

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. ԱՏՈՅԱՆ, **Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ**, **Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ**, **Ս.Ս. ՂԱԶԱՐՅԱՆ**,
Ո.Զ. ՍԱՐԴՈՒԽՅԱՆ, **ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**, **Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ**,
Ս.Հ. ՄԻՍՈՆՅԱՆ, **Ս.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**, **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**, **S.P. DAVTYAN**, **S.M. GHAZARYAN**,
V.Z. MARUKHYAN, **YU.L. SARKISSYAN**, **V.S. SARKISSYAN**,
S.H. SIMONYAN, **M.G. STAKYAN**, **V.S. KHACHATRYAN**

ՏՊԱԳՐՎԱԾ Է ՀԱՐԱՎԱՅԻՆ ԿԱԼԻՖՈՐՆԻԱՅԻ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ ՀԱՅ
ԱՍՊԻՐԱՆՏՆԵՐԻ ԵՎ ՄԱԳԻՍՏՐԱՆՏՆԵՐԻ ԸՆԿԵՐԱԿՑՈՒԹՅԱՆ
ՀՈՎԱՆԱՎՈՐՈՒԹՅԱՄԲ

**ПЕЧАТАЕТСЯ ПРИ СОДЕЙСТВИИ АССОЦИАЦИИ АРМЯНСКИХ АСПИРАНТОВ
И МАГИСТРАНТОВ ЮЖНО-КАЛИФОРНИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**PRINTED BY THE SUPPORT OF USC ARMENIAN GRADUATE STUDENT'S
ASSOCIATION**

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), 2005

G. PETROSYAN, P. BEISS*

THE INVESTIGATION OF PROCESS CONTACT DEFORMATION OF SINTERED PM CYLINDERS

The work concerns to the investigation of the elastic problem of surface contact deformation of two cylinders, from which one is made from Sintered Powder Materials (PM). It is considered that the substance of PM is homogeneous, isotropic and the pores are distributed uniformly. The solution of the problem is realized on the foundation of real mechanical properties of PM and the surface contact theory of H. Hertz. For strength problem solving of PM the conception of equivalent stress for porous material is used. The calculated data show that in case of taking into account a very important factor for PM hydrostatic pressure the place of dangerous point is changed: from inside of usual (pore-free) material to surface for PM.

Keywords: contact deformation, sintered material, strength, design stress, hydrostatic pressure, real mechanical properties.

It is well known that through the methods of Powder Metallurgy sintered materials and machine parts with high physico-mechanical and exploitational properties are obtained. For strength problem solving of PM first of all we must know the complete information about following mechanical properties [1]: Young's, shear and bulk moduli, as well as Poisson's ratio, which depend on relative density of material $\gamma = \rho/\rho_0$, where ρ, ρ_0 are densities of porous and pore-free materials. Then we get the components of stress-strain state of part of machine and use the corresponding strength conditions. The elastic contact deformation process of cylinders from usual material is quite well known: in plane strain case the H. Hertz formulae [2] are used. It is shown in [3] that one can use for fatigue problem solving of PM Hertzian pressure and components of stress state. Accordingly the dangerous point is inside the material and high hydrostatic pressure in case of contact deformation does not play any role. It seems to us that strength problem of contact deformation process of PM is different from the usual material. Therefore, the present work was initiated to solve the problem of contact deformation process of PM cylinders.

The elastic deformation process of two cylinder contacts is examined. One of cylinders was manufactured from usual material, the other - PM with initial porosity v_0 . To define PM cylinder mechanical properties, we use the following formulae [1]:

$$E_2 = E_0(1 - v_0)^{3.4}, \quad \mu_2 = (1 - \mu_0)(1 - v_0)^{0.16} - 1, \quad (1)$$

* RWTH Aachen, Institut für Werkstoffkunde, Augustinerbach 4, 52062 Aachen, Germany

where E_2, E_0 and μ_2, μ_0 are Young's modulus and Poisson's ratio of porous material and substance of PM cylinder.

If $E_0 = 211.6 \text{ kn/mm}^2$, $\mu_0 = 0.288$ [1] and initial porosity of material ν_0 are known from formulae (1), we may define values E_2 and μ_2 . For example, if $\nu_0 = 0.1$ we get $E_2 = 147.9 \text{ kn/mm}^2$, $\mu_2 = 0.266$ and if $\nu_0 = 0.2$ we get $E_2 = 99.1 \text{ kn/mm}^2$, $\mu_2 = 0.243$.

For definition distribution of stresses at axis oz in case of plane strain condition ($\varepsilon_{11} = 0$) the following formulae are used [2]:

$$\sigma_{11} = -2\mu_2 p_0 \left(\left(1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2\right)^{0.5} - \frac{z}{b} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{22} = -p_0 \left(\left(1 + 2\left(\frac{z}{b}\right)^2\right) / \left(1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2\right)^{0.5} - 2\frac{z}{b} \right), \quad (3)$$

$$\sigma_{33} = -p_0 / \left(1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2\right)^{0.5}, \quad (4)$$

where $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ are stresses at direction x, y, z (Fig. 1), p_0 is maximum pressure on the area of contact (if $y = 0$), b is half of contact area width:

$$p_0 = 0.418(2qE_1E_2(R_1 + R_2)/(R_1R_2(R_1 + R_2)))^{0.5}, \quad (5)$$

$$b = 1.075(qR_1R_2(E_1 + E_2)/(E_1E_2(R_1 + R_2)))^{0.5}, \quad (6)$$

q is load at unity length of contact area.

If the values of q , characteristics of materials ν_0, E_1, E_2, μ_2 and radii of R_1, R_2 are known, from formulae (1) – (6), we may define values of $p_0, b, \sigma_{11}, \sigma_{22}$ and σ_{33} , which allow us to determine the effective σ_i and average or hydrostatic σ_0 stresses

$$\sigma_i = (0.5((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2))^{0.5}, \quad (7)$$

$$\sigma_0 = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3. \quad (8)$$

They play a very important role for the process of plastic deformation and strength analysis of porous material.

It is convenient to introduce the problem solving by dimensionless values. So, the following denotations $\bar{\sigma}_{11} = \sigma_{11}/p_0$, $\bar{\sigma}_{22} = \sigma_{22}/p_0$, $\bar{\sigma}_{33} = \sigma_{33}/p_0$, $\bar{\sigma}_i = \sigma_i/p_0$, $\bar{\sigma}_0 = \sigma_0/p_0$ are given. For strength problem solving of sintered PM the conception of equivalent stress for porous material σ_{eq} is used [4], taking into account initial porosity of material ν_0 , effective σ_i and average σ_0 stresses. The

formulae for the definition of dimensionless design stress value $\bar{\sigma}_d = \overline{\sigma_{eq}}$ and limit conditions are introduced as follows:

$$\bar{\sigma}_d = \sigma_d / p_0 = (\bar{\sigma}_i^2 + 9\alpha_0^m \bar{\sigma}_0^2)^{0.5} / \beta_0^{n+0.5} = \sigma_y / p_0, \quad (9)$$

where σ_y – yield stress, m and n - parameters of real porosity of sintered PM, α_0 and β_0 are the values of α and β porosity functions in case of initial porosity of material is v_0 [4].

Different formulae for definition of values of α_0 and β_0 are known. Very simple functions of porosity are given in [5]:

$$\alpha_0 = v_0, \beta_0 = 1 - v_0. \quad (10)$$

In [5] for different initial porosity sintered steel, which contains the components Ni(4%), Cu(1.5%) and Mo(0.5%) in case of using the formulae (10), the main values of m and n parameters are determined equal to $m = 1.1$ and $n = 1.4$.

For usual material $v_0 = 0$; $\mu = 0.3$; $\alpha_0 = 0$; $\beta_0 = 1$ and from formula (9) we obtained

$$\bar{\sigma}_d = \bar{\sigma}_i.$$

The dimensionless calculated values of stress state components $\bar{\sigma}_{ij}$, effective $\bar{\sigma}_i$, average $\bar{\sigma}_0$ and design $\bar{\sigma}_d$ stresses for usual ($v_0 = 0$; $\mu = 0.3$) and porous ($v_0 = 0.1$; $\mu_2 = 0.266$; $v_0 = 0.2$; $\mu_2 = 0.243$ and $m=1.1$; $n=1.4$) material are given in Table.

The components of stress state $\bar{\sigma}_{ij}$, values of $\bar{\sigma}_i$ and $\bar{\sigma}_0$ alteration sheets at axis oz in case of $v_0 = 0.1$ are shown in Fig. 1.

Table

Values of stress state components for different v_0 of PM ($m = 1.1$, $n = 1.4$)

$\frac{z}{b}$	$-\bar{\sigma}_{22}$	$-\bar{\sigma}_{33}$	$v_0 = 0, \mu = 0.3$			$v_0 = 0.1, \mu_2 = 0.266$ $\alpha^m = 0.08, \beta^{n+0.5} = 0.8$				$v_0 = 0.2, \mu_2 = 0.243$ $\alpha^m = 0.17, \beta^{n+0.5} = 0.65$			
			$-\bar{\sigma}_{11}$	$-\bar{\sigma}_0$	$\bar{\sigma}_i, \bar{\sigma}_d$	$-\bar{\sigma}_{11}$	$-\bar{\sigma}_0$	$\bar{\sigma}_i$	$\bar{\sigma}_d$	$-\bar{\sigma}_{11}$	$-\bar{\sigma}_0$	$\bar{\sigma}_i$	$\bar{\sigma}_d$
0	1.00	1.00	0.60	0.87	0.40	0.53	0.84	0.46	1.04	0.49	0.83	0.51	1.8
0.2	0.66	0.98	0.49	0.71	0.42	0.44	0.69	0.47	0.92	0.40	0.68	0.50	1.5
0.4	0.43	0.93	0.41	0.58	0.51	0.36	0.57	0.54	0.88	0.33	0.56	0.56	1.4
0.6	0.27	0.86	0.34	0.49	0.55	0.30	0.48	0.57	0.86	0.27	0.47	0.59	1.3
0.8	0.19	0.79	0.29	0.42	0.56	0.26	0.41	0.56	0.81	0.24	0.41	0.58	1.2
1.0	0.13	0.71	0.25	0.36	0.53	0.22	0.35	0.54	0.75	0.20	0.35	0.55	1.1
1.2	0.09	0.64	0.22	0.32	0.50	0.19	0.31	0.51	0.70	0.18	0.30	0.51	1.0

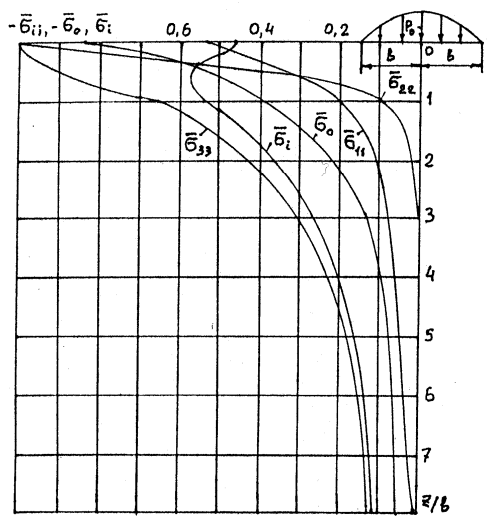


Fig. 1. The sheets of component alteration of elastic stress state $\bar{\sigma}_{ij}, \bar{\sigma}_i$ and $\bar{\sigma}_0$ at axis oz in case of $\nu_0 = 0.1$

dangerous, where $(\bar{\sigma}_d)_1^{\max} = 0.56$. For porous materials $\nu_{02} = 0.1$ (2) and $\nu_{03} = 0.2$ (3) the external points b and c , where $(\bar{\sigma}_d)_2^{\max} = 1.036$ and $(\bar{\sigma}_d)_3^{\max} = 1.76$ correspondingly are dangerous.

Thus, for PM the dangerous point from inside (if $\nu_0 = 0$) moves on the surface of material, where the maximum contact pressure p_0 acts. The comparison of curves in Fig. 2 show that for high porosity material the maximum design stress becomes greater. It is the result of the high hydrostatic pressure and functions of porosity α and β . Consequently, for high porosity materials the values p_0 in accordance with (9) will be less.

The calculated data of Table and Fig. 1 show that the components of $\bar{\sigma}_{ij}$ and $\bar{\sigma}_0$ quickly decrease at axis oz. The effective stress $\bar{\sigma}_i$ in the zone $z/b = 0.8$ is maximum, that is why dangerous point for usual material is present.

In case of PM the values of Poisson's ratio μ , absolute values of the first principal $|\bar{\sigma}_{11}|$ and average $|\bar{\sigma}_0|$ stresses, as compared with the usual material decrease, while the values of effective stress $\bar{\sigma}_i$ increase.

The design stress alteration sheets at axis oz for different initial porosity of material are shown in Fig. 2. Since the maximum design stress $(\bar{\sigma}_d)^{\max}$ acts in the dangerous points of material, we may define the places of dangerous points and their values $(\bar{\sigma}_d)^{\max}$ (Fig. 3). For usual material $\nu_{02} = 0$ (curve 1) the internal point a is

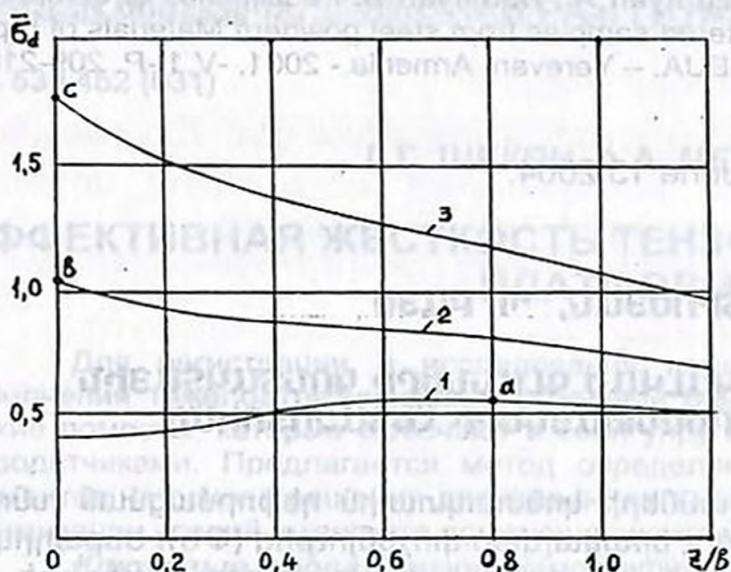


Fig. 2. The sheets of alteration of dimensionless design stress $\bar{\sigma}_d$ for different porosity of material. Curve 1 - $\nu_0 = 0$; 2 - $\nu_0 = 0.1$; 3 - $\nu_0 = 0.3$

material ν_0 , effective $\bar{\sigma}_i$ and average $\bar{\sigma}_0$ stresses. It is shown that in case of PM the values of Poisson's ratio μ , absolute values of the first principal $|\bar{\sigma}_{11}|$ and average $|\bar{\sigma}_0|$ stresses decrease, while the value of effective stress $\bar{\sigma}_i$ increases, and then decreases. Based on the conception of equivalent stress $\bar{\sigma}_{eq}$ the place of dangerous point of PM is found, where $\bar{\sigma}_d = \bar{\sigma}_{eq}$ is maximum. For pore-free cylinder the dangerous point is inside the material. For PM cylinder the place of the dangerous point moves on the surface, where maximum contact pressure p_0 acts.

