученные результаты можно применить для оптимизации цифровых схем, что соответственно приводит к ускорению

процесса моделирования. Для этого нужно выделить все подсхемы, имеющие четыре входа, заменить их на новую, имеющую минимальное представление.

В табл. 9 приведены результаты оптимизации на эталонных схемах.

Таблица 9

Название схемы	Кол. элементов до оптимизации	Кол. элементов после оптимизации	Процент оптимизации, %
c6288	6073	5128	15,56
c7552	6811	5053	25,81
s5378	4986	3861	22,56
s13207	12733	8567	32,72
b14	21583	20576	4,67
b15_1	27727	25432	8,28
b17_1	84254	78957	6,29
b20	42985	40817	5,04%

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Culliney J. N., Young M. H., Nakagawa T., Muroga S.** Results of the Synthesis of Optimal Networks of AND and OR Gates for Four-Variable Switching Functions // IEEE Transactions on Computers. – January, 1979.- Vol. C-27, ¹ 1.- P. 76-85.
2. **Baugh Charles R., Chandrasekaran C. S., Swee Richard S., Muroga Saburo.** Optimal Networks of NOR-OR Gates for Functions of Three Variables // IEEE Transactions on Computers. – February, 1972.- Vol. C-21, ¹ 2.- P. 153-160.
3. **Bryant R.E.** Graph-based algorithms for Boolean function manipulation // IEEE Transactions on Computers. – August, 1986.- Vol. C-35, ¹ 8.- P. 677-691.
4. **Brace K.S., Ruddel R.L., Bryant R.E.** Efficient implementation of a BDD package // Proceedings of 27th DAC. 1990.- P. 272-277.
5. **Friedman Steven J., Supowit Kenneth J.** Finding the Optimal Variable Ordering for Binary Decision Diagrams // IEEE Transactions on Computers.- May, 1990.- Vol. 39, ¹ 5.- P. 710-713.
6. **Liaw Heh-Tyan, Lin Chen-Shang.** On the OBDD-Representation of General Boolean Functions // IEEE Transactions on Computers.- June 1992.- Vol. 41, ¹ 6.- P. 661-664.

Российско-Армянский (Славянский) государственный университет. Материал поступил в редакцию 07.04.2007.

Վ. Ս. ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ, Ս. Պ. ՊՈԴՈՍՅԱՆ

**ԶՈՐՍ ՓՈՓՈԽԱԿԱՆՔԻ ԲՈՒԼՅԱՆ ՖՈՒՆԿՑԻԱՆԵՐԻ ԿԱՐՃԱԳՈՒՅՆ ՆԿԱՐԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ
ԴՐԱՆՑ ԿԻՐԱԴՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԹՎԱՑԻՆ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՄԵԶ**

Նկարագրված են բուլյան ֆունկցիաների համարժեքության P և NPN դասերը և դրանց կիրառման հնարավորությունները համակցված սխեմաների երկու և ավելի մուտքերով բազիսային տարրերի ստեղծման համար: Նկարագրված է ալգորիթմ՝ չորս փոփոխականի բոլոր բուլյան ֆունկցիաների կարճագույն նկարագրությունները ստանալու համար՝ նախապես տրված երկու փոփոխականի բուլյան ֆունկցիաների բազիսում:

Առանցքային բառեր. լավարկված ցանցեր, երկուական վերլուծող դիագրամներ (BDD), սինթեզ, բուլյան ֆունկցիաներ, կարճագույն նկարագրություն:

V.S. YEGHIAZARYAN, S.P. POGHOSYAN

**MINIMAL REPRESENTATION OF BOOLEAN FUNCTIONS OF FOUR VARIABLES AND
THEIR APPLICATION IN DESIGN AUTOMATION OF DIGITAL CIRCUITS**

P and NPN equivalence classes of Boolean functions and possibility of their application in creation of basis of elements with two or more inputs for combinational circuits are described. An algorithm for finding minimal representation of all four variable Boolean functions, from two variable ones is given.

Keywords: optimal networks, Binary Decision Diagrams (BDD), synthesis, Boolean functions, minimal representation.

Г.В. БЕРБЕРЯН, Д.Г. ЖАМАКОЧЯН, А.Р. ДАВИДЯН

**К СИНТЕЗУ ИНВЕРСНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ТОЧНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ**

Рассматриваются вопросы точной декомпозиции выходных сигналов цифровых фильтров, реализуемой путем инверсии бесконечной дискретной импульсной характеристики прямого преобразования.

Ключевые слова: вейвлет, точная декомпозиция, импульсный отклик, выборка, цифровой фильтр, инверсная импульсная характеристика, каузальный фильтр, кодирование с предсказанием.

Как известно, процесс декомпозиции используется для восстановления из результатов прямого преобразования временных рядов s_n , реализуемого с помощью соответствующих цифровых фильтров с заданным импульсным откликом h_n , аналитическую связь между которыми можно записать в виде свертки:

$$x_n = h_n \otimes s_n. \quad (1)$$

Легко заметить, что, по существу, декомпозиция представляет собой инверсную фильтрацию выходного сигнала x_n с целью получения s_n , выполняемую с помощью другого цифрового фильтра с импульсным откликом, например a_n , таким, что, очевидно, взаимосвязь между ними может быть представлена в виде другой свертки:

$$s_n = a_n \otimes x_n. \quad (2)$$

При этом следует отметить, что существуют два различных случая декомпозиции - точной и аппроксимирующей, реализуемых, в общем, с помощью фильтров с различными импульсными откликами a_n . Таким образом, задача декомпозиции, независимо от ее характера, соответствующего вышеуказанным случаям, заключается в определении искомого импульсного отклика a_n , позволяющего на основании (2) определить s_n по заданным x_n и h_n .

Как следует из различных источников по исследованиям практических и теоретических проблем цифровой фильтрации [1,3], исходным и законченным, в смысле исчерпывающей полноты описания свойств инверсной фильтрации, является алгоритм точной декомпозиции, хотя для практических целей приоритетное значение приобретает аппроксимирующая декомпозиция [2]. В отличие от алгоритма точной декомпозиции, в целом являющейся

единственной в своем роде, алгоритмы аппроксимирующей декомпозиции допускают множество различных форм, зависящих от использованных концепций и востребованной точности аппроксимации. Изобилие различных основополагающих концепций и основанных на их использовании алгоритмов естественным образом выдвигает необходимость синтеза обобщенного алгоритма аппроксимации дискретной импульсной характеристики инверсного цифрового фильтра, облегчающего его практическое применение в самых разнообразных практических случаях. Именно в этом направлении авторами была предпринята попытка разработки обобщенного формата указанного алгоритма, обоснование которого в строгой и компактной форме, удобной для практического пользования, невозможно без краткого анализа особенностей точной декомпозиции, что является самостоятельной задачей, обусловленной хотя и ограниченным, но достаточно заметным многообразием импульсного отклика h_n .

В связи с этим для упорядочения предлагаемого анализа рассмотрим сначала цифровую фильтрацию с двумерными минимально-фазовыми, максимально-фазовыми и эквифазовыми импульсными откликами, т.е. такими h_n , которые состоят из координат, или коэффициентов с убывающим, возрастающим или постоянным значением при возрастании порядкового номера: $h_n = (h_0, h_1) = (1, \rho)$, $h_0 = 1, h_1 = \rho < 1$ или $h_1 = \rho \geq 1$, причем мерой отклика h_n является количество его координат - число N , при $n = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Итак, не нарушая общности анализа, вначале допустим, что $h_n = (h_0, h_1) = (1, \rho)$, поэтому в силу (1) следует, $x_n = h_0 s_n + h_1 s_{n-1} = s_n + \rho s_{n-1}$, а в силу (2) - равенство свертки $s_n = a_n \otimes x_n$ превращается в тождество:
 $a_n \otimes h_n = \delta_n$, причем

$$\delta_n = \begin{cases} 1, n = 0, \\ 0, n \neq 0. \end{cases}$$

Теперь, пользуясь тем известным фактом, что произвольный временной ряд, в том числе и s_n , можно представить в виде свертки $s_n = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_k \delta_{n-k}$, откуда следует, что

$$s_n \otimes \delta_n = s_n, \quad (3)$$

выражение (2) можно преобразовать в модифицированное тождество следующего вида:

$$s_n = a_n \otimes x_n = a_n \otimes h_n \otimes s_n = \delta_n \otimes s_n = s_n, \quad (4)$$