The article has been done within the framework of the DAAD program.

REFERENCES

1. Beiss P., Sander C. Elastic properties of sintered iron and steel// 1998 PM World Congress. Microstructure.- Shrewsbury, EPMA.- 1998.- V.2.- P. 552-561.
2. Demidov S. P. Theory of elasticity.- Moscow, Higher Institution.- 1979.- 432 p. (in Russian).
3. Cetin Morris Sonsino, Klaus Lipp. Rolling contact fatigue properties of selected PM for gear-box applications.-1999. Society of Automotive Engineers. Inc., USA. - P. 43-54.
4. Petrossian G. L. Plastic deformation of PM.- Moscow: Metallurgy.-1988. - 153 p. (in Russian).

Summary. The elastic problem of surface contact deformation of two cylinders is investigated and one of them was manufactured from sintered PM. The initial porosity of material ν_0 is taken into account. The real mechanical properties of materials are used. The plane strain case of elastic deformation is examined, for which the H.Hertz formulae are used. For strength problem solving of sintered material the conception of equivalent stress for porous material $\bar{\sigma}_{eq}$ is used, taking into account initial porosity of

5. **Petrosyan G., Beiss P. Hambardzumyan A., Badalyan H.** Peculiarities of deformation diagram construction of porous sintered samples from steel powder// Materials of reports of annual scientific conference of SEUA. – Yerevan, Armenia.- 2001, -V.1.-P. 209-210 (in Russian).

SEUA. The material is received on June 15.2004.

Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Պ. ԲԱՅՍ

**ՓՈՇԵՆՑՈՒԹԵՐԻՑ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԳԼԱՆԵՐԻ ԿՈՆՏԱԿՏԱՅԻՆ
ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆ ԳՈՐԾԸԹԱՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Հետազոտված են երկու գլանների կոնտակտային դեֆորմացման խնդիրները, որոնցից մեկը պատրաստված է եռակալված փոշեկոշիկից (ՓՆ): Ենթադրվում է, որ ՓՆ-ի հիմնանյութը համասեռ է, իզոտրոպ և ծակոտիները բաշխված են հավասարաչափ: Խնդրի լուծումը իրականացվում է ՓՆ-ի իրական մեխանիկական հատկությունների և Հ. Հերցի գլանային մակերևույթների կոնտակտային տեսության հիման վրա: ՓՆ-ի ամրության խնդիրներ լուծելու համար օգտագործվել է ծակոտկեն նյութերի համար համարժեքային լարման գաղափարը: Հաշվարկային տվյալները ցույց են տվել, որ այն դեպքում, երբ հաշվի ենք առնում ՓՆ-ի համար շատ կարևոր գործոն՝ հիդրոստատիկ ճնշումը, նյութի վտանգավոր կետի դիրքը փոխվում է՝ ներսից (սովորական նյութի համար) տեղափոխվում է դեպի մակերևույթը (ՓՆ-ի համար):

Г.Л. ПЕТРОСЯН, П. БАЙС

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ ЦИЛИНДРОВ**

Проведено исследование задач контактного деформирования двух цилиндров, один из которых изготовлен из спеченных порошковых материалов (ПМ). Принимается, что вещество ПМ однородное, изотропное и поры распределены равномерно. Решение задачи осуществляется на основании реальных механических характеристик ПМ и контактной теории цилиндрических поверхностей Герца. Вводится понятие эквивалентного напряжения для пористых материалов. Расчетные данные показывают, что в случае, когда учитывается гидростатическое давление, изменяется положение опасной точки материала: изнутри для обычных материалов перемещается на поверхность для ПМ.

Г.Г. ШЕКЯН, А.А. МЕЛКОНЯН

ЭФФЕКТИВНАЯ ЖЕСТКОСТЬ ТЕНЗОДИНАМОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Для регистрации и исследования изменения силовых характеристик при выполнении тяжелоатлетических упражнений обычно используют тензодинамографические помосты, которые включают в себя упругие элементы с приклеенными на них тензодатчиками. Предлагается метод определения оптимальной жесткости упругих элементов на основе решения дифференциального уравнения движения платформы и оптимизации усилий штангиста по отношению к поднимаемому весу.

Ключевые слова: тензодинамографическая платформа, тяжелоатлетические упражнения, оптимальная жесткость.

Техника тяжелоатлетических упражнений давно стала объектом исследования специалистов. Для изучения техники упражнений использовались различные методы, в частности, широкое применение получили динамографические, а позже метрические методы.

Для регистрации силовых характеристик выполняемых упражнений в платформу вводятся чувствительные элементы – стальные упругие кольца, изменения деформаций которых эквивалентны изменениям усилий, прилагаемых на платформу. Соответствие регистрируемых параметров на экспериментируемом помосте с действительными параметрами упражнений, проводимых на реальных помостах, зависит от правильного подбора жесткости стальных упругих колец. Однако в существующей литературе отсутствует методика выбора оптимальных параметров чувствительных элементов.

В настоящей работе предлагается методика определения жесткости упругих элементов колец тензодинамографической платформы в случае использования ее для регистрации вертикальной составляющей опорных реакций при выполнении тяжелоатлетических упражнений. Рассмотрим случай, когда тяжелоатлет выполняет рывок.

В рывке одной из основных фаз является срыв от платформы. Поскольку длительность основной фазы рывка достаточно короткая, то процесс рассматривается как ударный. Воздействие импульса ускорений во время основной фазы рывка на платформу имеет колебательный характер. Из экспериментальных исследований следует, что на основание платформы действует импульс силы (или ускорение) синусоидальной формы, который можно описать выражением [1]

$$\ddot{Z}_1 = j_k \sin pt, \quad 0 < t < t_u = \pi/p,$$

где p – условная частота импульса, равная $p = \pi/t_u$; j_k – максимальное ускорение платформы; t_u – длительность основной фазы.

Дифференциальное уравнение движения платформы можно представить в виде [3]

$$m\ddot{Z} + cZ = cZ_1, \quad (1)$$

где Z - смещение платформы относительно неподвижной оси; Z_1 - смещение штанги относительно этой же оси; m - суммарная масса атлета, штанги и платформы; c - жесткость тензодинамографической платформы.

Продифференцировав дважды выражение (1) по времени, получим

$$m\ddot{\ddot{Z}} + c\ddot{Z} = c\ddot{Z}_1. \quad (2)$$

Подставляя в (1) значения $\ddot{\ddot{Z}} = \ddot{j}$, $\ddot{Z} = j$, где j - ускорение платформы, получим

$$mj + cj = c\ddot{Z}_1. \quad (3)$$

Если подставить в (1) вместо $\ddot{Z}_1$ его выражение $\ddot{Z}_1 = j_k \sin pt$, то найденное решение будет действительно только для моментов времени, находящихся в пределах длительности импульса, т.е. для $0 < t < t_u$. Но так как нас интересует также движение платформы в последующем за моменты времени t_u , то $\ddot{Z}_1$ необходимо выразить в виде такой функции времени, в которой аргумент может изменяться от 0 до ∞ . Такую возможность обеспечивает

операторный метод. Уменьшение функции на оператор сдвига $e^{\frac{-\pi s}{p}}$, как известно [2], вызывает смещение графика функции на длину π/p в положительном направлении оси времени. Если сложить несмещенную функцию со смещенной, то получится функция, удовлетворяющая поставленным требованиям и имеющая вид одиночного импульса для $0 < t < \infty$.

Подставляя полученную функцию вместо $\ddot{Z}_1$ в (3), получим уравнение движения массы платформы с тяжелоатлетом для любого момента времени при подъеме (рывке) штанги:

$$mj + cj = c \left(1 + e^{\frac{-\pi s}{p}} \right) j_k \sin pt. \quad (4)$$

Учитывая начальные условия $\ddot{j}(0) = 0$; $j(0) = 0$, уравнение (4) в изображениях можно представить в виде [4]

$$ms^2 j + cj = cj_k \left(1 + e^{\frac{-\pi s}{p}} \right) \sin pt, \quad (5)$$

где s - оператор Лапласа.

Из (5) имеем

$$j = \frac{c j_k p \left(1 + e^{\frac{-\pi s}{p}} \right)}{(s^2 + p^2)(ms^2 + c)} = \frac{j_k \omega^2 p \left(1 + e^{\frac{-\pi s}{p}} \right)}{(s^2 + p^2)(s^2 + \omega^2)}, \quad (6)$$

где $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – собственная частота колебания платформы на упругих кольцах.

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \frac{j_k \omega^2 p}{(s^2 + p^2)(s^2 + \omega^2)} &\rightarrow j_k \omega \frac{p \sin \omega t - \omega \sin p t}{p^2 - \omega^2}, \\ \frac{j \omega^2 p e^{\frac{-\pi s}{p}}}{(s^2 + p^2)(s^2 + \omega^2)} &\rightarrow j_k \omega \left[\frac{p \sin \left(1 - \frac{\pi}{p} \right) - \omega \sin \left(t - \frac{\pi}{p} \right)}{p^2 - \omega^2} \right] = \\ &= j_k \omega \left[\frac{(1 + \cos \omega t_u) \sin \omega t - \sin \omega t_u \cos \omega t}{p^2 - \omega^2} \right] = \\ &= j_k \omega \left(\frac{p \sin \omega t \cos \omega t_u - p \cos \omega t \sin \omega t_u - \omega \sin p t}{p^2 - \omega^2} \right), \end{aligned}$$

получим в оригиналах

$$j = \frac{j_k \omega p}{p^2 - \omega^2 \sqrt{2(1 + \cos \omega t_u)}} \sin \left(\omega t - \frac{\omega t_u}{2} \right), \quad (7)$$

так как $\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin \omega t_u}{1 + \cos \omega t_u} = \operatorname{tg} \left(-\frac{\omega t_u}{2} \right)$, $\theta = -\frac{\omega t_u}{2}$.

Из (7) следует, что максимальное ускорение штанги будет

$$j_{\max} = \frac{j_k \omega p}{p^2 - \omega^2} \sqrt{2(1 + \cos \omega t_u)} \text{ при } t_{\max} = \frac{\pi}{2\omega} + \frac{t_u}{2}.$$

Коэффициент динамичности, который в процентах эквивалентен проценту усилий штангиста от поднимаемого веса в основной фазе, можно выразить соотношением

$$\eta = \frac{j_{\max}}{j_k} = \frac{\omega p}{p^2 - \omega^2} \sqrt{2(1 - \cos \omega t_u)}.$$

Из выражения (6) видно, что η принимает свое максимальное значение при $p/\omega \leq 1$. Это решение говорит о том, что чем выше собственная частота, а в силу этого и жесткость тензодинамографического помоста, тем меньше будет искажение контролируемых параметров.

Однако введение дополнительных элементов, необходимых для контроля исследуемых процессов, безусловно, уменьшает жесткость системы.

Из выражения (8) видно, что при значении ω выше 80 Гц коэффициент динамичности η незначительно отличается от своего максимума.

В качестве примера для экспериментируемой тензодинамографической платформы выбрана суммарная эффективная жесткость чувствительных элементов (кольцевых пружин) порядка $c = 5,6 \cdot 10^8$ Н/м, что соответствует собственной частоте 80...90 Гц.

Собственная частота экспериментируемой тензодинамографической платформы определялась на вибростенде ВЭДС-1500 с двумя вибродатчиками типа КД-13, прикрепленными один на столе вибростенда, другой – на платформе. При совпадении частоты вибростенда с собственной частотой платформы эллипс, полученный лучом на экране осциллоскопа, поворачивался на 90°. Экспериментально определенная собственная частота тензодинамографической платформы незначительно отличается от расчетной и равняется 90 Гц.

При весе тензодинамографической платформы 140 кг (что имеем в нашем случае), весе штангиста 80 кг, штанги 120 кг, длительности подрыва t_u и суммарной жесткости чувствительных элементов $c = 5,6 \cdot 10^8$ Н/м процент усилия от поднимаемого веса (коэффициент динамичности в процентах), рассчитанный по предлагаемой методике, составляет 195%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний. -М.-Л., 1973. - 376 с.
2. Микусинский Я. Операторные исчисления. -М.: ИЛ, 1986. – 226 с.
3. Крендель С. Случайные колебания. -М.: Мир, 1967. - 346 с.
4. Шекян Г.Г. К вопросу о выборе оптимальной жесткости упругих опор и их расчет // Материалы IV н/т конф. -Ереван, 1971. - С.27-35.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.06.2004.

Հ.Հ. ՇԵԿՅԱՆ, Ա.Ա. ՄԵԼԿՈՆՅԱՆ ՏԵՆԶՈԴԻՆԱՄՈԳՐԱՖԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐԺԱԿԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԿՈՇՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Վարժություններ կատարելիս ծանրամարտիկներն ուժի փոփոխության բնութագրերի գրառման համար սովորաբար օգտագործում են տենզոսովիչներով առաձգական էլեմենտներ պարունակող տենզոդինամոգրաֆիկական հարթակ: Առաջարկված է առաձգական էլեմենտների կոշտությունների լավարկված որոշման եղանակ, որը հիմնված է հարթակի շարժման դիֆերենցիալ հավասարման լուծման և բարձրացվող բեռի նկատմամբ մարզիկի ուժի լավարկման վրա:

G.G. SHEKYAN, A.A. MELKONYAN EFFECTIVE RIGIDITY OF STRAIN DYNAMO MICROGRAPHY PLATFORM

To register and study variations of force characteristics in doing weight lifting exercises, strain dynamo micrography platforms containing elastic elements with bonded to them strain gauges are used. A method for defining optimal rigidity of elastic elements based on differential equation of platform motion and optimization of weightlifter efforts towards lifting the weight is proposed.

А.И. САГРАДЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ УСАДКИ СТРУЖКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ РЕЗЦАМИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследована зависимость коэффициента усадки от режимов резания V, S, t при обработке сталей различных марок и титанового сплава в широком интервале изменения параметров этих режимов. Выявлено, что коэффициент усадки зависит от физико-механических свойств обрабатываемых материалов, а также от склонности к схватыванию этих материалов в контакте с резцом. Показано непосредственное влияние режимов возникновения нароста на величину коэффициента усадки.

Ключевые слова: резец, режимы резания, стружка, нарост, коэффициент усадки.

Исследование усадки стружки имеет большое научно-практическое значение для объяснения явлений, происходящих при пластических деформациях на контактных поверхностях в процессе резания.

Режимы резания оказывают существенное влияние на процессы, происходящие в зоне резания, в частности, на усадку стружки, силу, температуру, вибрации и т.д. Они, в конечном счете, определяют стойкость и работоспособность инструмента. Влияние режимов резания на процессы в зоне резания является переменным при изменении свойств и состава обрабатываемого и инструментального материалов. Усадка является внешним выражением той пластической деформации, которая сопровождает образование стружки, но величина усадки не всегда может точно выражать степень деформации. Она зависит от угла резания и коэффициента трения на передней поверхности инструмента, т.е. от направления равнодействующей силы.

Как указано в [1-3], силы резания тесно взаимосвязаны с усадкой стружки.

Исследование усадки стружки осуществлялось для четырех инструментальных материалов (B14M7K25, B11M7K23, P9K5 и P18) при точении стали 45, а также одним инструментальным материалом (B14M7K25) - сталей 45, 2X13, P18 и титанового сплава BT5. При этом режимы резания менялись в пределах, указанных в табл. 1. Эксперименты проводились на станке 1K62, оснащенном вариатором ВР-1. Усадка сходящей стружки исследуемых материалов определялась двумя методами: по длине и весовым методом. Более точным оказался второй метод, который был использован при определении усадки для всех материалов:

$$G = a_c b_c L_c \rho \cdot 10^{-3}, \quad K_L = G \cdot 10^3 / L_c \rho a b \quad \text{или} \quad K_L = G \cdot 10^3 / L_c \rho S t.$$

На рис.1 приведены результаты исследования усадки ξ в зависимости от скорости резания. Как видно, на изменение скорости резания наиболее

интенсивно реагирует величина усадки при обработке сталей 45 и 2Х13. С повышением механических свойств обрабатываемых материалов эта интенсивность уменьшается.

Таблица 1

Режимы резания при точении различных обрабатываемых материалов
резцами из В14М7К25

Режимы резания	Сталь 45	2Х13	Р18	ВТ5
$V, \text{м/мин}$	10...100	10...120	5...50	5...50
$S, \text{мм/об}$	0,12...0,95	0,12...0,70	0,12...0,95	0,12...0,70
$t, \text{мм}$	0,5...4,0	0,5...4,0	0,5...3,5	0,5...3,5

Наиболее сложный характер в контакте взаимодействующих пар инструмент – обрабатываемая деталь обнаружен при резании сталей 45, 2Х13 и Р18. Здесь видно существование явления наростообразования в области определенных зон скоростей для различных обрабатываемых материалов. При этом уменьшение величины усадки, по-видимому, связано с увеличением нароста с одновременным увеличением фактического переднего угла и явлений, вытекающих отсюда (угол сдвига, температура и т.д.).

Если при исследовании изменения усадки в зависимости от скорости при точении стали 45 ξ имеет экстремальный характер классического типа, то несколько иначе выглядят кривые при точении сплавов 2Х13 и Р18. На этих кривых (рис. 1) в исследуемых диапазонах скоростей обнаружены только максимальные точки.

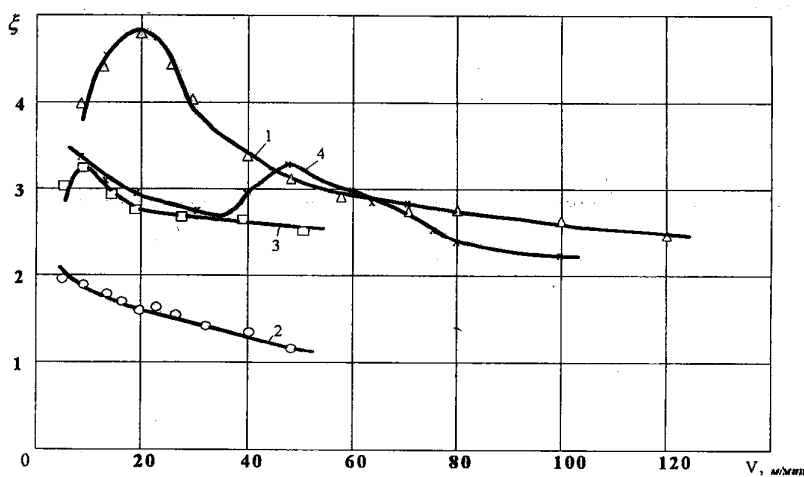


Рис. 1. Зависимость усадки стружки от скорости резания ($S = 0,3 \text{ мм/об}$, $t = 2 \text{ мм}$) при обработке материалов резцами из быстрорежущего сплава В14М7К25: 1 – 2Х13, 2 – ВТ5, 3 – Р18, 4 – сталь 45

Минимальные значения, вероятно, существуют, но они смещены в зону малых скоростей и находятся за пределами исследуемого диапазона скоростей. Только при точении титанового сплава BT5, у которого наростообразование отсутствует из-за слишком низкого модуля упругости, кривая $\xi = f(V)$ имеет монотонно убывающий характер с увеличением скорости резания.

Усадка стружки при точении стали 45 различными инструментальными материалами со скоростью резания 60-минутной стойкости практически одинакова и находится в пределах 2,9...3,0 (табл. 2).

Таблица 2

Усадка стружки при скорости резания, равной
скорости 60-минутной стойкости

Материал резца	B14M7K25	B11M7K23	P9K5	P18	B14M7K25		
Обработ. материал	Сталь 45				2X13	P18	BT5
Оптимальная скорость, м/мин	65	63	45	45	80	17,5	20,5
Усадка, ξ	2,90...2,95	2,95	2,85...2,9	2,9...3,0	2,6...3,0	2,96...3,05	1,57

Если построить графики усадки стружки от режимов резания в двойной логарифмической системе координат (рис.2) и произвести обработку экспериментальных данных, можно получить зависимости в виде

$$\xi = C_{\xi} V^{z_{\xi}} S^{y_{\xi}} t^{x_{\xi}}. \quad (1)$$

Эти степенные зависимости хотя и не дают точного изменения усадки в соответствии с изменением, например, скорости резания, но могут быть использованы для оценки степени влияния параметров режимов резания на деформационное состояние стружки и силы резания.

Как видно из табл. 3, наибольшее влияние на усадку стружки оказывает скорость резания, причем при резании стали 45 это влияние наиболее значительно.

Таблица 3

Коэффициенты C_{ξ} и показатели z_{ξ} , y_{ξ} , x_{ξ} при точении различных
обрабатываемых материалов резцами из B14M7K25

Обработ. материал		Сталь 45	2X13	P18	BT5
Коэффициент	C_{ξ}	97,4	20,2	43,3	45,5
Показатели степени	z_{ξ}	-0,95	-0,53	-0,23	-0,41
	y_{ξ}	-0,41	-0,34	-0,20	-0,16
	x_{ξ}	-0,03	-0,04	-0,01	-0,007

Согласно опытным данным, подача влияет на усадку стружки больше, чем глубина резания, так как с изменением подачи при постоянной скорости резания температура повышается больше, чем с изменением глубины резания.

Это повышение влечет за собой снижение коэффициента трения и соответствующее уменьшение усадки стружки.

С изменением глубины резания в исследованном диапазоне при постоянных V, S усадка стружки практически не меняется (рис.2).

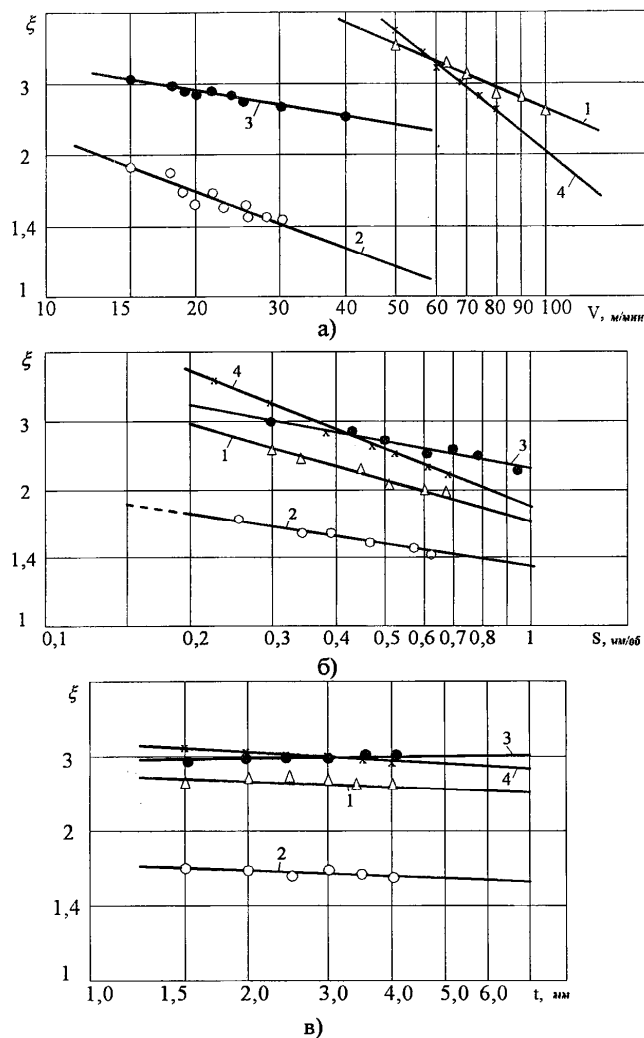


Рис.2. Зависимость усадки от режимов резания при обработке материалов резцами из В14М7К25: а – $\xi = f_1(V)$ при $S = 0,3 \text{ мм/об}$, $t = 2 \text{ мм}$; б – $\xi = f_3(S)$ при $t = 2 \text{ мм}$ и $V_1, V_2, V_3, V_4 = 80,0; 20,5; 17,5; 65 \text{ м/мин}$; в – $\xi = f_2(t)$ при $S = 0,3 \text{ мм/об}$ и аналогичных значениях $V_1, \dots, V_4$. Материалы: 1 – 2Х13, 2 – ВТ5, 3 – Р18, 4 – сталь 45

Анализ результатов исследований показывает, что:

- усадка стружки при точении резцами из сплава В14М7К25 материалов разных классов (стали 45, 2Х13, Р18 и сплав ВТ5) в диапазоне исследуемых скоростей меняется в зависимости от области наростообразования для каждой пары резец-обрабатываемая деталь. Это объясняется различной склонностью к схватыванию и реальными условиями контакта взаимодействующих пар;
- наблюдаемое резкое различие в величинах усадки стружки при точении сталей 45, 2Х13, Р18 и титанового сплава ВТ5 резцами из сплава В14М7К25 объясняется, наряду с разными физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов, также различной склонностью к взаимному схватыванию обрабатываемого и инструментального материалов;
- при точении стали 45 резцами из различных инструментальных материалов при соответствующих режимах резания величины усадки меняются незначительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз. 1979. – 368с.
 2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Машиностроение, 1985. – 358с.
 3. Христафорян С.Ш. О процессе резания материалов как самоорганизующейся структуре по переработке вещества // Изв. НАН и ГИУА. Сер. ТН. – 1999. – Т.52, №2. – С. 145-151.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 01.02.2005.

Ա.Ի. ՍԱՀՐԱԴՅԱՆ

ՏԱՇԵՂԻ ԿՕՎՍԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՏԱՐԲԵՐ ԳՈՐԾԻՔԱՆՅՈՒԹԵՐՈՎ ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ԵՎ
ՀԱՄԱՁՈՒՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԴԵՊԵՆԴԵՆՍԻԱ

Հետազոտված է տարբեր գործիքանյութերով պողպատների և տիտանի համաձուլվածքի մշակման ժամանակ կտրման ռեժիմների փոփոխման լայն միջակայքում կծկման գործակցի կախումը V , S , t կտրման ռեժիմներից: Պարզվել է, որ կծկման գործակիցը կախված է մշակվող նյութերի ֆիզիկամեխանիկական հատկություններից, ինչպես նաև գործիքանյութի և մշակվող նյութի կոնտակտում փոխադարձ կապակցման հավակնությունից: Ստացված արդյունքներով տրված է կծկման գործակցի արժեքի վրա մակաճի առաջացման ռեժիմների ուղղակի ազդեցությունը:

A. I. SAGRADYAN

CHIP SHRINKAGE STUDY IN STEEL AND ALLOY MACHINING BY CUTTERS MADE
FROM TOOL MATERIALS

Shrinkage factor dependence on cutting conditions V , S , t in machining different steel quality and titanium alloys during a large range of changing parameters of these conditions is studied. It is revealed that the shrinkage factor depends on physical and mechanical properties of materials to be machined as well as on tendency to grip these materials in contact with the cutter. Immediate influence of arising cut conditions on the shrinkage factor value is shown.

С.П. МАНУКЯН

ИНЖЕНЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОБЩЕГО МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ В ШАРИКОВЫХ ПОДШИПНИКАХ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ УПРУГИМ ГИСТЕРЕЗИСОМ

Рассматриваются вопросы определения одной из составляющих общего момента сопротивления качению в шариковых подшипниках, обусловленной упругим гистерезисом. В шарикоподшипниках гистерезисные потери являются наибольшими из составляющих общего момента сопротивления и основным источником тепловыделения в подшипниках качения. Величиной этого выделенного тепла обусловлены надежность и долговечность подшипников.

Ключевые слова: шариковый подшипник, упругий гистерезис, инженерная модель, общий момент сопротивления качению.

До начала реального процесса качения соприкасающихся и взаимно перемещающихся тел под действием нагрузки происходит сближение (упругая деформация) соприкасающихся поверхностей в местах контакта, и практически качение происходит в упруго-деформированном состоянии этих поверхностей, вследствие чего появляются контактные пятна определенных форм и размеров между сжатыми и катящимися телами вместо условных точек или линий контактов, которые рассматриваются при качении абсолютно твердых тел.

В подшипниках качения при движении шарика по желобу все время происходит нагружение и разгрузка тел качения и желобов колец в местах контакта. При нагружении и последующем снятии напряжения, что характерно для элементов подшипников качения, в металлах возникает упругий гистерезис, даже при напряжениях, намного меньших напряжения предела упругости, что объясняется несовершенством упругих свойств материалов.