которое, в свою очередь, показывает, что свертка $a_n \otimes h_n = \delta_n$ является алгоритмом синтеза искомого импульсного отклика a_n , реализующего инверсную свертку (2). Итак, можно окончательно записать

$$a_n \otimes h_n = (a_0, a_1, a_2, \dots) \otimes (1, \rho) = (1, 0, 0, \dots), \quad (5)$$

или, применив модифицированное z -преобразование к (5), последнее представить как $(a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots)(1 + \rho z) = 1$, или, поделив обе части этого уравнения на $(1 + \rho z)$, записать полученный результат в канонической форме:

$$(a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots) = 1 / (1 + \rho z). \quad (6)$$

При выполнении деления в правой части (6) с учетом $(a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots)$, являющимся модифицированным z -преобразованием a_n , окончательно (6) можно представить в виде

$$\frac{1}{1 + \rho z} = 1 - \rho z + \rho^2 z^2 - \rho^3 z^3 + \rho^4 z^4 - \dots, \quad (7)$$

а с учетом того, что z -преобразование для импульсного отклика h_n является $(1 + \rho z)$, отсюда однозначно следует, что коэффициент a_n можно определить из (7), приравняв в нем коэффициенты одинакового порядка справа и слева друг другу, т.е. записать

$$(a_0, a_1, a_2, \dots) = (1, -\rho, \rho^2, -\rho^3, \rho^4, \dots) \quad (8)$$

или в обобщенной форме:

$$a_n = \begin{cases} 0, & n = -1, -2, -3, \dots, \\ (-\rho)^n, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (9)$$

Итак, в случае, когда импульсный отклик h_n прямого преобразования является двумерным минимально-фазовым вейвлетом, импульсный отклик декомпозиции a_n или инверсный фильтр представляют собой бесконечномерный вейвлет, коэффициенты которого можно определить из (7) путем деления единицы на двучлен $(1 + \rho z)$. Поскольку вейвлет $(1 + \rho z)$ является минимально-фазовым, то, как известно, фильтр, представленный соответствующим декомпозиционным вейвлетом a_n , является устойчивой системой с обратной связью, т.к. его передаточная функция $A(z)$ представляется z -преобразованием a_n , а именно,

$$A(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots,$$

и эквивалентна $A(z) = \frac{1}{1 + \rho z}$, которая представляет систему с обратной связью и устойчивой в случае, когда $(1 + \rho z)$ является минимально-фазовым. При этом, если вход этого фильтра S_n , а выход X_n , то последний в момент

времени n зависит от предыдущего выхода x_{n-1} в момент времени $n-1$, т.е.

$$\frac{S(z)}{A(z)} = A(z) = \frac{1}{1+\rho z}, \text{ который соответствует разностному уравнению } s_n + \rho s_{n-1} = x_n.$$

Фильтр с импульсным откликом $h_n = (1, \rho)$ представлен передаточной функцией $H(z) = 1 + \rho z$, так что $A(z) = \frac{1}{H(z)} = H(z)^{-1}$ выражает точное соотношение между $H(z)$ и $A(z)$.

Для наглядности можно рассмотреть два численных примера: минимально-фазовый вейвлет $h_n = (1, \rho) = (1, 0.5)$ так, что $H(z) = 1 + \rho z = 1 + 0.5z$, и максимально-фазовый

$$h_n = (1, \rho) = (1, 2) \text{ с } H(z) = 1 + \rho z = 1 + 2z. \text{ В первом случае - } A(z) = \frac{1}{1+0.5z} = 1 - 0.5z + 0.25z^2 - 0.125z^3 + \dots, \quad a_n = (1, -0.5, 0.25, -0.125, \dots); \quad \text{во втором - } A(z) = \frac{1}{1+2z} = 1 - 2z + 4z^2 - 8z^3 + 16z^4 - \dots, \quad a_n = (a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, \dots) = (1, -2, 4, -8, 16, \dots).$$

Поэтому в первом случае a_n - инверсный каузальный устойчивый, а во втором - каузальный неустойчивый, поскольку таковым является h_n .

Теперь рассмотрим случай, когда h_n является опять двумерным, но максимально-фазовым вейвлетом, т.е. $h_n = (h_0, h_1) = (1, \rho)$, $h_0 = 1$, но $h_1 = \rho \geq 1$ (во втором случае максимально-фазовый, т.к. $h_1 = \rho = 2$). Тогда на основании (8) можно записать $(a_0, a_1, a_2, \dots) = (1, -\rho, \rho^2, -\rho^3, \rho^4, \dots)$ и прямым расчетом показать, что $a_n = (1, -\rho, \rho^2, -\rho^3, \rho^4, \dots)$, но при этом его коэффициенты, возрастающие по мере роста их порядкового номера, стремятся к бесконечности, вследствие чего энергия вейвлета, определяемая суммой квадратов его коэффициентов, тоже будет стремиться к бесконечности, т.е. окажется неограниченной. В связи с этим соответствующий частный декомпозиционный фильтр представит неустойчивую систему с обратной связью, что и следовало ожидать по той причине, что вейвлет h_n является максимально-фазовым. В общем, если каузальный (отклик возникает только после событий, случившихся в прошлом и в настоящий момент) временной ряд не обладает конечной энергией, то он представляет неустойчивую систему с обратной связью.

В самом деле, из (8) следует, что a_n будет устойчивым при $\rho < 1$ и неустойчивым при $\rho \geq 1$. Итак, обобщая сказанное, можем заключить, что если вейвлет h_n - минимально-фазовый, то a_n , определенный как

$a_n = (a_0, a_1, a_2, \dots) = (1, -\rho, \rho^2, -\rho^3, \rho^4, \dots)$, является каузальным устойчивым временным рядом, а если вейвлет максимально-фазовый, то a_n является каузальным, но неустойчивым временным рядом, поскольку обладает неограниченной энергией. Если при этом уменьшением числа коэффициентов a_n добиться ограничения указанной энергии для придания свойства стабильности аппроксимирующему временному ряду $\bar{a}_n$, то, очевидно, допустим огромную погрешность при использовании $\bar{a}_n$ вместо a_n .

По этой причине, если исходить из строгих ограничений, допускающих декомпозицию с помощью только лишь каузальных стабильных фильтров, то она возможна только при условии, что h_n - минимально-фазовый вейвлет, т.е. $\rho < 1$. Однако отметим, что из теории [3] известно о возможности конверсии некаузального фильтра в каузальный и аппроксимации неустойчивой системы с обратной связью конечномерным фильтром путем введения подходящей временной задержки.

Исходя из сказанного, покажем, что максимально-фазовая система $h_n = (1, \rho)$, $\rho \geq 1$ все-таки может иметь стабильный инверсный вейвлет a_n , только при условии, что является чисто некаузальным.

Для этого введем понятие антивейвлета, пользуясь простым понятием вейвлета как каузального переходного временного ряда, в связи с чем антивейвлет может быть определен как чисто некаузальный переходный временной ряд, общее определение которого приведено выше. Поэтому антивейвлет будет иметь форму $a_n = (\dots, a_{-3}, a_{-2}, a_{-1})$, причем a_{-1} - коэффициент a_n в момент времени $n = -1$, a_{-2} - в момент времени $n = -2$ и т.д. При этом также ясно, что все остальные коэффициенты a_n при $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ и т.д. равны нулю. Для стабильности требуется, чтобы антивейвлет имел конечную энергию, т.е. $\dots + |a_{-3}|^2 + |a_{-2}|^2 + |a_{-1}|^2 < \infty$, откуда следует, что коэффициенты антивейвлета асимптотически стремятся к нулю по мере возрастания n в отрицательном направлении, т.е. $|a_n| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow -\infty$. Теперь нетрудно заметить, что максимально-фазовый вейвлет h_n имеет стабильный инверсный вейвлет a_n при условии, если инверсный вейвлет a_n является антивейвлетом. Это означает, что свертка $a_n \otimes h_n$ является единичным импульсом, т.е. требуется, чтобы $a_n \otimes h_n = \delta_n$ или $(\dots, a_{-3}, a_{-2}, a_{-1}) \otimes (1, \rho) = (1, 0, 0, \dots)$.