В [1, 2] и др. было показано, что реальные тела качения обладают несовершенными упругими свойствами, вследствие чего процесс деформирования слоев материала в зоне контакта при их нагружении и разгрузении протекает неодинаково, образуя известную петлю упругого гистерезиса.

Явление гистерезиса объясняется внутренним вязким трением частиц материала в зоне деформации, упругим последствием и другими факторами реологического характера. Внутреннее трение возникает вследствие непрерывного изменения деформаций и напряженного состояния поверхностных слоев тела качения, так как при движении за нагружением элементов следует их разгрузение [4].

Экспериментальные и теоретические исследования [1-3] установили зависимость сил трения от гистерезисных потерь, которые составляют постоянную долю α от всей затраченной работы на упругое деформирование (сжатие) контактирующих поверхностей при качении сферы или цилиндра по другой поверхности.

Если обозначить работу упругой деформации при качении на единицу пути через Φ и умножить ее на α , то получим величину работы, затраченной при качении на единицу пути. Численно эта величина равна силе сопротивления качению F [2] и определяется выражением

$$F = \alpha \Phi, \quad (1)$$

где α - коэффициент потерь на упругий гистерезис; Φ - работа, затраченная на упругую деформацию контактирующих поверхностей на единицу пути качения.

При определении работы упругой деформации, затрачиваемой шариком при качении, влиянием касательной силы, действующей в направлении качения, можно пренебречь, так как оно незначительно сказывается на результатах расчетов [2, 5].

Для определения работы упругой деформации при качении жесткой сферы (шарика) по прямой канавке на единицу пути в [2] приведена формула

$$\Phi = \frac{3}{16} \frac{Pb}{R}, \quad (2)$$

где Φ - работа упругой деформации на единицу пути качения; P - нагрузка на шарик; b - малая полуось контактного эллипса.

Формула (2) справедлива, когда шарик принимается как жесткое тело (не деформируемое по сравнению с контртелом - кольцом) и деформируется только контртелом [2]. Если шарик не абсолютно жесткий, то общая работа расходуется на деформацию как шарика, так и контртела, что не учтено в работе [6], и полученная окончательная формула неверна, так как неполностью определяет общую величину сопротивления качению, обусловленного упругим гистерезисом.

Чтобы учесть и деформацию шарика и получить полную величину гистерезисных потерь в шарикоподшипнике, нужно в (2) подставить значение b , выраженное через упругие константы (E, μ) шарика и контртела на основании формулы Герца и теории упругости [7].

Под радиальной нагрузкой зона контакта шарика с тороидальным желобом кольца подшипника представляет собой эллипс с большой полуосью a и малой полуосью b (рис.1). В наших обозначениях выражения для a и b имеют вид [7,8]

$$a = n_a \cdot \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \cdot \frac{P(K_1 + K_2)}{A + B}}, \quad (3)$$

$$b = n_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \cdot \frac{P(K_1 + K_2)}{A + B}}, \quad (4)$$

где P - сжимающая сила (нагрузка на шарик); K_1, K_2 - коэффициенты: $K_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}$;

$K_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}$; μ_1 и μ_2 - коэффициенты Пуассона для шарика и контртела (кольца); A и

B - постоянные, зависящие от величины главных

кривизн соприкасающихся поверхностей и от угла между плоскостями главных кривизн для этих поверхностей.

Согласно [8] :

$$A + B = \frac{1}{2} \sum \rho = \frac{1}{2} (\rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}), \quad (5)$$

где $\rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{21}, \rho_{22}$ - радиусы главных кривизн соприкасающихся тел в начальной точке касания шарика с желобом в двух главных плоскостях. Эти плоскости в подшипниках качения обычно перпендикулярны друг другу.

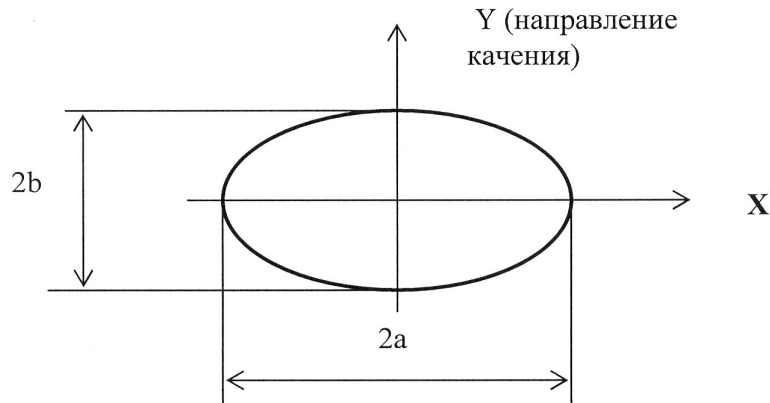


Рис. 1. Эллипс контакта шарика по желобу кольца подшипника

Если принять $E_1 = E_2 = E$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, что вполне допустимо для шарикоподшипников, получим [8]

$$a = n_a \cdot \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)}{E \sum \rho} P}, \quad (6)$$

$$b = n_b \cdot \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)}{E \sum \rho} P}, \quad (7)$$

где n_a и n_b - коэффициенты, являющиеся числами, зависящими от вспомогательной величины (параметра) $\cos \tau$, определяемой из соотношения [8]

$$\cos \tau = (B - A) / (B + A). \quad (8)$$

В [8] даны значения величин n_a и n_b как функции параметра $\cos \tau$, а также формулы для определения A и B для основных случаев контакта упругих тел.

Из (2) и (7) получим

$$\Phi = \frac{3}{16} \frac{P}{R} n_b^3 \sqrt{\frac{3(1-\mu^2)}{E \sum \rho}} P \quad (9)$$

В шарикоподшипнике силы, действующие на тела качения при радиальной нагрузке подшипника, распределяются неравномерно. При вертикальном направлении внешней радиальной нагрузки F_r (рис.2) на внутреннее кольцо последняя будет восприниматься лишь шариками, расположенными ниже горизонтальной оси подшипника на дуге, не превышающей 180° , тогда как шарики, расположенные выше этой оси, будут незагруженными. Наиболее нагруженным является шарик, расположенный по направлению действия нагрузки (силы) на подшипник. Нормальная нагрузка на наиболее нагруженный шарик определяется по формуле [8]

$$P_0 = K \frac{F_r}{Z}, \quad (10)$$

где $K = \frac{Z}{1 + 2 \sum_{i=1}^n \cos^{5/2} i\gamma}$; Z - общее число шариков; $\gamma = \frac{360}{Z}$ - угол между шариками.

Для подшипников с числом шариков $Z=10...20$ принимается $K=4,37(0,01)$.

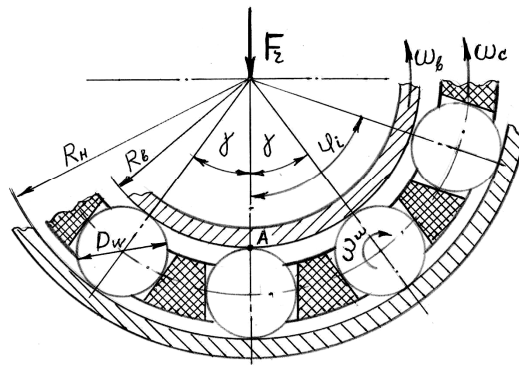


Рис.2. Схема определения распределения радиальной нагрузки между телами качения в радиальном шарикоподшипнике: R_b и R_n - радиусы по дну желоба внутреннего и наружного колец; $r_R = D_w / 2$, $d_m = 2(R_b + (D_w / 2))$ -средний диаметр подшипника

В реальных подшипниках, работающих в обычных условиях с радиальным зазором, в работе под нагрузкой принимают участие шарики на дуге, меньшей 180° , и наиболее нагруженный шарик сжимается силой, большей

примерно на 10 %. В соответствии с этим для однорядных шарикоподшипников принимают $K=5$ [9], тогда

$$P_o = 5 \frac{F_r}{Z}. \quad (11)$$

Нормальная нагрузка на i -й шарик, расположенный в нагруженной зоне под углом $i\gamma$ ($i=1,2,\dots,n$), отсчитываемым от направления внешней нагрузки (F_r), определяется формулой [4]

$$P_i = P_o \cos^{3/2} i\gamma = P_o \cos^{3/2} \varphi_i, \quad (12)$$

$$\varphi_i = i\gamma; \varphi_i = n\gamma \leq \frac{\pi}{2},$$

где φ_i - угловой шаг.

Из (12) видно, что сила P_i на каждый шарик (в зоне нагружения) меняется от нуля до P_o и обратно в зависимости от положения (φ_i) шарика.

Потеря энергии (работы) в i -ом шарике на единицу пути качения на участке зон нагружения, согласно (9) и (12), будет

$$\Phi_i = \frac{3}{16} \frac{P_o}{R_{\text{ш}}} n_b^3 \sqrt{\frac{3(1-\mu^2)}{E \sum \rho}} P_o \cos^2 \varphi_i. \quad (13)$$

Чтобы рассчитать общие потери энергии на упругое сжатие в шарикоподшипнике при его работе, необходимо определить пройденный путь шарика под меняющейся нагрузкой по внутреннему и наружному кольцам шарикоподшипника. Пройденный шариком путь (ℓ) за единицу времени зависит от частоты вращения сепаратора относительно внутреннего кольца (принимая условно в наших расчетах, что наружное кольцо подшипника неподвижно, $n_n = 0$) и от геометрических размеров элементов шарикоподшипника.

Принимая допущение, что в зонах контакта шарика с внутренним и наружным кольцами отсутствует проскальзывание, определим скорость сепаратора:

$$V_c = \omega_c \frac{d_m}{2} = (R_b + r_R) \omega_c, \quad (14)$$

где ω_c - угловая скорость сепаратора, 1/с.

С другой стороны, из плана скоростей можно написать

$$V_c = \frac{V_b}{2} = \frac{\omega_b R_b}{2}, \quad (15)$$

где ω_b - угловая скорость внутреннего кольца, 1/с.

Из (14) и (15) имеем

$$\omega_c(R_b + r_R) = \frac{\omega_b R_b}{2}, \quad \omega_c = \frac{\omega_b R_b}{d_m}. \quad (16)$$

Скорость перемещения шарика по внутреннему (или по наружному) кольцу определяем, принимая допущение об отсутствии проскальзывания в местах контакта, что означает равенство линейных скоростей начальной точки А (рис.2) касания (контакта) шарика в соответствующей точке дорожки качения внутреннего кольца. Скорость перемещения шарика равна линейной скорости наружной точки (поверхности) шарика, когда он вращается вокруг своей геометрической оси (центра).

Перемещение шарика по внутреннему (ℓ_b) или наружному (ℓ_n) кольцу за единицу времени определяется выражениями [5]

$$\ell_b = 2\pi R_b n_{c_b}, \quad (17)$$

$$\ell_n = 2\pi R_n n_{c_n} \quad (18)$$

или

$$\ell = \omega_{ш} r_R,$$

где n_{c_b} , n_{c_n} – частота вращения сепаратора относительно внутреннего и наружного колец, об/с; $\omega_{ш}$ – частота вращения шарика вокруг своей собственной оси (относительно сепаратора) (при $n_n = 0$):

$$\omega_{ш} = \frac{2\omega_b R_b R_n}{d_m D_w}. \quad (19)$$

Частота вращения сепаратора относительно внутреннего кольца определяется выражением [8]

$$n_{c_b} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{D_w}{d_m} \right) (n_n - n_b), \quad (20)$$

где n_b , n_n – частота вращения внутреннего и наружного колец.

При $n_n = 0$ имеем

$$n_{c_b} = \frac{1}{2} \left(\frac{d_m + D_w}{d_m} \right) (-n_b) = -n_b \frac{D_w}{2d_m}. \quad (21)$$

Знак «минус» в (21) означает, что сепаратор отстает от внутреннего кольца.

Частота вращения сепаратора относительно наружного кольца равна

$$n_{c_n} = n_{cen} - n_n. \quad (22)$$

Согласно [8]:

$$n_{\text{cen}} = \frac{1}{2} \left[n_{\text{B}} \left(1 - \frac{D_{\text{w}}}{d_{\text{m}}} \right) + n_{\text{H}} \left(1 + \frac{D_{\text{w}}}{d_{\text{m}}} \right) \right]. \quad (23)$$

Подставляя в равенство (22) значение из (23), получим

$$n_{\text{c}_\text{H}} = \frac{1}{2d_{\text{m}}} (d_{\text{m}} - D_{\text{w}}) (n_{\text{B}} - n_{\text{H}}) = \frac{D_{\text{B}}}{2d_{\text{m}}} (n_{\text{B}} - n_{\text{H}}). \quad (24)$$

При $n_{\text{H}} = 0$ имеем

$$n_{\text{c}_\text{H}} = \frac{D_{\text{B}} n_{\text{B}}}{2d_{\text{m}}}. \quad (25)$$

Подставляя полученные значения n_{c_H} и n_{c_B} в (17) и (18) (при $n_{\text{H}} = 0$), получим перемещение шарика (путь контакта качения) по внутреннему или наружному кольцам за единицу времени (за 1 с):

$$\ell = \ell_{\text{B}} = \ell_{\text{H}} = \omega_{\text{B}} \frac{R_{\text{B}} R_{\text{H}}}{d_{\text{m}}}. \quad (26)$$

При $n_{\text{H}} \neq 0$ имеем

$$\ell_{\text{B}} = \frac{2\pi R_{\text{B}} \cdot R_{\text{H}}}{d_{\text{m}}} (n_{\text{H}} - n_{\text{B}}), \quad (27)$$

$$\ell_{\text{H}} = \frac{2\pi R_{\text{B}} \cdot R_{\text{H}}}{d_{\text{m}}} (n_{\text{B}} - n_{\text{H}}). \quad (28)$$

В этом случае также получаем

$$\ell = |\ell_{\text{B}}| = |\ell_{\text{H}}| = \frac{2\pi R_{\text{B}} \cdot R_{\text{H}}}{d_{\text{m}}} (n_{\text{B}} - n_{\text{H}}). \quad (29)$$

Следовательно, пройденный шариком путь по внутреннему кольцу равен пути, пройденному по наружному кольцу, т.е. пути, пройденные шариком за единицу времени по внутреннему и наружному кольцам, равны.

Потери энергии или работы упругой деформации (сжатия), затрачиваемой при качении одного шарика по внутреннему и наружному кольцам за единицу времени (т.е. мощность), соответственно будут [6]

$$\Phi_{\text{B}} = \ell \Phi_{\text{I}}^{\text{B}} = \frac{\omega_{\text{B}} R_{\text{B}} R_{\text{H}}}{d_{\text{m}}} \cdot \frac{3}{16} \frac{P_{\text{i}}}{r_{\text{R}}} n_{\text{B}} \cdot \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)}{E \sum \rho_{\text{B}}}} P_{\text{i}}, \quad (30)$$

$$\Phi_{\text{H}} = \ell \Phi_{\text{I}}^{\text{H}} = \frac{\omega_{\text{B}} R_{\text{B}} R_{\text{H}}}{d_{\text{m}}} \cdot \frac{3}{16} \frac{P_{\text{i}}}{r_{\text{R}}} n_{\text{H}} \cdot \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)}{E \sum \rho_{\text{H}}}} P_{\text{i}}, \quad (31)$$

где $\sum \rho_B$ и $\sum \rho_H$ – сумма главных кривизн шарика с желобами внутреннего и наружного колец в начальной точке касания в двух главных плоскостях.

Из (30) и (31) видно, что в радиальном шарикоподшипнике потери энергии (работы) Φ_B и Φ_H при качении шарика на участке зон нагружения не являются постоянной величиной, а меняются от нуля до максимального значения и обратно, так как в зависимости от положения шарика φ_i (рис.2) по отношению к направлению радиальной нагрузки F_r величина P_i меняется, $P_i = f(\varphi_i)$, $\varphi_i = f(t)$, $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_i \leq \frac{\pi}{2}$.

Изменение угла φ_i по времени можно выразить через частоту (угловую скорость) вращения сепаратора, так как шарики перемещаются вместе с сепаратором по отношению к кольцам, совершая орбитальное движение вокруг оси подшипника:

$$\omega_c = d\varphi_i / dt; dt = d\varphi / \omega_c. \quad (32)$$

Потери энергии (работы) на упругое сжатие при качении одного шарика за один оборот внутреннего кольца в зоне $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_i \leq \frac{\pi}{2}$ будут:

- по внутреннему кольцу:

$$\Phi'_B = \int_0^t \Phi_B dt = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \Phi_B \frac{d\varphi_i}{\omega_c} = \frac{3R_H P_o}{16r_R} n_B \cdot \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)P_o}{E \sum \rho_B}} \cdot \frac{\pi}{2},$$

$$\Phi'_B = \frac{3\pi R_H P_o}{32r_R} n_B \cdot \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)P_o}{E \sum \rho_B}}; \quad (33)$$

- по наружному кольцу ($n_H = 0$):

$$\Phi'_H = \int_0^t \Phi_H dt = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \Phi_H \frac{d\varphi_i}{\omega_c}.$$

После преобразования получим

$$\Phi'_H = \frac{3\pi R_H P_o}{32r_R} n_H \cdot \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)P_o}{E \sum \rho_H}}. \quad (34)$$

Если количество шариков в подшипнике равно Z , то в зоне нагружения (между $-\pi/2$ и $\pi/2$) имеется $Z/2$ шариков, тогда общая потеря энергии (E) на упругое сжатие будет

$$E = \frac{Z}{2}(\Phi'_B + \Phi'_H) =$$

$$= \frac{3\pi R_H P_0 Z}{64 r_R} \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2)}{E}} \cdot \left(n_B \cdot \sqrt[3]{\frac{P_0}{\sum \rho_B}} + n_H \cdot \sqrt[3]{\frac{P_0}{\sum \rho_H}} \right). \quad (35)$$

Подставляя в (35) значение $P_0 = \frac{5F_r}{Z}$, путем несложных преобразований получим

$$E = \frac{30\pi R_H F_r}{64 D_w} \sqrt[3]{\frac{15(1-\mu^2)}{E \cdot Z}} F_r \left(n_B \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\sum \rho_B}} + n_H \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\sum \rho_H}} \right). \quad (36)$$

Согласно [8]:

$$\sum \rho_B = \frac{2}{r_R} + \frac{1}{R_B} - \frac{1}{r_{ж_B}}, \quad (37)$$

$$\sum \rho_H = \frac{2}{r_R} - \frac{1}{R_H} - \frac{1}{r_{ж_H}}, \quad (38)$$

где $r_{ж_B}$, $r_{ж_H}$ – радиусы желобов внутреннего и наружного колец.

Учитывая, что для стандартных шарикоподшипников принято $r_{ж_B} = r_{ж_H} = 0,515 D_w = 1,03 r_R$, получим

$$\sum \rho_B = \frac{2}{r_R} + \frac{1}{R_B} - \frac{1}{r_{ж_B}} = \frac{1,0291 R_B + r_R}{R_B r_R}, \quad (39)$$

$$\sum \rho_H = \frac{2}{r_R} - \frac{1}{R_H} - \frac{1}{r_{ж_H}} = \frac{1,0291 R_H - r_R}{R_H r_R}. \quad (40)$$

В уравнении (36), где $\sum \rho_B$ и $\sum \rho_H$ находятся под кубическим корнем, при инженерных расчетах для подшипников с наружным диаметром до 150 мм считаем допустимым в равенствах (39) и (40) принять $1,0291 R_B \approx R_B$ и $1,0291 R_H \approx R_H$.

Тогда для $\sum \rho_B$ и $\sum \rho_H$ получим более простые выражения:

$$\sum \rho_B = \frac{R_B + r_R}{R_B r_R} = \frac{d_m}{2 R_B r_R} = \frac{d_m}{R_B D_w}, \quad (41)$$

$$\sum \rho_H = \frac{R_H - r_R}{R_H r_R} = \frac{d_m}{2 R_H r_R} = \frac{d_m}{R_H D_w}. \quad (42)$$

Подставляя полученные значения $\sum \rho_B$ и $\sum \rho_H$ в (36), получим

$$E = \frac{30\pi R_H F_r}{64D_w} \sqrt[3]{\frac{15(1-\mu^2)}{E \cdot Z}} F_r \left(n_B \cdot \sqrt[3]{\frac{D_w \cdot R_B}{d_m}} + n_H \sqrt[3]{\frac{D_w \cdot R_H}{d_m}} \right). \quad (43)$$

Из (43) следует, что при одинаковых значениях контактных напряжений при $D_B = \text{const}$ потери энергии увеличиваются с увеличением диаметра шариков. Если частота вращения внутреннего кольца в единицу времени (в секунду) равна n_B , то общие потери энергии на упругое сжатие в подшипнике за единицу времени (потери мощности) будут

$$E' = \frac{n_B}{2} E, \quad (44)$$

где E определяется по формуле (43).

Так как гистерезисные потери составляют постоянную долю (α) от всей затраченной работы (энергии) при упругом сжатии [2], то потери энергии (ε) на гистерезис за единицу времени (потери мощности) в подшипниках будут

$$\varepsilon = \alpha E'. \quad (45)$$

Момент трения в подшипнике, обусловленный упругим гистерезисом (M_{yt}), определяется из следующих соотношений:

$$\varepsilon = M_{yt} \omega_B, \quad (46)$$

$$\alpha \cdot E' = M_{yt} 2\pi n_B, \quad M_{yt} = \frac{\alpha E'}{2\pi n_B}. \quad (47)$$

В [2,5] указывается, что для подшипниковых сталей коэффициент α можно с достаточной для расчетов точностью принять равным 1 %:

$$M_{yt} = \frac{\alpha E'}{2\pi n_B} = \frac{\alpha n_B E}{2\pi n_B \cdot 2} = \frac{E}{4\pi \cdot 100}, \quad M_{yt} = \frac{E}{400\pi}. \quad (48)$$

Подставляя в (48) значение E из (43), получим

$$M_{yt} = \frac{R_H F_r}{853,3D_w} \sqrt[3]{\frac{15(1-\mu^2)}{E \cdot Z}} F_r \cdot \left(n_B \cdot \sqrt[3]{\frac{D_w R_B}{d_m}} + n_H \cdot \sqrt[3]{\frac{D_w R_H}{d_m}} \right).$$

Выводы

1. Получены формулы, определяющие потери энергии (мощности) на упругий гистерезис и момент сопротивления вращению в радиальном шарикоподшипнике, обусловленные гистерезисными потерями.

2. Показано, что для уменьшения потерь на гистерезис, особенно в высокоскоростных и приборных шарикоподшипниках, целесообразно уменьшить диаметр шариков с увеличением их количества при сохранении допускаемых контактных напряжений между контактирующими поверхностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крагельский И.В.** Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – С.53-102, 266-274.
2. **Боден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел. / Пер. с англ. Н.М.Михина и А.А.Силина. – М.: Машиностроение, 1968. – 542 с.
3. **Пинегин С.В.** Трение качения в машинах и приборах. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
4. **Спицын Н.А., Машнев М.М., Красовский Е.Д.** и др. Опоры осей и валов машин и приборов. – М.: Машиностроение, 1970. – 519 с.
5. **Спицын Н.А., Атрас С.Г., Цыплянова Н.С., Ган К.Г., Кальван В.А.** Потери на трение в подшипниках качения. – М.: НИИНавтопром, 1968. – 103 с.
6. **Chu P.S.Y.** Research note: hysteresis loss in ball and roller bearings // The Journal of Mechanical Engineering Science. – 1976. – Vol.18, № 5. – P.254-255.
7. **Тимошенко С.П., Гудвер Дж.** Теория упругости / Пер. с англ. М.И.Рейтмана. – М.: Наука, 1975. – 576 с..
8. **Ковалев М.П., Народецкий М.З.** Расчет высокоточных шарикоподшипников. – М.: Машиностроение, 1975. – 280 с.
9. **Решетов Д.Н.** Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 18.12.2003.

Ս.Պ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

ԳՆԴԻԿԱՎՈՐ ԱՌԱՆՅՔԱԿԱԼՆԵՐՈՒՄ ԳԼՈՐՄԱՆԸ ԴԻՄԱԴՐՈՂ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ՍՈՄԵՆՏԻ ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՀԻՍՏԵՐԵԶԻՍՈՎ ՊԵՅՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԲԱՂԱԴՐԻՉԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ԻՆՃԵՆԵՐԱԿԱՆ ՍՈՒԵԼԸ

Դիտարկվում է գնդիկավոր առանցքակալների գլորմանը դիմադրող ընդհանուր մոմենտի բաղադրիչներից մեկի՝ առաձգական հիստերեզիսային կորուստներով պայմանավորված բաղադրիչի որոշումը: Գնդիկավոր առանցքակալներում հիստերեզիսային կորուստները գլորմանը դիմադրող ընդհանուր մոմենտի բաղադրիչներից ամենամեծն են և գլորման առանցքակալներում տեղի ունեցող ջերմասանջատման հիմնական աղբյուրը: Այդ անջատված ջերմության մեծությամբ են պայմանավորված առանցքակալների հուսալիությունը և երկարակեցությունը:

S.P. MANUKIAN

ENGINEERING CALCULATION MODEL OF ONE CONSTITUENT PART OF GENERAL RESISTANCE TO THE ROCKING MOMENT IN BALL-BEARINGS DUE TO ELASTIC HYSTERESIS

Ball-bearing mechanics of, in particular, figuring out the constituent part from general resistance moment to rocking in ball-bearings due to the elastic hysteresis is considered. Hysteresis losses being basic part of constituent parts of resistance moment to the rocking in ball-bearings are the main losses of heat transfer in rolling-bearings which defines the viability and reliability of the ball-bearings.

М.О. НАВОЯН, М.М. СИМОНЯН, В.А. БАЛАЯН, Э.Г. ОВСЕПЯН

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЗАНИИ

Представлена методика экспериментального исследования температуры режущего клина инструмента при прерывистом резании, включающая, наряду с традиционными, специальные методы, позволяющие определить температурное поле режущего клина как при резании, так и в процессе охлаждения. Предлагается также методика моделирования тепловых процессов при торцевом фрезеровании, позволяющая измерять температуру как на поверхности контакта, так и в ближайших к нему поверхностных слоях.

Ключевые слова: резание, инструмент, режущий клин, температурное поле, термопара, измерение.

Исследование температурного поля режущего клина при прерывистом резании включает комплексное изучение тепловых процессов, имеющих место как в периоды резания и холостого хода, так и в переходные моменты врезания и выхода инструмента [1, 2].

Наиболее простым и надежным способом определения средней температуры контакта является естественная термопара, однако при прерывистом резании измерение температуры в период холостого хода инструмента невозможно вследствие размыкания цепи термотока.

Для измерения температуры контактной площадки в период холостого хода нами был сконструирован специальный разрезной резец (рис. 1), режущее лезвие которого было изготовлено из различных инструментальных материалов.

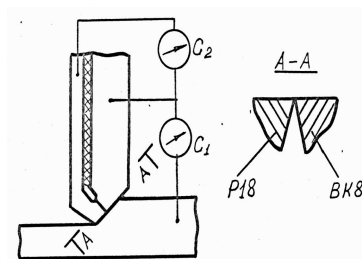


Рис.1. Схема измерения температуры контактной площадки
разрезным резцом

Гальванометрами G_1 и G_2 по этой схеме фиксировались термо-ЭДС, соответственно, при резании и холостом ходе инструмента. Измерение

температуры внутри режущего клина на некотором расстоянии от режущего лезвия производилось закладной полуискусственной термопарой.

На модернизированном электроэрозионном станке модели ЭП-5М с помощью проволочного электрода в твердосплавной пластине прошивалось отверстие диаметром $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. К донышку отверстия встык припаивался медный проводник, и в целях его изоляции отверстие заливалось стерокрилом.

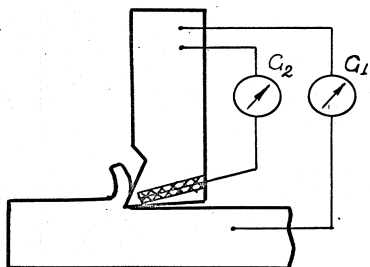


Рис.2. Схема измерения температуры внутренних участков режущего клина закладной полуискусственной термопарой

Таким образом, благодаря соответствующим переточкам резца по передней или задней грани стало возможным изменение координаты спая, а следовательно, и измерение температуры в любой точке режущего клина.

Вследствие значительной разницы в теплофизических свойствах и размерах сечений твердого сплава и меди возникают погрешности измерения ЭДС, с дальнейшей корректировкой при помощи выражения [3]

$$\theta = \beta \theta_1.$$

Здесь θ - фактическая температура; θ_1 - экспериментальное значение температуры; β - коэффициент, учитывающий разницу между измеренной и фактической температурами:

$$\beta = 1 + B_1 \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_{cp}}},$$

где λ и λ_1 - теплопроводности материалов проводника и объекта; c_p и $c_1 \rho_1$ - соответственно объемные теплоемкости материалов проводника и объекта, температура которого измеряется материалами проводника и объекта; B_1 - коэффициент, зависящий от значения критерия Фурье:

$$F_0 = a\tau / d^2,$$

где a - коэффициент теплопроводности тела; τ - время от начала процесса нагрева; d - диаметр проводника.