Далее, применяя модифицированное z -преобразование к $a_n \otimes (1, \rho) = \delta_n$ с учетом того, что антивейвлет a_n требует отрицательных степеней z , и произведя те же действия, что и в предыдущем случае, сначала получим

$$(\dots + a_{-3}z^{-3} + a_{-2}z^{-2} + a_{-1}z^{-1})(1 + \rho z) = 1, \quad (10)$$

а после деления единицы на $(1 + \rho z)$ и сравнения коэффициентов в правой и левой частях (10) при одинаковых степенях z можно записать

$$\frac{1}{1 + \rho z} = +\dots - \rho^{-4}z^{-4} + \rho^{-3}z^{-3} - \rho^{-2}z^{-2} + \rho^{-1}z^{-1} \quad (11)$$

или окончательно:

$$(\dots, a_{-3}, a_{-2}, a_{-1}) = (+\dots - \rho^{-4}, \rho^{-3}, -\rho^{-2}, \rho^{-1}), \quad (12)$$

в обобщенной форме

$$a_n = \begin{cases} -(\rho)^n, & n = -1, -2, -3, \dots, \\ 0, & n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (13)$$

Итак, мы рассмотрели процессы декомпозиции $x_n = h_n \otimes s_n$ вейвлета как при двумерном минимально-фазовом, так и при максимально-фазовом h_n . Что касается эквивалентного случая $h_n (\rho = 1)$, то с энергетической точки зрения, нетрудно заметить, что энергия вейвлета также неограничена, т.к. при $n \rightarrow -\infty$ сумма квадратов коэффициентов a_n не имеет предела, а потому все сказанное про $h_n (\rho > 1)$ сохраняет силу и в этом случае.

Рассмотрим, наконец, декомпозицию для общего случая, когда прямое преобразование реализуется с помощью импульсного отклика h_n произвольной длины, т.е. $h_n = (h_0, h_1, h_2, \dots, h_M)$.

Если составить модифицированное z -преобразование для h_n и разложить полученный полином в виде произведения M линейных двучленов относительно z в виде $H(z) = (a_0 + a_1z)(b_0 + b_1z)\dots(c_0 + c_1z)$, то каждый из них можно рассматривать как результат z -преобразования соответственно: $(a_0 + a_1z)$ - для вейвлета (a_0, a_1) ; $(b_0 + b_1z)$ - для (b_0, b_1) и т.д., причем минимально-фазовое свойство результирующих вейвлетов обуславливает то же свойство и у преобразуемых. Как известно, при этих условиях всему произведению можно поставить в соответствие свертку всех вейвлетов $(a_0, a_1), (b_0, b_1)$ и т.д. и в целом представить $h_n = (a_0, a_1) \otimes (b_0, b_1) \otimes \dots \otimes (c_0, c_1)$ как тоже минимально-фазовый. При этом коэффициенты $a_0, a_1, b_0, b_1, \dots, c_0, c_1$, определяемые по координатам $h_0, h_1, h_2, \dots, h_N$ вейвлета h_n (то же, что и по коэффициентам $H(z)$), образуют корни многочлена $H(z)$, которые, в общем, могут быть как вещественные, так и попарно комплексно-сопряженные. Такое представление h_n означает, что выходной вейвлет x_n можно представить в форме,

$x_n = h_n \otimes s_n = (a_0, a_1) \otimes (b_0, b_1) \otimes \dots \otimes (c_0, c_1) \otimes s_n$, однозначно соответствующей каскадному соединению M двумерных вейвлетов $(a_0, a_1), (b_0, b_1), \dots, (c_0, c_1)$.

Для наглядности можно рассмотреть, например, трехмерный ($N = M + 1 = 3$) импульсный отклик $h_n = (h_0, h_1, h_2, \dots, h_M) = (2, 3, 1)$ с исходным полиномом $H_1(z) = 2 + 3z + z^2$ и его разложением $H_1(z) = (1 + 0.5z)(2 + 2z)$ с вещественными корнями $z_1 = 2$ и $z_2 = 1$, а также четырехмерный ($N = M + 1 = 4$) с исходным полиномом $H_2(z) = 3 + 2z + 3z^2 + 2z^3$ и его разложением $H_2(z) = (3 + 2z)(1 + iz)(1 - iz)$ с одним вещественным и двумя попарно комплексно-сопряженными корнями $z_1 = 1.5$ и $z_{2,3} = \mp i$. Поэтому в первом случае $h'_n = (h_0, h_1, h_2) = (2, 3, 1) = (a_0, a_1) \otimes (b_0, b_1) = (1, 0.5) \otimes (2, 2)$, а во втором - $h''_n = (h_0, h_1, h_2, h_3) = (3, 2, 3, 2) = (a_0, a_1) \otimes (b_0, b_1) \otimes (c_0, c_1) = (3, 2) \otimes (1, i) \otimes (1, -i)$.

В любом случае инверсный вейвлет a_n должен быть связан с импульсным откликом h_n соотношением $a_n \otimes h_n = \delta_n$ или $A(z) = 1/H(z) = H(z)^{-1}$, причем N -мерный вейвлет $h_n = (h_0, h_1, h_2, \dots, h_M)$ может быть образован из свертки M двумерных переходных вейвлетов или импульсных откликов элементарных (двумерных) фильтров. Поэтому в общем случае можно записать, что $h_n = (h_0, h_1, h_2, \dots, h_M) = (a_0, a_1) \otimes (b_0, b_1) \otimes \dots \otimes (m_0, m_1)$, $H(z) = (h_0 + h_1z + h_2z^2 + \dots + h_Mz^M) = (a_0 + a_1z)(b_0 + b_1z) \dots (m_0 + m_1z)$ или $A(z) = 1/H(z) = 1/(h_0 + h_1z + \dots + h_Mz^M) = 1/(a_0 + a_1z)(b_0 + b_1z) \dots (m_0 + m_1z)$. Затем деление в дроби $1/(h_0 + h_1z + \dots + h_Mz^M)$ приводит к двум равенствам: одно из них $(a_0 + a_1z + a_2z^2 + \dots)$ означает, что, если каждый из двумерных вейвлетов $(a_0, a_1), (b_0, b_1), \dots, (m_0, m_1)$ является минимально-фазовым, что обязательно обеспечивает такое же свойство для h_n в целом, то инверсный вейвлет a_n является стабильным и каузальным по отношению к h_n ; другое - $1/(h_0 + h_1z + h_2z^2 + \dots + h_Mz^M) = (\dots + a_{-3}z^{-3} + a_{-2}z^{-2} + a_{-1}z^{-1})$, соответствующее свертке M двумерных максимально-фазовых вейвлетов, вследствие чего максимально-фазовым становится весь вейвлет h_n , что позволяет найти антивейвлет $(\dots, a_{-3}, a_{-2}, a_{-1})$, т.е. чисто некаузальный стабильный и

инверсный по отношению к максимально-фазовому h_n . При этом в обоих случаях вейвлет a_n , в отличие от h_n , получается бесконечномерным.

Рассмотрим теперь случай смешанного содержания вейвлетов, т.е. когда h_n является сверткой M_1 двумерных минимально-фазовых и M_2 максимально-фазовых вейвлетов с общим количеством вейвлетов $M_0 = M_1 + M_2$.

Каждый из этих двух вейвлетов можно представить в виде отдельных свертков – первый, состоящий из M_1 двумерных минимально-фазовых, из которых в результате выполнения операции свертки получится вейвлет размера $N_1 = M_1 + 1$, а другой – из M_2 двумерных максимально-фазовых, свертка которых преобразуется в вейвлет размера $N_2 = M_2 + 1$. Далее делим единицу на z -преобразование первой компоненты, разлагая остаток по положительным степеням z , получив таким образом значения коэффициентов вейвлета $a_n^{(1)} = (a_0^{(1)}, a_1^{(1)}, a_2^{(1)}, \dots)$, а затем, поступая также с другой компонентой, разлагаем второй остаток по отрицательным степеням z , получая второй вейвлет $a_n^{(2)} = (\dots, a_{-3}^{(2)}, a_{-2}^{(2)}, a_{-1}^{(2)})$, причем первый из них является стабильным инверсным по отношению к минимально-фазовой компоненте, а другой – инверсным стабильным по отношению ко второй – максимально-фазовой.

Наконец, образуем последнюю свертку $a_n = a_1^{(1)} \otimes a_2^{(2)}$, тем самым получив искомый импульсный отклик некаузального фильтра $a_n = (\dots, a_{-3}, a_{-2}, a_{-1}, a_0, a_1, a_2, \dots)$. Итак, инверсный стабильный импульсный отклик a_n декомпозиции смешанного импульсного отклика h_n является некаузальным стабильным вейвлетом, содержащим как компоненту памяти, так и компоненту предсказания (упреждения). Поэтому его z - преобразование содержит как положительные, так и отрицательные степени z , т.е. $A(z) = (\dots, +a_{-3}z^{-3} + a_{-2}z^{-2} + a_{-1}z^{-1} + a_0 + a_1z + a_2z^2 + \dots)$, разложив которое на двумерные – либо минимально-фазовые, либо максимально-фазовые, получим свертку для конечномерного вейвлета h_n с коэффициентами $(h_0, h_1, h_2, \dots, h_M)$, однозначно определяемыми коэффициентами указанных двумерных z - компонентов бесконечномерного вейвлета a_n .

Итак, проведенный анализ точной декомпозиции результатов прямой фильтрации при различных структурах цифрового фильтра показал, что все кажущееся многообразие случаев можно свести к следующим трем, в зависимости от структуры импульсного отклика h_n указанного фильтра.

Первый из них соответствует минимально-фазовой, другой – максимально-фазовой и третий – смешанной структурам конечномерного вейвлета h_n ,

обуславливающим каузальный, чисто некаузальный и некаузальный стабильный бесконечномерный вейвлет a_n , инверсный по отношению к h_n .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березина Л.Н.** Моделирование распространения УКВ и ДМВ-радиоволн в условиях разнорельефной городской застройки // Теория и техника радиосвязи. – 1994. – Вып.2. – С. 116 – 126.
2. **Фок В.А.** Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М.: Сов. Радио, 1970. – 216 с.
3. **Moon T.K., Stirling W.C.** Mathematical Methods and Algorithms for Digital Signal Processing. – Los Angeles: Prentice Hall, 2000. – 468 p.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 26.01.2007.

Գ.Վ. ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ, Դ.Գ. ԺԱՄԱԿՈՉՅԱՆ, Ա.Ր.ԴԱՎԻԹՅԱՆ

ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ՇԱՐՔԵՐԻ ՈՒՂԻՂ ՓՈԽԱԿԵՐՊՄԱՆ ԱՐԴՑՈՒՆՔՆԵՐԻ ՃՇԳՐԻՏ ԱՊԱԿԱԶՄԱՎՈՐՈՂ ՀԵՏԱԴԱՐՁ ՁՏԻՉՆԵՐԻ ՄԻՆԹԵԶԻ ՄԱՍԻՆ

Վերլուծվել են թվային գտիչների՝ ելքային ազդանշանների ապակազմավորման խնդիրների ճշգրիտ լուծման տարբեր եղանակները, որոնց համակցված կիրառման միջոցով մշակվել է բացառիկ գործնական նշանակություն ունեցող լավարկված ալգորիթմը:

Առանցքային բառեր. վեյվլետ, թվային գտիչ, դիսկրետ իմպուլսային արձագանք, հակադարձ իմպուլսային բնութագիր, ոլորք, հետադարձ փոխակերպում, նախապայմանին առանց լրացուցիչ հապաղման արձագանքող գոյններ, կանխագուշակող կողավորում:

G.V. BERBERYAN, D.G. ZHAMAKOCHYAN, A.R. DAVITYAN

ON SYNTHESIS OF INVERSE FILTERS FOR PRECISE DECOMPOSITION OF THE TIME-SERIES DIRECT TRANSFORMATION RESULTS

The results of analysis for the precise digital filter output signal decomposition resulting in development of a proper algorithm of its actual realization have been considered.

Keywords: wavelet, digital filter, discrete impulse response, inverse impulse characteristics, convolution, precise deconvolution, casual filter, predictive encoding.

Н.С. КАНАЯН

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ЗАДАЧИ РЮКЗАКА

Рассматриваются вопросы математического определения типа задачи рюкзака, обладающего свойством подобности типов предметов, размещаемых в нем. Предложен метод решения такого типа задач, который позволяет сократить вычислительное время пропорционально числу взаимно подобных типов предметов.

Ключевые слова: распределение ресурсов задача рюкзака, эффективные алгоритмы, вычислительная сложность.

Введение. В [1-3] предложена модель оптимального распределения ресурсов для крупных социально-экономических инвестиционных программ в области теплоснабжения, основанная на использовании задачи рюкзака. Поскольку проблема относится к *pr-complete* классу сложности, известные подходы ее решения обычно нацелены на разработку эффективных решений для отдельных типов задач с различными свойствами [4,5].

В процессе изучения задачи оптимизации распределения ресурсов для программы теплоснабжения в контексте модели рюкзака были обнаружены некоторые свойства типов предметов рюкзака, которые, насколько нам известно, до настоящего времени не были обсуждены в специальной литературе. Эти свойства использованы для определения понятия *подобности* между типами предметов рюкзака.

1. Формулировка задачи. Математическая формулировка рассматриваемой задачи сводится к следующим соотношениям:

- критерий оптимальности: $Q_{\text{opt}} = \max_{x_i} \sum_i x_i w_i$;

- ограничения:

$$\sum_i x_i v_i \leq V ; \quad (1)$$

- область допустимых решений: $x_i = \{0, 1, 2, \dots\}$,

где $i = \overline{1, N}$ - число типов проектов, требующих финансирования (ресурсов); v_i , w_i - стоимость и доходность i -го типа проектов соответственно; V - общее количество доступного инвестиционного ресурса (размер рюкзака);

X_i - число проектов i -го типа, отобранных для финансирования (число предметов, размещенных в рюкзаке).

В [4] обсуждается эффективность различных алгоритмов решения сформулированной выше задачи относительно двух показателей вычислительной сложности – времени и объема памяти, используемых при решении. Показано, что при полиномиальной аппроксимации алгоритма динамического программирования полиномиальное время решения полностью может быть гарантировано. Относительно высокая эффективность может быть также достигнута использованием генетических алгоритмов, однако решение не всегда может быть получено в разумно ограниченном интервале времени.

В [5] предложен подход, позволяющий исключить зависимость времени вычислений от размера рюкзака. Однако разработанный подход обеспечивает хорошие результаты лишь при достаточно больших значениях размеров рюкзака. В настоящей работе из [5] заимствованы ряд положений, определений и понятий, а именно:

- Определение 1. Любое решение задачи рюкзака, удовлетворяющее ограничению на размер, согласно соотношениям, определяется как *возможное решение*. Любая задача имеет, по крайней мере, одно возможное решение.
- Определение 2. Оптимальными являются те возможные решения, которые обеспечивают максимальное значение критерия оптимальности в (1).
- Определение 3. Два типа предметов называются идентичными, если для них верны следующие соотношения: $V_i = V_k, W_i = W_k, i, k \in \overline{1, n}$.
- Определение 4. Плотность некоторого типа $i, \forall i \in \overline{1, N}$ предметов определяется как $d_i = w_i / v_i$.
- Определение 5. Наилучший тип предметов определяется как тип с наилучшей плотностью, так что i -й тип лучше k -го типа, если $d_i > d_k$, или $d_i = d_k, w_i < w_k$, или $d_i = d_k, w_i = w_k, i < k$.
- Определение 6. Наилучшая плотность есть плотность наилучшего типа предметов.
- Определение 7. Размерность задачи определяется числом N типов предметов, заданных в задаче.
- Определение 8. Перед исполнением какого-либо алгоритма все типы предметов сортируются относительно плотности в нисходящем порядке.

Детальное изучение инвестиционных заявок на предоставление ресурсов в контексте модели рюкзака показывает, что некоторые из них имеют одинаковую плотность, но разные стоимости и доходности. Такие заявки не

могут быть рассмотрены как идентичные относительно вышеприведенного определения 3. Это свойство типа задачи рюкзака мы определяем как *подобность* предметов, что математически может быть сформулировано следующим образом: два предмета задачи рюкзака считаются подобными, если и только если их плотности равны. В рамках этого определения идентичные предметы, определенные в [5], являются также и подобными. Ясно, что плотности являются действительными числами и их равенство должно быть установлено в пределах предварительно определенной точности представления чисел (знаков после запятой, отделяющей целую и дробную части числа).

В вышеприведенных наблюдениях не было бы ничего необычного, если бы не появившаяся идея исследовать возможность сокращения размерности задачи путем объединения типов предметов с равными плотностями. В настоящей работе сделана попытка разработать теоретическую основу для сокращения размерности задачи рюкзака и, следовательно, вычислительной сложности типа задачи, характеризующейся наличием подобных предметов. Насколько нам известно, такой подход на сегодняшний день не обсуждался в специальной литературе.