Как видно из рис. 3, в момент врезания инструмента в заготовку происходит практически мгновенное нарастание температуры, и в период резания изменение температуры незначительно. Следовательно, средняя температура контакта устанавливается практически при врезании. Иной характер имеет изменение температуры, в период охлаждения. Здесь

наблюдается более плавное снижение температуры, и для этого периода разница в осциллограммах, полученных при помощи разрезного резца и естественной термопары, весьма значительна.

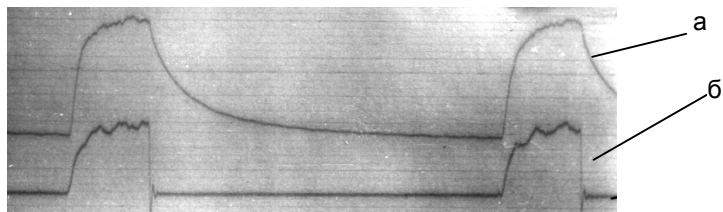


Рис. 3. Осциллограммы температуры при резании и холостом ходе инструмента, записанные разрезным резцом (а) и естественной термопарой (б)

На рис. 4 приведены осциллограммы температур внутри резца на различной глубине, полученные также закладной полуискусственной и естественной термопарами.

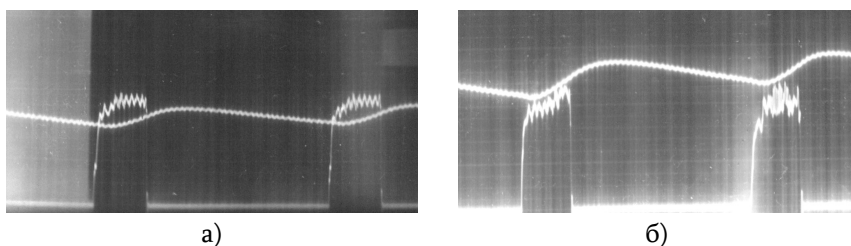


Рис.4. Осциллограммы температур на различных глубинах от передней поверхности резца. ВК8 - Сталь 45; $D = 0,1 \text{ м}$; $B = 0,06 \text{ м}$; $X = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (а) $X = 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (б), $V = 0,67 \text{ м/с}$; $S_z = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м/зуб.}$; $t = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

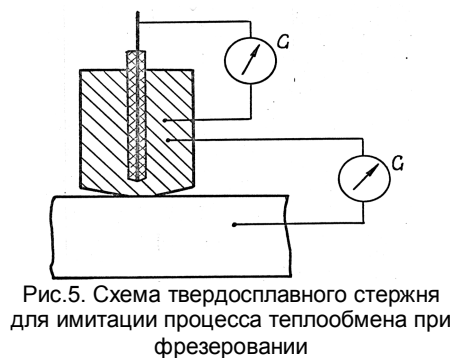


Рис.5. Схема твердосплавного стержня для имитации процесса теплообмена при фрезеровании

При приближении спая термопары к передней поверхности на расстояние менее $X = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ лезвие теряло прочность и выходило из строя. Исследование температур в непосредственной близости от передней поверхности осуществлялось способом экстраполирования. Чтобы убедиться в реальности полученных и экстраполированных данных, проводилось также непосредственное измерение температур на модели,

имитирующей процесс теплообмена при фрезеровании. Вместо режущего лезвия на фрезу устанавливался твердосплавный стержень сечением $0,1(0,1 \text{ м с торцем, имеющим форму усеченной пирамиды (рис.5).$

В стержне высверливалось отверстие диаметром $1(10^{-3} \text{ м})$, куда вставлялась и припаивалась медная проволока диаметром $0,2(10^{-3} \text{ м})$ с керамическим изолятором. Постепенным стачиванием торца изменялось расстояние от спая термопары до поверхности, при этом становилось возможным выводить спай непосредственно на поверхность трения. Для измерения размеров спая электроэрозийным методом были изготовлены разрезанные и отшлифованные образцы с высотой спая, не превосходящей $(0,1 \dots 0,15) (10^{-3} \text{ м})$.

В качестве материала детали служила плита из стали X18H9T с шириной, равной ширине фрезерования. Процесс резания был заменен процессом трения твердосплавного стержня о стальную плиту с площадью трения, соответствующей площади передней контактной площадки резца.

Частота нагрева и охлаждения зависела от скорости вращения фрезы, а продолжительность нагрева варьировалась шириной плиты и скоростью вращения шпинделя. Для получения температуры контакта, близкой к температуре резания, плита дополнительно нагревалась вмонтированным в нее высокотемпературным нагревателем из дисилицида молибдена.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет измерять температуру нагреваемого тела в любой точке, а также может быть использована при исследованиях работоспособности инструментов при прерывистом резании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андреев Г.С.** Методика и средства определения температуры контактных поверхностей инструмента при периодическом прерывистом резании // Станки и инструменты. – 1974. – (11. – С.34-36.
2. **Вульф А.М.** Резание металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. **Резников А.Н.** Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 496 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.04.2004.

Մ.Հ. ՆԱՎՈՅԱՆ, Մ.Մ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Վ.Ա. ԲԱԼԱՅԱՆ, Է.Գ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ
ԿՏՐՈՂ ՄԵՊԻ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ԶԱՓՈՒՄՆ ԸՆԴՀԱՆ ԿՏՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ներկայացված է ընդհատուն կտրման ժամանակ գործիքի կտրող սեպի ջերմաստիճանի փորձարարական հետազոտությունների մեթոդիկա, որտեղ ավանդական եղանակներից բացի ընդգրկված են հատուկ մեթոդներ, որոնք թույլ են տալիս որոշել կտրող սեպի ջերմաստիճանային դաշտը ինչպես կտրման, այնպես էլ հովացման գործընթացում: Առաջարկվում է նաև ճակատային ֆրեզման ժամանակ ջերմային գործընթացների մոդելավորման եղանակ, որը թույլ է տալիս չափել ջերմաստիճանը ինչպես հպման մակերևույթի վրա, այնպես էլ նրան մոտակա մակերևույթային շերտերում:

M.H. NAVOYAN, M.M. SIMONYAN, V.A. BALAYAN, E.G. HOVSEPYAN
CUTTING WEDGE TEMPERATURE MEASUREMENT DURING
INTERRUPTED CUTTING

A method of experimental research of tool cutting wedge temperature during the interrupted cutting, including special methods allowing to determine cutting wedge temperature field in machining and cooling is presented. A method of modeling heating processes in face milling allowing to measure temperature both on the contact surface and in the nearest surface layers is proposed.

С.Г. АГБАЛЯН, А.А. ПЕТРОСЯН, А.С. АГБАЛЯН

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО – ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Методами математического планирования и обработки результатов экспериментов оптимизированы процессы металлизации порошковых сталей и определены оптимальные параметры. Показана возможность сочетания процессов горячего компактирования (штамповка, экструзия) деталей с ВТМО и последующим низким отпуском. Разработаны поверхностно–легируемые порошковые стали и изделия из них, а также технология их получения.

Ключевые слова: легирование, порошок, сталь, покрытие, хромомолибденирование, упрочнение, структура, пористость, спекание, экструзия.

Анализ работ по химико-термической обработке порошковых материалов показывает, что исследований в этой области недостаточно, отсутствуют сведения о многокомпонентных покрытиях. Это объясняется тем, что изучены только процессы хромосилицирования и хромотитанирования [1], предназначенные главным образом для придания изделиям жаростойкости. Между тем комплексное легирование позволяет решить проблему поверхностного упрочнения порошковых материалов конструкционного назначения.

Целью исследования является разработка технологии получения поверхностно–легируемых порошковых сталей с беспористой структурой.

Теория и практика порошковой металлургии показывают, что полное компактирование металлических порошков может быть достигнуто поэтапно: 1) предварительным формованием их в пористую заготовку со спеканием или без него; 2) горячей обработкой пористой заготовки давлением.

Порядок проведения эксперимента заключался в следующем. Образцы из (Fe + C) подвергали хромомолибденированию (с целью получения диффузионного слоя состава ПЗ8ХМ), дехлорированию и отжигу, а затем экструзии при $\lambda=4$, $2\alpha_m=110^\circ$, $V=2\cdot 10^{-3}$ м/с.

По результатам экспериментов нами выбрана математическая модель типа

$$\sigma_B = C \left(\frac{T}{100} \right)^X \tau^Y \theta_0^Z, \quad (1)$$

где σ_B – предел прочности поверхностно–легируемой порошковой стали, МПа; C, X, Y, Z – неизвестные параметры, подлежащие определению; T – температура металлизации, $^\circ\text{C}$; τ – продолжительность металлизации, мин; θ_0 – исходная пористость образца, %.

Логарифмируя уравнение (1), получим

$$\ln \sigma_B = \ln c + x \ln \left(\frac{T}{100} \right) + y \ln \tau + z \ln \theta_0 . \quad (2)$$

Выражение (2) можно записать в виде

$$\bar{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3, \quad (3)$$

где y – предел прочности в логарифмическом масштабе; b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, подлежащие определению; x_1, x_2, x_3 – соответственно логарифмы T, τ, θ_0 .

Для решения уравнения (3) использован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 [2]. В табл. 1 приведены уровни факторов и их кодированные значения, в табл. 2 – матрица планирования и результаты экспериментов. С помощью компьютерной техники по данным табл. 1 и 2 определены неизвестные параметры модели (1):

$$\sigma_B = 0,659 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^{0,938} \tau^{0,169} \theta_0^{0,452} . \quad (4)$$

Анализ модели (4) показывает, что прочность порошковой стали, полученной поверхностным легированием и экструзией, находится в прямой зависимости от основных факторов (T, τ, θ_0). Как и следовало ожидать, сильное влияние оказывает температура (T), затем следуют пористость (θ_0) и продолжительность (τ).

На рис. 1 - 3 приведены графические зависимости математической модели (4), анализ которых позволяет выбрать следующие значения параметров в качестве оптимальных: $T = 1000 \pm 25^\circ\text{C}$; $\tau = 3,5 \pm 0,5$ ч; $\theta_0 = 30 \pm 5$ %; $\text{NH}_4\text{Cl} = 2,5 \pm 0,5$ %. Влияние пористости наглядно иллюстрирует рис. 3. Так, при $T = 900^\circ\text{C}$ (кривая 4) для $\theta_0 = 35$ % - $\sigma_B = 535$ МПа, для $\theta_0 = 15$ % - $\sigma_B = 360$ МПа, т.е. в 1,5 раза больше. Такое же соотношение сохраняется и при $T = 1000^\circ\text{C}$ (кривые 2 и 4, рис. 3). Установленные параметры применимы для получения поверхностных слоев составов П40ХН, П40ХН2МА и др.

Аналогичная оптимизация параметров осуществлена и для диффузионного слоя состава П40Х: $T = 900 \pm 25^\circ\text{C}$, $\tau = 3,0 \pm 0,5$ ч, $\theta_0 = 30 \pm 5$ %, $\text{NH}_4\text{Cl} = 2,0 \pm 0,5$ %.

По оптимальным параметрам изготовлены опытные партии и изучены механические свойства поверхностно-легированных порошковых сталей. Экструзию производили сразу же после гомогенизационного отжига, т.е. от температуры $1100 \dots 1150^\circ\text{C}$. Остальные параметры те же: $4 \leq \lambda \leq 6$, $2\alpha_m = 110 \dots 120^\circ$, $V \geq 2 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Как видно из табл. 3, уровень свойств поверхностно-легированных порошковых сталей достаточно высокий. В среднем он на 15 ... 20% ниже, чем у объемно-легированных стандартных сталей. Так, для стандартных сталей марок 40Х и 38ХМ $\sigma_B = 981$ МПа, для порошковых сталей - $\sigma_B = 833$ и 857 МПа, т.е. различие составляет ~15 и ~13%. Несколько ниже прочность у горячепрессованных П40Х и горячештампованных П40ХН порошковых сталей (соответственно на ~25 и ~20 %) из-за остаточной пористости.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов и их значения

Уровни факторов	Температура		Время (продолжительность)		Пористость	
	T, °C	$X_1, \ln \frac{T}{100}$	$\tau, \text{мин}$	$X_2, \ln \tau$	$\theta_0, \%$	$X_3, \ln \theta_0$
Основной уровень ($X_0; 0$)	800	2,1	120	4,78	25	3,22
Интервал варьирования (ΔX_i)	100	-	60	-	10	-
Верхний уровень ($X_i=1; +$)	900	2,2	180	5,19	35	3,56
Нижний уровень ($X_i=-1; -$)	700	1,9	60	4,09	15	2,71

Таблица 2

План эксперимента 2^3 и результаты опытов

Номер опыта	Порядок реализации опытов	Кодовый масштаб			Логарифмический масштаб			$\bar{Y}$	
		X_1	X_2	X_3	$X_1, \ln \frac{T}{100}$	$X_2, \ln \tau$	$X_3, \ln \theta_0$	опытные данные $\sigma_B, \text{МПа}$	средние значения $\sigma_B, \text{МПа}$
					T, °C	$\tau, \text{мин}$	θ_0		
1	1;16	-	-	-	1,9(700)	4,09(60)	2,71(15)	264;236	250
2	2;15	+	-	-	2,2(900)	4,09(60)	2,71(15)	317;275	296
3	3;14	-	+	-	1,9(700)	5,19(180)	2,71(15)	265;295	280
4	4;13	+	+	-	2,2(900)	5,19(180)	2,71(15)	380;336	358
5	5;12	-	-	+	1,9(700)	4,09(60)	3,56(35)	364;318	341
6	6;11	+	-	+	2,2(900)	4,09(60)	3,56(35)	457;419	438
7	7;10	-	+	+	1,9(700)	5,19(180)	3,56(35)	433;393	413
8	8;9	+	+	+	2,2(900)	5,19(180)	3,56(35)	560;526	543
9	17;18	0	0	0	2,1(800)	4,78(120)	3,22(25)	447;419	433