1. Сокращение размерности: Виртуальная и агентская задачи. Для задачи (1) определим *единичный тип* со следующими свойствами:

$$v_i^s = v_i/s_i, w_i^s = w_i/s_i, \forall i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где $\{s_i\}, i = \overline{1, N}$ - некоторые исключительные параметры каждого предмета.

Для рассматриваемой предметной области (программа теплоснабжения [1-3]) это может быть общая площадь, охватываемая системой теплоснабжения, предлагаемой конкретным проектным предложением. Такое преобразование исходной задачи (1) определяет новую задачу, которая далее именуется *виртуальной*:

$$\begin{aligned} Q_{\text{opt}}^s &= \max_{x_i^s} \sum_{i=1}^N x_i^s w_i^s, \\ \sum_{i=1}^N x_i^s v_i^s &\leq V^s, \\ x_i^s &= \{0, 1, 2, \dots\}, i = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (3)$$

где V^s - сокращенный размер рюкзака, $V^s * K = V$, $K = \text{average}\{s_i\} = \sum s_i / N^2$.

¹ Такое преобразование, очевидно, является своего рода приближением, влияющим на точность получения оптимального решения. Количественная оценка такого приближения, однако, выходит за рамки настоящей статьи.

В результате преобразования (2) подобные типы предметов преобразуются в идентичные в рамках виртуальной проблемы (3), т.е. для каждой пары предметов, принадлежащих разным типам, $i \neq j$, так что $d_i^s = d_j^s$, соответствующие параметры также будут равны: $v_i^s = v_j^s, w_i^s = w_j^s$. Согласно определению, идентичные предметы должны принадлежать одному и тому же типу. Следовательно, такие два типа предмета i и j могут быть объединены в один тип. Очевидно, это приведет к сокращению размерности задачи с N в N^s , а фактическая мера такого сокращения будет равна числу взаимно подобных типов предметов. Назовем тип предмета, сформированный в результате объединения двух (или более) подобных типов предметов, типом *агент*, а соответствующую преобразованную задачу – *агентской задачей*. Последняя может быть описана теми же выражениями (3), лишь с тем отличием, что N должно быть заменено на N^s .

Необходимо отметить, что агентская задача остается в том же классе вычислительной сложности, как и исходная задача. Однако для агентской задачи решение будет найдено быстрее – настолько, насколько будет сокращена размерность, т.е. время решения будет зависеть от числа подобных типов предметов в исходной задаче.

1. Решение задачи. Таким образом, исходная задача теперь преобразована в агентскую задачу, которая может быть решена за меньшее время. Решение агентской задачи затем должно быть преобразовано в решение исходной задачи.

Решение агентской задачи само по себе предоставит больше информации для построения решения исходной задачи в виде значений компонент решения агентской задачи. А именно, значение каждой компоненты $x_i^s, \forall i \in \overline{1, N^s}$ решения агентской задачи определит соответствующую часть размера (вместимости) рюкзака как в агентской, так и в исходной задачах. Кроме этого, значения $x_i^s, \forall i \in \overline{1, N^s}$ определяют сумму значений соответствующих компонент решения исходной задачи, принадлежащих подобным типам предметов. Таким образом, обратное преобразование решения агентской задачи в решение исходной задачи не будет однозначным, так как каждый агентский тип предметов представляет один или более типов предметов исходной задачи. Отсюда и предложенное название агентской задачи.

Покажем, что существует прозрачный и быстрый алгоритм для такого обратного преобразования решения агентской задачи. Для этого исследуем свойства решения агентской задачи. Рассмотрим следующие случаи:

(а) $N^s = N$. Это означает, что исходная задача не содержит подобные типы предметов. Это приводит к одноразовой работе используемого алгоритма для преобразованной агентской задачи, что, очевидно, не приведет к выигрышу во времени, так как размерность задачи не будет сокращена. Более того, ряд дополнительных процедур будет задействован для выполнения обратного

преобразования решения агентской задачи в решение исходной задачи. Однако это не будет отражено на вычислительной сложности, так как эти дополнительные процедуры, как будет далее показано, находятся в линейной зависимости от N .

(b) $N^s = 1$. Это означает, что все типы предметов исходной задачи подобны друг другу. Решение агентской проблемы в этом случае потребует постоянного времени:

$$x_1^s = \frac{V^s}{v_1^s} = k, \quad (4)$$

где v_1^s - стоимость предметов наилучшего типа.

Значение критерия оптимальности будет $Q^s(x_1^s) = kw_1^s$, которое, согласно определению 4, представляет его максимальное значение.

Таким образом, нами установлено, что решение исходной задачи должно содержать точно k ненулевых компонент. Однако неизвестно, какие именно типы предметов должны быть включены в окончательное решение, чтобы было удовлетворено ограничение на размер (вместимость) рюкзака. Вместе с тем ясно, что число возможных комбинаций типов предметов $C_k^N = \frac{N!}{k!(N-k)!}$, среди которых искомая комбинация должна быть выявлена, достаточно велико для полного перебора.

В таблице представлен процесс поиска оптимального решения.

Таблица

Множество возможных ненулевых компонент оптимального решения

N/k	1	2	.	$i-1$	i	$i+1$	.	$N-1$	N
1	v_1	v_2		v_{i-1}	v_i	v_{i+1}		v_{n-1}	v_n
2	$2v_1$	$2v_2$		$2v_{i-1}$	$2v_i$	$2v_{i+1}$		$2v_{n-1}$	$2v_n$
.									
j	jv_1	jv_2		jv_{i-1}	jv_i	jv_{i+1}		jv_{n-1}	jv_n
k	kv_1	kv_2		kv_{i-1}	kv_i	kv_{i+1}		kv_{n-1}	kv_n

Как видно из таблицы, в ней содержатся всевозможные ненулевые компоненты оптимального решения. Прямой путь к поиску оптимального

решения путем полного перебора всех вариантов, как было отмечено выше, весьма обременителен в смысле требуемого времени, не будет способствовать качеству предложенного метода и поэтому далее не рассматривается.

Необходимо также отметить, что какой бы алгоритм поиска ни использовался, первым шагом будет нахождение ячейки таблицы, значение которой удовлетворяет условию ограничения на размер рюкзака.

Пусть первым шагом проверяется значение нижней левой ячейки таблицы. По существу, необходимо убедиться в том, что ее значение представляет собой допустимое (возможное) решение исходной задачи. Если это так, то очевидно, что это значение является также оптимальным, так как:

- а) первый тип предметов одновременно есть наилучший по определению (поскольку типы предметов отсортированы в убывающем порядке относительно их плотностей);
- б) решение не может содержать больше чем k ненулевых компонент.

Далее рассмотрим случай, когда размер рюкзака таков, что только $j < k$ предметов наилучшего типа могут быть размещены в рюкзаке. Можно сформулировать следующую теорему.

Теорема 1. На первом шаге процесса обратного выбора возможное субрешение (т.е. компонента решения) x_1 проблемы (1), содержащее j предметов наилучшего типа, $j < k$, представляет собой оптимальное субрешение, т.е. наполняет соответствующую часть рюкзака так, что не существует какой-либо иной комбинации типов предметов, обеспечивающих большее значение критерия оптимальности.

Интуитивно эта констатация следует из *принципа оптимальности* и имеет важные последствия при построении алгоритма реализации для процесса обратного выбора.

Для доказательства теоремы допустим, что существует субрешение, которое наполнит часть рюкзака лучше, чем j предметов лучшего типа. При этом ясно, что число ненулевых компонент превысит j (up to k), а значение критерия оптимальности будет больше, чем определенное j предметами наилучшего типа. Необходимо проанализировать два возможных исхода.

Вариант 1. Существует тип предмета i , отличный от лучшего типа, m предметов которого ($m \leq k$) могут наполнить часть рюкзака, наполненного j предметами лучшего типа, лучше, т.е. обеспечивая большее значение критерия оптимальности. При этом следующие соотношения должны быть одновременно верны:

$$mv_i < jv_1, \quad mw_i > jw_1, \quad v_i < v_1, \quad m > j, \quad \forall i \in \overline{1, N}. \quad (5)$$

Из этих соотношений следует

$$\frac{v_1}{v_i} > \frac{m}{j} > \frac{w_1}{w_i} = \frac{\frac{w_1 * v_1}{v_1}}{\frac{w_i * v_i}{v_i}} = \frac{d_1}{d_i} * \frac{v_1}{v_2}, \quad (6)$$

что противоречит вышеприведенным определениям какого бы ни было значения m , так как $d_1 > d_i$ и $v_1 > v_i$ из (5), что доказывает теорему 1.

Вариант 2. Существует линейная комбинация других типов предметов, число которых не превышает k ($\sum \alpha \leq k$), которая может наполнить часть рюкзака, наполненного j предметами наилучшего типа, лучше, т.е. обеспечивая большее значение критерия оптимальности. Тогда следующие соотношения должны выполняться одновременно:

$$\begin{aligned} \alpha_2 v_2 + \alpha_3 v_3 + \dots + \alpha_n v_n &< j v_1, \\ \alpha_2 w_2 + \alpha_3 w_3 + \dots + \alpha_n w_n &> j w_1, \\ \sum_{i=2}^n \alpha_i &\leq k, \\ \sum_{i=2}^n \alpha_i &> j, \\ i &= \overline{2, n}. \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразуем второе неравенство следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_2 w_2 + \dots + \alpha_n w_n &= \alpha_2 w_2 \frac{v_2}{v_2} + \dots + \alpha_n w_n \frac{v_n}{v_n} = \\ &= \alpha_2 d_2 v_2 + \dots + \alpha_n d_n v_n > j d_1 v_1 \end{aligned} \quad (8)$$

или

$$\alpha_2 v_2 \frac{d_2}{d_1} + \alpha_3 v_2 \frac{d_3}{d_1} + \dots + \alpha_n v_n \frac{d_n}{d_1} > j v_1. \quad (9)$$

Согласно определению, $d_1 > d_2 > \dots > d_n$. Следовательно, значение каждой суммируемой левой части неравенства (9) меньше значения соответствующей суммируемой левой части первого неравенства (7), в то время как правые части этих неравенств одинаковы. Это представляет собой противоречие, что доказывает теорему 1.

Полученные выше результаты легко могут быть распространены на свойство компоненты решения, полученной на любом другом шаге процесса решения. В частности, можно утверждать следующее.

Теорема 2. На каждом $i, i \in \overline{1, N}$ шаге процесса обратного выбора возможное субрешение $x_i < k, i \in \overline{1, N}$ задачи (1) представляет собой оптимальное субрешение, т.е. заполняет соответствующую часть рюкзака таким образом, что не существует иной комбинации типов предметов, обеспечивающей большее значение критерия оптимальности.

(с) $N^s \neq 1$. Это наиболее общий случай, означающий, что исходная задача содержит некоторое число подобных типов предметов. Рассуждения для построения быстрого алгоритма поиска оптимального решения для этого случая аналогичны вышеприведенным рассуждениям и могут быть опущены, не влияя на общность.

Вышеприведенный анализ позволяет произвести построение алгоритма обратного выбора, который выполняется не более чем за N шагов, т.е. обеспечивая линейное по N время исполнения.

Заключение. В работе предложен метод, основанный на идее замены прямого решения исходной задачи решением агентской задачи с меньшей размерностью и последующим решением нескольких задач обратного выбора, время исполнения которых линейно от N . Такой подход позволяет улучшить показатели качества процесса решения для задач рюкзака, характеризующихся свойством подобности типов предметов. Показатели качества алгоритма решения могут быть улучшены, если исходная задача содержит, по меньшей мере, два подобных типа предметов, и будут неуклонно улучшаться по мере роста числа подобных типов предметов.

Важным аспектом исследований является изучение того, как влияет на конечный результат вопрос приближенного преобразования размера рюкзака исходной задачи в размер рюкзака агентской задачи. Метод исследований этих вопросов будет основан на разработке и использовании системы моделирования поведения предложенного метода и основанного на нем алгоритма при различных размерностях задачи и вместимости рюкзака, а также используемых алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kanayan N., Simonyan S., Kanayan S.** 'Interactive Transparency in Resource Sharing, Reproduction and Optimization of Public Investment Programs // Proceedings of International Conference on Politics and Information Systems: Technologies and Applications. Orlando, Florida, USA, July, 2004.
2. **Канаян Н.С.** Задача оптимального распределения ресурсов для городского теплоснабжения (I) // Вестник Инженерной академии Армении. -2005. -Т.2, № 2. – С.302-307.
3. **Канаян Н.С.** Задача оптимального распределения ресурсов для городского теплоснабжения (II) // Вестник Инженерной академии Армении. -2005. -Т.2, № 3. – С. 417-421.

4. **Kerr W.** Investigation into Knapsack Department of Computer Science, University of Wyoming, 2001.
5. **Landa L.** Sage Algorithms for Knapsack Problem, UCSD Technical Report, CS 2004-0794, June 2004.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 07.03.2007.

Ն.Ս. ԿԱՆԱՅԱՆ

ՊԱՅՈՒՍԱԿԻ ԽՆԴՐԻ ՈՐՈՇԱԿԻ ՏԻՊԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԻ ՄՈՏԵՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Քննարկվում է առարկաների նման դասեր ընդգրկող ուսապարկի խնդրի մի տեսակ: Ներմուծված է նման դասերի գաղափարը, առաջարկված է լուծման մեթոդ, որը թույլ է տալիս լուծման ժամանակի նվազեցում՝ փոխադարձաբար նման դասերի թվին համեմատական:

Առանցքային բառեր. ռեսուրսների բաշխում, ուսապարկի խնդիր, արդյունավետ ալգորիթմներ, հաշվողական բարդություն:

N.S. KANAYAN

AN APPROACH TO SOLVE SOME TYPES OF KNAPSACK PROBLEM

The mathematical definition of the knapsack problem that incorporates similar item types is discussed. The notion of similar item types is introduced and a method of solution has been proposed for problems with such properties, which enable a reduction in the calculation time of the problem proportionally to the number of mutually similar item types.

Keywords: resource allocation, sharing, knapsack problem, effective algorithms, computational complexity.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԶԱՎԱԽՅԱՆ Ռ.Պ., ՄԱԽՍՈՒԴՅԱՆ Ն.Ա.

ՃՈՃԱԼԾԱԿԻ ՇԱՐՖՄԱՆ ՀԱՄԱՉԱՓ ՕՐԵՆՔ ԱՊԱՀՈՎՈՂ ԳՆԴՈԼՈՐ-
ՏԱՅԻՆ ԵՎ ՀԱՐԹ ՇՈՒՌՏՎԻԿ-ՃՈՃԱԼԾԱԿԱՅԻՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ
ՀԱՄԵՄՏԱԿԱՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ ԵՎ ՄԻՆԹԵԶ 393

ՊԱՊՈՅԱՆ Ա.Ռ., ՉԱԽԱԼՅԱՆ Հ.Ս.

ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ՀԵՆԱՐԱՆՆԵՐՈՎ ԱՐԱԳԸՆԹԱՅ ՌՈՏՈՐԱՅԻՆ
ՀԱՆԳՈՒՅՑԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ 401

ԲԱԲԱՅԱՆ Ս.Հ.

ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ ԲԱՇԽՈՒՄԸ ԻՐԱԿԱՆ ԿՈՆԱԿԱՆ ՊԱՐՈՒՐԱԿԻ
ԳԱԼԱՐՆԵՐՈՎ 409

ԲԵԼԼՈՒԹՅԱՆ Զ.Ա., ԲԵԼԼՈՒԹՅԱՆ Ս.Զ.

ՄԻՆԽՐՈՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ԱՌԱՆՑՔԱԿԱԼՆԵՐԻ ԵՎ ԿՈՆՏԱԿՏԱ-ԽՈ-
ԶԱՆԱԿԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՄՈՂԵԼՆԵՐԸ 415

ԲԱԲԱՅԱՆ Զ.Ա.

ԱՎՏՈՄՏԱՑՎԱԾ ՓԱՅԼԱՉԱՓԻՉ ՀԱՐՄԱՐԱՆՔՆԵՐ (ԱՓՀ)
ԱՎՏՈՄՏԱՑՎԱԾ ՉԱՓԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒՄՈՎ 423

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ա.Ս.,

ԶԱՔԱՐՅԱՆ Ա.Հ., ԵԶԱԿՅԱՆ Հ.Հ., ՄԱՅԱՐՅԱՆ Վ.Հ.