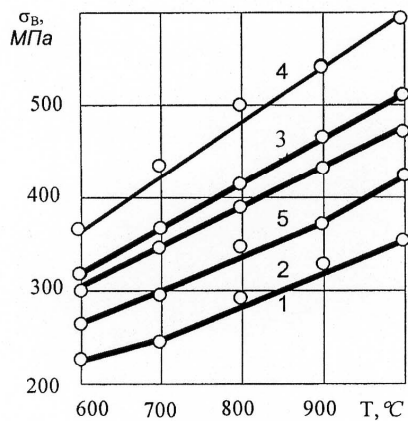


Рис. 1. Зависимость прочности поверхностно-легированной порошковой стали "Fe-0,4%C" (слой "38ХМ", глубина 2,5...3,0 мм) от температуры металлизации: 1. - $\tau = 60$ мин, $\theta_0 = 15$ %; 2. - $\tau = 180$ мин, $\theta_0 = 15$ %; 3. - $\tau = 60$ мин, $\theta_0 = 35$ %; 4. - $\tau = 180$ мин, $\theta_0 = 35$ %; 5. - $\tau = 120$ мин, $\theta_0 = 25$ %. После экструзии образцы подвергались отжигу (600...650 °C)

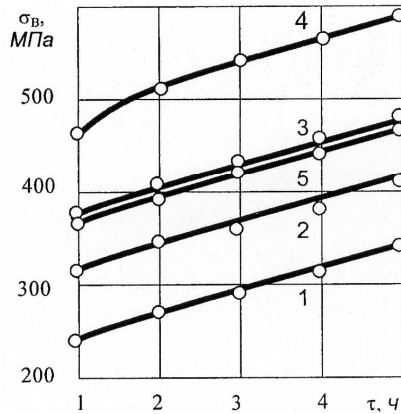


Рис. 2. Зависимость прочности поверхностно-легированной порошковой стали "Fe-0,4%C" (слой "38ХМ", глубина 2,5...3,0 мм) от продолжительности металлизации: 1. - $T = 700$ °C, $\tau = 15$ %; 2. - $T = 900$ °C, $\theta_0 = 15$ %; 3. - $T = 700$ °C, $\theta_0 = 35$ %; 4. - $T = 900$ °C, $\theta_0 = 35$ %; 5. - $T = 800$ °C, $\theta_0 = 25$ %. После экструзии образцы подвергались отжигу (600 ... 650 °C)

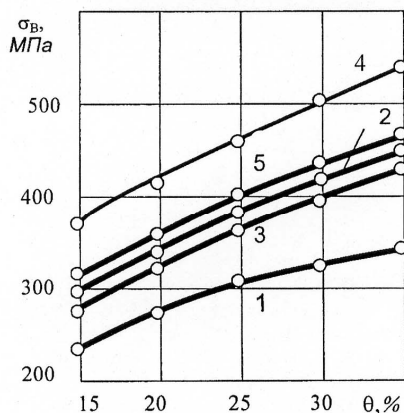


Рис. 3. Зависимость прочности поверхностно-легированной порошковой стали "Fe-0,4%C" (слой "38ХМ", глубина 2,5...3,0 мм) от пористости образцов: 1. - $T = 700$ °C, $\tau = 60$ мин; 2. - $T = 900$ °C, $\tau = 60$ мин; 3. - $T = 700$ °C, $\tau = 180$ мин; 4. - $T = 900$ °C, $\tau = 180$ мин; 5. - $T = 800$ °C, $\tau = 120$ мин. После экструзии образцы подвергались отжигу (600...650 °C)

Таблица 3

Механические свойства конструкционных легированных сталей (стандартных [3]
и порошковых)

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КС, КДж/м ²	НВ, МПа	Термообработка
Стандартные (ГОСТ4543- 71):							
40Х	784	981	10	45	588	2170–2690	Закалка от 860 °С в масле, отпуск от 500 °С в воде или в масле
38ХМ	882	981	11	45	686	2410 – 2690	Закалка от 850 °С в масле, отпуск от 580 °С на воздухе
40ХН	784	981	11	45	686	2070 – 2690	Закалка от 820 °С в воде или в масле, отпуск от 500 °С в воде или в масле
40 (ГОСТ1050- 74)	334	568	19	45	588	1970 – 2170	Нормализация
Порошковые ^{*)} : П40Х (горячепрес- сованные, $\theta_0=3 \dots 4\%$)	534	741	8	38	500	2000 – 2100	То же, что и для 40Х
П40Х (экструдиро- ванные, $\theta_0 = 0$)	568	833	14	45	590	2100 – 2200	То же, что и для 40Х
П38ХМ (экструдиро- ванные, $\theta_0 = 0$)	628	857	13	46	613	2300 – 2350	То же, что и для 38ХМ
П40ХН (горяче- штампованные, $\theta_0=3 \dots 4\%$)	587	782	9	40	580	2100 - 2200	То же, что и для 40ХН

Примечание:*) содержание углерода в матрице " Fe – С" составляет 0,37...0,45% (в среднем ~0,4%), что и для стали марки 40.

Сравнение сталей 40 и П40Х (экструдированной) показывает, что уровень свойств порошковой стали "Fe – 0,4%С" после поверхностного легирования существенно возрастает: при σ_T - в 1,7 раза, при σ_B - в 1,5 раза.

На рис. 4 показана зависимость σ_B и δ стандартной (40X) и порошковой (П40X) сталей от температуры отпуска. В температурном интервале 20...300°C различие свойств не столь существенно. С увеличением температуры отпуска эти значения заметно возрастают. Так, при $T_{от} = 200^\circ\text{C}$ σ_B у порошковой стали в пределах 6% ниже, чем у стандартной стали, тогда как при $T_{от} = 600^\circ\text{C}$ различие в прочности достигает ~30%. Аналогичная закономерность сохраняется и для δ , но эти значения соответственно выше у порошковой стали. Тем не менее даже при высоком отпуске уровень механических свойств порошковых сталей остается достаточно высоким. Анализ рис. 4 показывает, что целесообразно выбрать температурный интервал отпуска в пределах $T_{от}=300 \dots 500^\circ\text{C}$.

Поскольку после гомогенизационного отжига следует окончательное компактирование деталей горячим деформированием (статическое прессование, штамповка, экструзия, прокатка и др.), то, естественно, эти процессы успешно можно сочетать с высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО), теория и практика которой изложены в работе [4]. При этом исключается необходимость в обычной закалке, которая непереносима для легированных конструкционных сталей (ГОСТ 4543 – 71). Такое решение верно еще и потому, что ВТМО подвергаются углеродистые и низколегированные стали, лишь в отдельных случаях – среднелегированные [4]. Рекомендуемые степени деформации колеблются в пределах 30 ... 70 %. Именно такие деформации реализуются при статическом прессовании и штамповке, а при экструзии можно достичь и 70...90% ($4 \leq \lambda \leq 6$).

На рис. 5 представлены результаты ВТМО порошковой стали П40ХНМА. Для сравнения приведены значения σ_B и ψ той же стали, подвергнутой обычной закалке и отпуску (кривые 3 и 4). Как видно, σ_B и ψ стали после ВТМО значительно выше, чем после обычной закалки. Так, при $T_{от} = 200$ и 400°C соотношение σ_B составляет ~ 1,3 и 1,5. Примерно такое же различие сохраняется и для ψ . Повышенные значения ψ для стали, подвергнутой ВТМО, объясняются снижением отпускной хрупкости. Анализ рис. 5 показывает, что для заводской практики целесообразно совмещать горячую деформацию деталей машин с ВТМО и последующим низким отпуском. При этом температуру отпуска желательно ограничить 250 ... 300°C.

Выполнен комплекс структурных исследований поверхностно–легированных порошковых сталей. Формирование фаз осуществляется согласно диаграммам состояний рассматриваемых систем (40X, 40XН, 38ХМ, 40ХНМА). Некоторые характерные структуры представлены на рис.6.

На рис. 6 а,б,в показан процесс формирования окончательной структуры порошковой стали П38ХМ на стадиях: гомогенизации (а), экструзии (б) и термической обработки (в). Как и следовало ожидать, структура экструдированной стали представляет собой “ феррит + перлит ” (б). Распределение фаз однородное. Форма зерен после отжига равноосная (в).

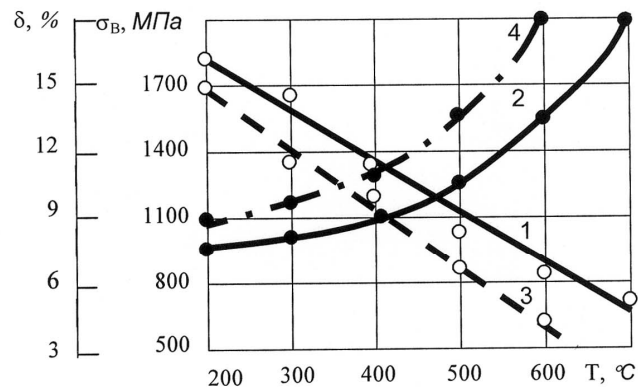


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на σ_B и δ (сталь 40X; закалка от 850°C в воде, охлаждение после отпуска в воде). Стандартная сталь [3]: 1. - σ_B , 2. - δ ; порошковая сталь: 3. - σ_B , 4. - δ

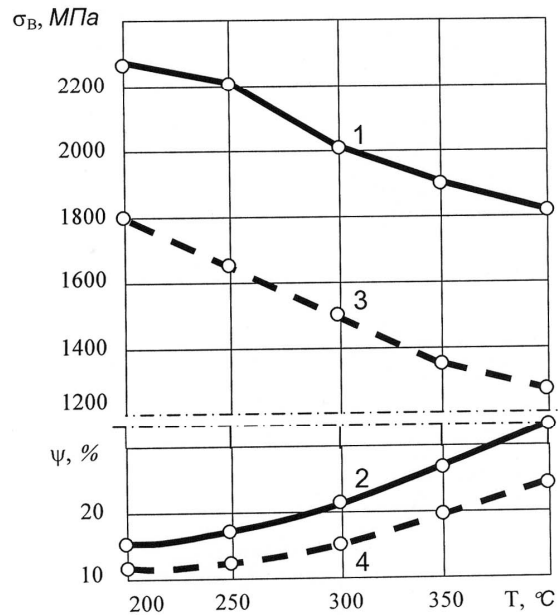


Рис. 5. Влияние температуры отпуска на σ_B и δ (сталь порошковая "П40ХНМА"; закалка от 850 °C в масле, отпуск в воде). Закалка обычная: 1 - σ_B , 2 - ψ . Немедленная закалка после экструзии (ВТМО): 3 - σ_B , 4 - ψ

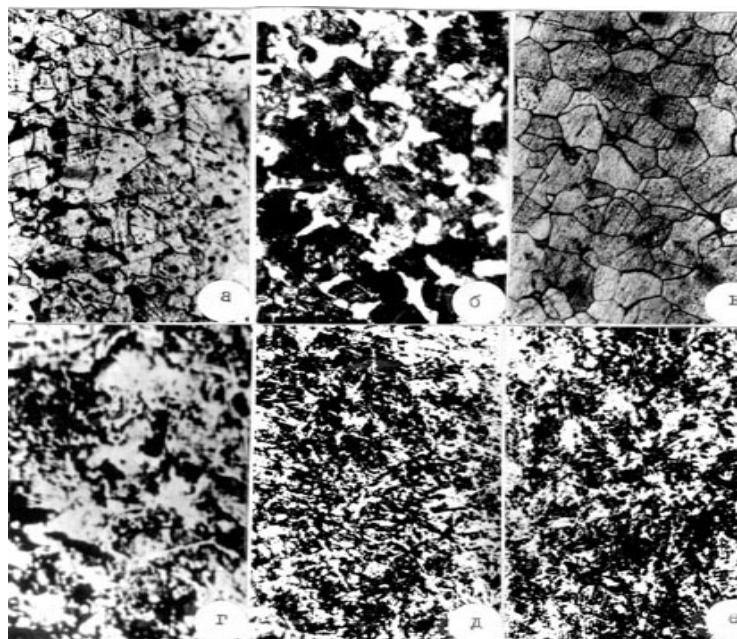


Рис. 6. Микроструктуры порошковых сталей 38ХМ (а, б, в) и 40ХНМА (г, д, е) после различных видов обработки: а – поверхностный слой (после первой стадии гомогенизации, т.е. дехлорирования); б – границная зона между диффузионным слоем и матрицей (после экструзии и отжига); в – аустенитное зерно (нагрев под закалку); г – игольчатый мартенсит (после обычной закалки); д – бесструктурный мартенсит (после ВТМО, $\varepsilon = 75\%$); е – бесструктурный мартенсит (после ВТМО, $\varepsilon = 83,3\%$)

Существенное повышение механических свойств стали в результате ВТМО (рис. 5) связано со структурными изменениями, в частности мартенсита, что наглядно видно из рис. 6 г, д, е. При обычной закалке мартенсит игольчатый (г), при ВТМО – бесструктурный (д). Это внешнее различие объясняется тем, что образованный из сильно деформированного аустенита мартенсит более мелкий по сравнению с мартенситом после обычной закалки (г). ВТМО приводит также к тонкому измельчению карбидов. Чтобы судить о степени деформации при экструзии, отметим следующее: при $\lambda = 4 - \varepsilon = 75\%$, при $\lambda = 6 - \varepsilon = 83\%$, что недостижимо ни при статическом прессовании, ни при штамповке и прокатке. В этой связи с увеличением степени деформации при ВТМО не только происходит измельчение мартенситных игл (кристаллов), но и меняется сам их характер: вместо игл, образующихся после обычной закалки (г), видны как бы распавшиеся пластинки (е).

Комплекс выполненных исследований позволил разработать технологию получения поверхностно-легированных порошковых деталей металлизацией (рис.7), приняв за основу методы горячего компактирования (статическое прессование, штамповка, экструзия).



Рис. 7. Технология получения поверхностно-легированных порошковых деталей металлизацией

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ворошнин Л. Г. , Ляхович Л. С. , Ловшенко Ф. Г. , Протасевич Г. Ф.** Химико-термическая обработка металло – керамических материалов (Под ред. **О.В. Романа** - Минск: Наука и техника, 1977. – 272 с.
2. **Новик Ф. С., Арсов Я. Б.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
3. Стали и сплавы в металлургическом машиностроении: Справочник (**Ю.Л. Зарапин, В.Д. Попов, Н.А. Чиченов** ,–М.: Металлургия, 1980. – 144 с.
4. **Бернштейн М. Л.** Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1968. – Т. 1, 2. – 1172 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 22.05.2004.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՎԱԾ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԼԵԳԻՐՎԱԾ ՓՈՇԵԱՐՏԱՂՐԱՏԵՍԱԿՆԵՐԻ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Փորձի մաթեմատիկական պլանավորման և արդյունքների մշակման մեթոդներով լավարկվել է փոշեպողպատների մետաղապատման գործընթացը, որոշվել են լավագույն պարամետրերը: Ցույց է տրված արտադրատեսակների տաք կոմպակտավորման (դրոշմում, տաք արտամղում) գործընթացի համատեղման հնարավորությունը ԲՋՋՄ մշակման և նրան հաջորդող ցածր արձակման հետ: Մշակվել է մակերևութային լեգիրված փոշեպողպատ և արտադրատեսակ, ինչպես նաև դրանց ստացման տեխնոլոգիան:

S.G. AGHBALYAN, A.A. PETROSYAN, A.S. AGHBALYAN TECHNOLOGY FOR OBTAINING SURFACE - ALLOYED POWDER PARTS WITH INCREASED MECHANICAL PROPERTIES

The processes of powder steel metallization are optimized and the optimum parameters are determined by the methods of mathematical planning and processing of results. The possibility of hot compacting part process combination (punching, extrusion) with HTMT and subsequent low tempering is shown. Surface-alloyed powder steels and products made of them, as well as technology of their obtaining are developed.