Fe₂O₃-NiO-CoO-MoO₃ ՕՔՄԻԴԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՑ ՄԻՆԹԵԶՎԱԾ ԲԱՐԴ
ՕՔՄԻԴՆԵՐԻ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ
ՄԱՐՏԵՆՍԻՏԱՅԻՆ ԾԵՐԱՅՈՂ ՊՈՂՊԱՏԱՓՈՇՈՒ ՍՏԱՅՈՒՄԸ 433

ԳԵՈՂԱԿՅԱՆ Զ.Ա., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Բ.Վ., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Ս.Վ.,

ՎԱՂԱՆՅԱՆ Ռ.Ա., ԳԵՈՂԱԿՅԱՆ Կ.Զ.

ԿԱՊԱՐ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ԴՅՈՒՐԱՀԱԼ ԱՊԱԿԻՆԵՐ 441

ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Կ.Ա., ԲԱԽՇՅԱՆ Ա.Օ., ՀԱԿՈԲՅԱՆ Վ.Վ., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Ա.Կ.

ԵՐԿԲԱՂԱԴԻՉ ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ԿՈՄՊՈԶԻՏՆԵՐԻ ՖԻԶԻԿԱՄԵԽԱՆԻ-
ԿԱԿԱՆ ԵՎ ՇՓԱՄԱՇԱԿԱՅՈՒՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ
ԱՆՕՐԳԱՆԱԿԱՆ ԼՅԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՇԱՐՔԻ ՀԱՄԱՐ 448

ՄԻՆԱՍՅԱՆ Զ.Ա., ՄՇԵՅՅԱՆ Գ.Ս.

ԿՈՇԻԿԻ ԶԵՎԻ ՍԵՎԵՌՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅՈՒՄ ԽՈՆԱՎԱՅՆՈՂ
ԹԱՂԱՆԹԻ ՀԱՄԱՐ ՆՅՈՒԹԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅՈՒՆ 455

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Լ.Ե., ՇԱՀՆԱԶԱՐՅԱՆ Վ.Ա.

ԽԱԼԿՈՊԻՐԻՏԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԻ ՀԻԴՐՈՔԼՈՐԱՅԻՆ ՏԱՐՐԱԼՈՒԾՄԱՆ
ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 459

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Վ.Հ., ԱՔՐԱՀԱՍՅԱՆ Հ.Ա.

ՏՆՏԵՍԱԿԱՆ ԳՈՐԾՈՒՆԵՈՒԹՅԱՆ ԱԶԴԵՅՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԵՏԵՐԻ ՆՎԱԶԱԳՈՒՅԻ ՀՈՍՔԻ ՎՐԱ 464

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ս.Է.

P-U ԵՎ P-Q ՏԵՍՔԻ ԿԱՅԱՆԱՅԻՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ
ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆ ԱՃԵՐԻ
ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ 469

ԳԼՈՒԽ Ժ.Ս.

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ 0.38/0.22 կՎ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ՕՐԱԿԱՆ
ԲԵՌՆՎԱԾՔԻ ԳՐԱՖԻԿՆԵՐԸ ԲՆՈՒԹԱԳՐՈՂ ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐԻ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄ 479

**ՊՈՂՈՍՅԱՆ Շ.Վ., ՄԱԼԱՔՅԱՆ Յ.Հ., ԱՄԻՐՋԱՆՅԱՆ Ա.Մ.,
ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ա.**

ՋՋԷՌ-440 ՌԵԱԿՏՈՐԻ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՏԱԿ ԵՎ ՏԱՔ ՎԻՃԱԿՈՒՄ
ՇԱՀԱԳՈՐԾՄԱՆ ԸՆԹԱՑՔՈՒՄ ՍԱՌԸ ՓԽՐՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԲԵՐԵԼՈՒ
ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ՎԹԱՐԱՅԻՆ ՍՑԵՆԱՐՆԵՐԻ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆԱՅԻՆ
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ 488

ՍՈՒՐԱԴՅԱՆ Ա.Մ., ԵՆԳԻՔԱՐՅԱՆ Ս.Ն., ԱՔՐԱՀԱՍՅԱՆ Վ.Ղ.

ՄԵՂՄԱԾ ԵՐԿԲԱՂԱԴՐԱՄԱՍ ՄԵԿՈՒՄԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ԷԼԵԿՏՐԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԸ 499

ԱԶԱՐՅԱՆ Մ.Հ.

ՄԻԿՐՈՂԻՐՔԱՎՈՐՈՒՄ ԻՐԱԿԱՆԱՑՆՈՂ ՄԵԹՈԴ ԵՎ
ՄԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄ 504

ՇԱՂԳԱՍՅԱՆ Ա.Ս.

ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ՉՍՓՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ 510

**ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Վ.Հ., ՄԱՐԿՈՍՅԱՆ Մ.Վ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Ա.,
ԷՅՐԱՍՋՅԱՆ Ս.Գ.**

ԱԿՏԻՎ ՓՈՒԼԱՎՈՐՎԱԾ ԱՆՏԵՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ՄՈԴՈՒԼՆԵՐԻ
ԹԵՍԹԱՎՈՐՈՒՄԸ : Հաղորդում 1. Թեսթավորման եղանակ 516

ԹԵՐԶՅԱՆ Հ.Ա., ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ Հ.Ս., ՊԱՐՈՆԻԿՅԱՆ Ա. Ե

ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐԲԵՐԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ
ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՀԱՄԱՐ ԵՌԱՆԿՅՈՒՆԱՅԻՆ ՑԱՆՑԻ ԱՆԿՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ
..... 523

ՄԻՍՈՆՅԱՆ Մ.Հ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ԿՈՒՉԱՏՅԱՆ Օ.Ս.

ԳԾԱՅԻՆ ՈՉ ՍՏԱՑԻՈՆԱՐ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ԴԻՏԵԼԻՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻԻ ԼՈՒԾՈՒՄԸ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ
ՋԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ 533

ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ Վ.Ս., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Ս.Պ.

ՉՈՐՄ ՓՈՓՈԽԱԿԱՆԻՑ ԲՈՒԼՅԱՆ ՖՈՒՆԿՑԻԱՆԵՐԻ ԿԱՐՃԱԳՈՒՅՆ
ՆԿԱՐԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ԹՎԱՅԻՆ
ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՎՏՈՄԱՏՅԱՆ ՄԵՋ 544

ԲԵՐԲԵՐՅԱՆ Գ.Վ., ԺԱՄԱԿՈՉՅԱՆ Դ.Գ., ԴԱՎԻԹՅԱՆ Ա.Ռ.

ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ՇԱՐՔԵՐԻ ՈՒՂԻՂ ՓՈԽԱԿԵՐՊՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԻ
ՃՇԳՐԻՑ ԱՊԱԿԱԶՄԱՎՈՐՈՂ ՀԵՏԱԴԱՐՉ ՋՏԻՉՆԵՐԻ ՄԻՆԹԵՋԻ ՄԱՍԻՆ . 553

ԿԱՆԱՅԱՆ Ն.Ս.

ՊԱՅՈՒՍԱԿԻ ԽՆԴԻԻ ՈՐՈՇԱԿԻ ՏԻՊԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՄԻ ՄՈՏԵՑՄԱՆ
ՄԱՍԻՆ 562

СОДЕРЖАНИЕ

ДЖАВАХЯН Р.П., МАХСУДЯН Н.А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СФЕРИЧЕСКИХ И ПЛОСКИХ КРИВОШИПНО-КОРОМЫСЛОВЫХ МЕХАНИЗМОВ С СИММЕТРИЧНЫМ ЗАКОНОМ ДВИЖЕНИЯ КОРОМЫСЛА	393
ПАПОЯН А.Р., ЧАХАЛЯН А.С. ДИНАМИКА БЫСТРОХОДНОГО РОТОРНОГО УЗЛА С КОМБИНИРО- ВАННЫМИ ОПОРАМИ	401
БАБАЯН С.А. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПО ВИТКАМ РЕАЛЬНОЙ КОНИЧЕСКОЙ РЕЗЬБЫ	409
БЕЛЛУЯН З.А., БЕЛЛУЯН С.З. МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ПОДШИПНИКОВОГО И КОНТАКТНО-ЩЕТОЧНО- ГО УЗЛОВ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ	415
БАБАЯН З.А. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	423
АГБАЛЯН С.Г., ПЕТРОСЯН А.А., АГБАЛЯН А.С., ЗАКАРЯН А.А., ЕЗАКЯН А.О., САФАРЯН В.Г. ПОЛУЧЕНИЕ МАРТЕНСИТНО – СТАРЕЮЩИХ СТАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ $Fe_2O_3 - NiO -$ $CoO - MoO_3$	433
ГЕОДАКЯН Д.А., ПЕТРОСЯН Б.В., СТЕПАНЯН С.В., ВАРДАНИЯН Р.А., ГЕОДАКЯН К.Д. ЛЕГКОПЛАВКИЕ СВИНЕЦСОДЕРЖАЩИЕ СТЕКЛА	441
КАРАПЕТЯН К.А., БАХШЯН А.О., АКОПЯН В.В., ПОГОСЯН А.К. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФРИКЦИОННО- ИЗНОСОСТОЙКИХ СВОЙСТВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ РЯДА НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ	448
МИНАСЯН З.А., МШЕЦЯН Г.С. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ УВЛАЖНЯЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ В ПРОЦЕССЕ ФИКСАЦИИ ФОРМЫ ОБУВИ	455
САРГСЯН Л.Е., ШАХНАЗАРЯН В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОХЛО- РИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ХАЛЬКОПИРИТНОГО КОНЦЕНТРАТА	459
САРКИСЯН В.О., АБРАМЯН О.А. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК РЕК АРМЕНИИ	464

ХАЧАТРЯН В.С., ГРИГОРЯН С.Э.	
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРИРОСТОВ ПОТЕРЬ МОЩНОСТЕЙ ПРИ P-U И P-Q ТИПАХ СТАЦИОННЫХ УЗЛОВ	469
ГНУНИ Т.С.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0.38/0.22 кВ АРМЕНИИ	479
ПОГОСЯН Ш.В., МАЛАКЯН Ц.А., АМИРДЖАНИЯ А.М., ГЕВОРКЯН А.А.	
ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СЦЕНАРИЕВ, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИВОДЯЩИХ К ХОЛОДНОЙ ОПРЕССОВКЕ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-440 ПРИ РАБОТЕ ЭНЕРГОБЛОКА НА МОЩНОСТИ И ГОРЯЧЕМ ОСТАНОВЕ	488
МУРАДЯН А.М., ЕНГИБАРЯН С.Н., АБРААМЯН В.К.	
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕССОВАННЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ	499
АЗАРЯН М.Г	
СПОСОБ И УСТРОЙСТВО МИКРОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ	504
ШАХКАМЯН А.С.	
ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ	510
АВETИСЯН В.Г., МАРКОСЯН М.В., ОГАНЕСЯН А.А., ЭЙРАМДЖЯН С.Г.	
ТЕСТИРОВАНИЕ МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ Сообщение 1. Методика тестирования	516
ТЕРЗЯН А.А., СУКИАСЯН Г.С., ПАРОНИКЯН А.Е.	
ОБ УГЛАХ ТРЕУГОЛЬНОЙ СЕТКИ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	523
СИМОНЯН С.О., АВETИСЯН А.Г., КУЧАТЯН О.С.	
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ НАБЛЮДАЕМОСТИ ЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ	533
ЕГИАЗАРЯН В.С., ПОГОСЯН С.П.	
МИНИМАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ОТ ЧЕТЫРЕХ ПЕРЕМЕННЫХ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СХЕМ	544
БЕРБЕРЯН Г.В., ЖАМАКОЧЯН Д.Г., ДАВИДЯН А.Р.	
К СИНТЕЗУ ИНВЕРСНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ТОЧНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ	553
КАНАЯН Н.С.	
ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ЗАДАЧИ РЮКЗАКА	562

CONTENTS

JAVAKHYAN R.P., MAKHSUDYAN N.A. COMPARATIVE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF PLANAR AND SPHERIC CRANK-AND-ROCKER MECHANISMS PROVIDING A SYMMETRIC LAW OF ROCKER MOTION	393
PAPOYAN A.R., CHAKHALIAN H.S. DYNAMICS OF HIGH-SPEED ROTOR ASSEMBLY WITH COMBINED SUPPORTS	401
BABAYAN S.H. DISTRIBUTION OF REAL CONIC THREADING SPIRE LOAD	409
BELLUYAN Z.A., BELLUYAN S.Z. FAILURE MODELS OF THE BEARING AND BRUSH CONTACT LINKS OF SYNCHRONOUS GENERATORS	415
BABAYAN Z.A. AUTOMATED POLISHER BASED ON AIMS	423
AGHBALYAN S.G., PETROSYAN A.A., AGHBALYAN A.S., ZAKARYAN A.H., EZAKYAN H.H., SAFARYAN V.H. OBTAINING OF MARTENSITO-AGEING STEEL POWDERS AND INVESTIGATION OF COMPLEX OXIDE RECOVERY PROCESS SYNTHESIZED FROM OXIDE SYSTEMS $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{NiO} - \text{CoO} - \text{MoO}_3$	433
GEODAKYAN J.A., PETROSYAN B.V., STEPANYAN S.V., VARDANYAN R.A., GEODAKYAN K.J. LOW MELTING GLASSES WITH PLUMB INSERTION	441
KARAPETYAN K.A., BAKHSHYAN A.O., HAKOBYAN V.V., POGOSIAN A.K. INVESTIGATION OF PHYSICOMECHANICAL, FRICTION AND WEAR-RESISTANT PROPERTIES OF TWO-COMPONENT POLYMERIC COMPOSITES FOR SERIES OF INORGANIC FILLERS	448
MINASYAN Z.A., MSHETSYAN G.S. SELECTION OF MATERIAL FOR MOISTENING MEMBRANE IN FIXATION PROCESS OF FOOTWEAR FORM	455
SARGSYAN L.Ye., SHAHNAZARYAN V.A. INVESTIGATION OF THE TECHNOLOGICAL PARAMETRES OF CHALCOPIRITE CONCENTRATE	459
SARGSYAN V.H., ABRAMYAN H.A. ASSESSMENT OF ECONOMICAL ACTIVITY ON THE MINIMAL FLOW OF ARMENIAN RIVERS	464
KHACHATRYAN V.S., GRIGORYAN S.E. METHOD FOR DEFINING ALLOWABLE RELATIVE GAINS OF CAPACITIES LOSSES AT P-U AND P-Q TYPES OF STATION UNITS	469

GNUNI T.S. INVESTIGATION OF COEFFICIENT VALUES CHARACTERIZING THE DAILY LOAD CURVE IN 0.38/0.22 kV NETWORK OF ARMENIA	479
POGHOSYAN Sh.V., MALAKYAN Ts.H., AMIRJANYAN A.M., GEVORKYAN A.A. PROBABILISTIC ANALYSIS OF ACCIDENTAL SCENARIOS POTENTIALLY LEADING TO COLD OVERPRESSURE FOR WWER-440 TYPE REACTORS DURING POWER OPERATION AND HOT SHUTDOWN	488
MOURADYAN A.M., YENGIBARYAN S.N., ABRAMYAN V.K. ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE PRESSED BICOMPONENT DIELECTRIC SYSTEMS	499
AZARYAN M.H. TECHNIQUE AND DEVICE FOR MICROPOSITIONING	504
SHAGHGAMYAN A.S. HEAT ENERGY MEASUREMENT PECULIARITIES	510
AVETISSYAN V.H., MARKOSYAN M.V., HOVHANNISYAN A.A., EYRAMJYAN S.G. ACTIVE PHASED ARRAY MODULE TESTING Report 1. Testing methodology	516
TERZKYAN H.A., SOUKIASYAN H.S., PARONIKYAN A.E. ON TRIANGULAR MESH ANGLES BUILT FOR FINITE-ELEMENT SOLUTION OF MAGNETIC FIELD PROBLEMS	523
SIMONYAN S.H., AVETISSYAN A.G., KUCHATYAN O.S. DECISION OF OBSERVATION PROBLEM OF NON-AUTONOMOUS LINEAR CONTROL SYSTEMS BASED ON DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS	533
YEGHIAZARYAN V.S., POGHOSYAN S.P. MINIMAL REPRESENTATION OF BOOLEAN FUNCTIONS OF FOUR VARIABLES AND THEIR APPLICATION IN DESIGN AUTOMATION OF DIGITAL CIRCUITS	544
BERBERYAN G.V., ZHAMAKOCHYAN D.G., DAVITYAN A.R. ON SYNTHESIS OF INVERSE FILTERS FOR PRECISE DECOMPOSITION OF THE TIME-SERIES DIRECT TRANSFORMATION RESULTS	553
KANAYAN N.S. AN APPROACH TO SOLVE SOME TYPES OF KNAPSACK PROBLEM	562