А.Н. КАРАПЕТЯН, И.А. ГРИБОВА, А.П. КРАСНОВ,
Ю.Н. СТУДНЕВ, А.К. ПОГОСЯН, К.В. ОГАНЕСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АРМЯНСКИХ МИНЕРАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФТОРСОДЕРЖАЩИМИ ОЛИГОМЕРАМИ

Приведены результаты исследования механизма модификации армянских минералов фторсодержащими олигомерами. Показано, что при обработке минеральных наполнителей фторалканами образуется модифицированный продукт, сохраняющий структуру наполнителей "привитым" слоем фторалкана, в котором атомы хлора расположены в основном на его периферии.

Ключевые слова: минеральный наполнитель, фторалкан, поверхностная энергия, монослой, растворимость.

Известно, что модифицированные армянские минеральные наполнители (МАНН) оказывают существенное влияние на структуру и свойства гетероцепных полимеров. Установлено, что разработанные композиции характеризуются повышенной износостойкостью, низким коэффициентом трения и улучшенными прочностными характеристиками [1-7].

Настоящая работа посвящена комплексному исследованию закономерностей механизма модификации армянских минеральных наполнителей, таких как травертин, мрамор, бентонит и туф, фторсодержащими олигомерами типа фторалканов (ФА), а также изучению структуры и свойств разработанного продукта.

Используемые минеральные наполнители являются дешевым и широкопространенным сырьем в Армении, а ФА являются отходами при синтезе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с $T_{пл}=65...67^{\circ}C$, $T_{кип}=80...174^{\circ}C$, $\rho=1,67...1,72 \text{ г/см}^3$ общей формулы $H(CF_2)_mCl$, где $m=7...14$, молекулярной массой 316,5...596,5, обладающими высокими антифрикционными свойствами, низким показателем вязкости расплава в сочетании с высокой термостабильностью и технологичностью, хорошей растворимостью в органических растворителях [8].

Модификация минеральных наполнителей заключалась в том, что порошок минерального наполнителя в течение минуты смешивался в эксцентриковой вибромельнице типа МЛ-30 совместно с ФА при частоте колебаний 100 Гц с целью придания им смазывающих свойств.

Смазывающая способность МАНН оценивалась путем их испытаний между двумя трущимися металлическими (сталь 3Х13) поверхностями при ступенчатом повышении скорости скольжения. В качестве критерия смазывающей способности была выбрана предельно достигаемая скорость скольжения, предшествующая резкому повышению коэффициента трения, так называемому "заеданию". Результаты испытаний показали (рис.1), что

модификация термообработанных минеральных наполнителей ФА привела к значительному уменьшению (в 4...5 раз) величины коэффициента трения исходных наполнителей, составляя 0,07...0,08 (для смеси травертин + ФА). Как видно из рис.1, начальное повышение скорости скольжения до 0,4 м/с не оказывает существенного влияния на коэффициент трения исходного травертина. Однако дальнейшее ее увеличение приводит к резкому повышению коэффициента трения, что связано с возрастанием температуры на фрикционном контакте. Аналогичное явление наблюдается и для смеси травертин + ФА, но уже при скорости скольжения более 1,0 м/с, что свидетельствует об увеличении нагрузочной способности МАМН.

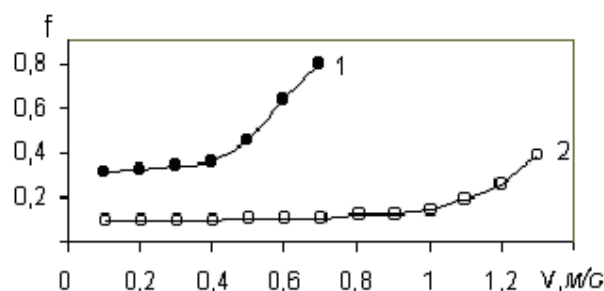


Рис. 1. Влияние скорости скольжения на коэффициент трения исходного травертина (1) и смеси травертин + ФА (2)

Анализ результатов смачиваемости образцов методом двух жидкостей (вода и метилениодид) показал (табл.1), что модификация минеральных наполнителей приводит к снижению показателя свободной поверхностной энергии от 35,84 (43,65) до 26,97 (38,33) Дж/см² соответственно для травертина и туфа. Обращает внимание также то, что полярная составляющая краевого угла смачиваемости свободной поверхностной энергии образцов смеси травертин (туф) + ФА после отмывки ФА не снижается, приближаясь к величине, характерной для исходных наполнителей, а наоборот, возрастает до величины 1,05 (1,32) Дж/м², что свидетельствует об особой структуре полученного продукта, где полярные атомы хлора расположены "на периферии" привитого слоя.

Таблица 1

Поверхностная энергия исходного и модифицированного травертина (туфа)

Показатель, Дж/м ²	Травертин (туф)	Травертин (туф) +Звес.%ФА	Травертин (туф) +Звес.%ФА после экстракции
Дисперсионная составляющая, γ_s^d	35,84 (43,65)	26,23 (37,28)	27,64 (37,75)
Полярная составляющая, γ_s^h	$0,48 \cdot 10^{-3}$ (0,72)	0,74 (1,05)	1,02 (1,34)
Поверхностная энергия, γ	36,32 (44,37)	26,97 (38,33)	28,66 (39,09)

Для дальнейшего изучения был произведен рентгеноструктурный анализ ФА, исходного травертина и смеси травертин + ФА после обработки в вибрационной мельнице, результаты которого приведены на рис.2. На дифрактограмме ФА (рис. 2а) цифрами 1-6 отмечены порядки отражения, соответствующие основному рефлексу ($d_1=17,80 \text{ \AA}$). Кроме того, отмечен рефлекс $d_2=5,60 \text{ \AA}$ и широкий максимум в области 2θ от 32 до 44° . Полученная от ФА дифракционная картина аналогична дифракции, получаемой от парафинов и других веществ слоистой структуры. Период $d_1=17,80 \text{ \AA}$ является межслоевым и характеризует толщину одного слоя. Система параллельных слоев упорядочена и простирается на значительные расстояния (рис.3). Рефлекс, соответствующий $2\theta=18,15^\circ$ ($d_2=5,60 \text{ \AA}$), является не межслоевым, а внутрислоевым. Межплоскостное расстояние $d_2=4,90 \text{ \AA}$ и широкий максимум $2\theta=32...44^\circ$ характеризуют межмолекулярные расстояния внутри слоя.

Сравнение дифрактограмм показывает, что в результате обработки в вибрационной мельнице смеси травертин + ФА линии травертина почти не изменились. Что касается линий, относящихся к ФА, основное изменение их после обработки в вибрационной мельнице заключается в том, что исчезают все порядки отражения, связанные с межслоевым периодом $d_1=17,80 \text{ \AA}$. В то же время внутрислоевой рефлекс $d_2=5,60 \text{ \AA}$ сохраняется и отчетливо виден на дифрактограмме (рис.2в). Исчезновение межслоевого рефлекса и сохранение внутрислоевого означает, что сами слои (или хотя бы значительная их часть) сохранились, но пакеты их разрушились.

Это свидетельствует о том, что после обработки смеси в вибрационной мельнице ФА представляется не в виде частиц, состоящих из пакетов слоев, а в виде отдельных монослоев [9-10]. Естественно предположить, что такие изменения структуры связаны с тем, что отдельные монослои ФА распределились и "размазались" по границам частиц травертина. Следовательно, структуру смеси после обработки в вибрационной мельнице можно представить в виде частиц травертина, покрытых тонкой пленкой ФА (рис.3). Такие монослои ФА предотвращают непосредственное трение частиц травертина. Полученные результаты свидетельствуют, что модификация травертина фторалканом предохраняет кристаллы травертина от разрушения.

Таким образом, методом рентгеноструктурного анализа было установлено, что в процессе механического воздействия частички ФА, состоящие из слоевых пакетов, разделяются на отдельные монослои. Такое разделение, очевидно, происходит сравнительно легко, так как межмолекулярные силы между отдельными слоями молекул ФА, имеющих структуры, сходные со структурой ПТФЭ, должны быть весьма слабыми. Монослои ФА распределяются по границам частиц травертина, способствуя сохранности частиц травертина и структуры всей смеси в процессе механовоздействия. При этом предполагалось, что в тонких слоях ФА, наряду с физическими, возможны и физико-химические явления. Исследование смеси травертин + ФА показало, что после совместного виброизмельчения часть ФА (рис.4) не отмывается растворителем (хлороформ). Количество обнаруживаемого нерастворенного ФА зависит от продолжительности

виброизмельчения, достигая равновесного значения (90%) после 60 с вибровоздействия.

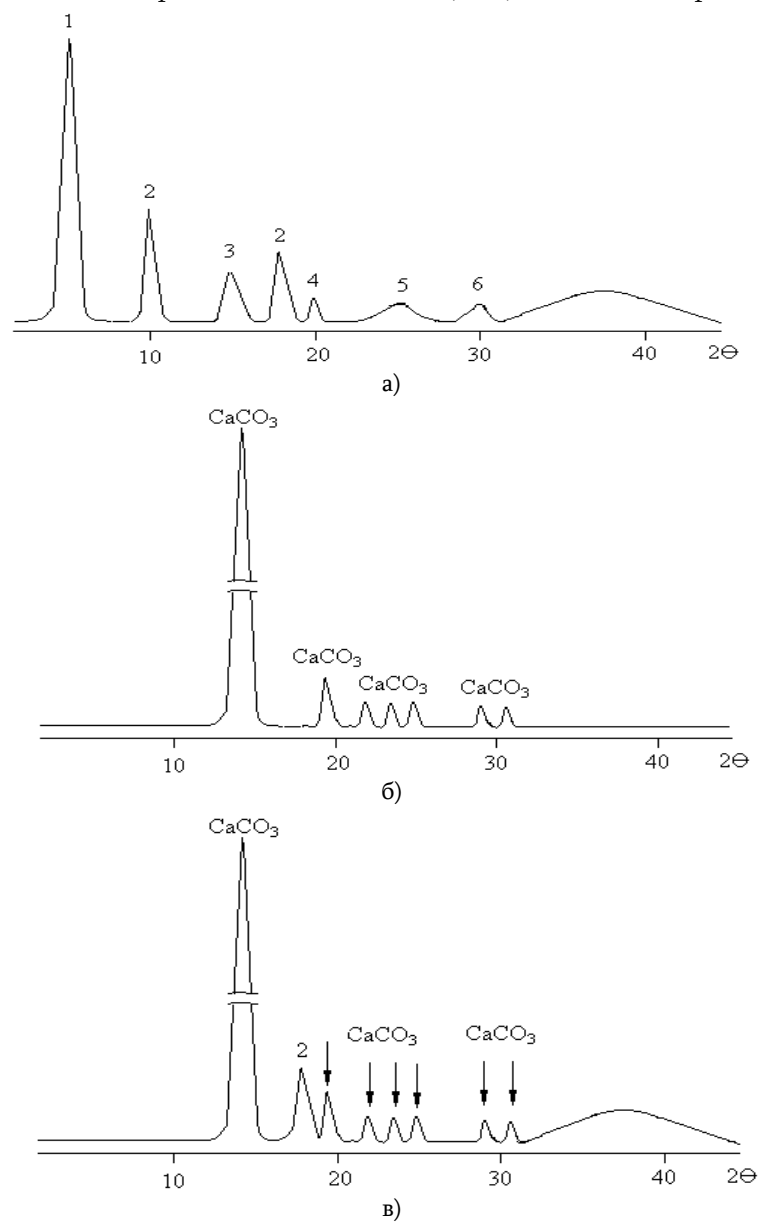


Рис.2. Дифрактограммы фторалкана (а), исходного травертина (б) и смеси травертин + 3вес.% фторалкана после обработки в вибрационной мельнице (в)

Для выяснения характера процессов, происходящих на поверхности травертина при механовоздействии, было проведено масс-спектрометрическое исследование исходного ФА и смеси травертин + ФА до и после виброизмельчения (табл. 2). Результаты исследования исходного ФА показывают, что наиболее интенсивными, выделяющимися хлорсодержащими продуктами в полученном масс-спектре являются ионы $(\text{CF}_2)_m\text{Cl}$, где $m=1\ldots 4$. В масс-спектре представлены также все продукты последовательного отщепления этого иона.

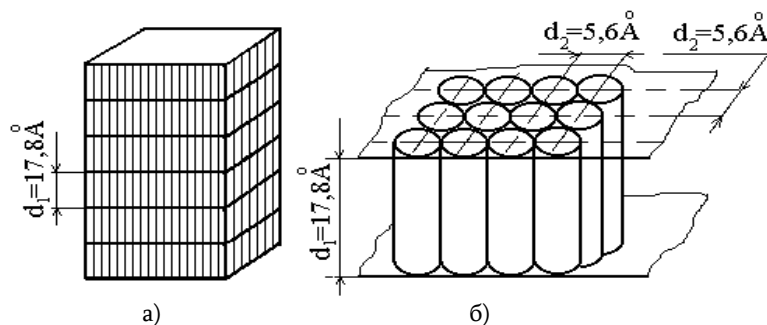


Рис. 3. Схемы строения кристаллита ФА, состоящего из параллельных слоев (а) и одного слоя ФА (б)

Таблица 2

Продукты термораспада ФА и модифицированного минерального наполнителя [8]

Ион, m/z	Состав продукта	Интенсивность выделения, %		
		ФА	Травертин(туф)+ФА	Травертин(туф)+ФА после отмывки ФА
31	CF	0,83	0,56 (0,65)/0,45 (0,58)	0,08 (0,09)/0,062 (0,072)
50	CF ₂	0,9	0,42 (0,48)/0,35 (0,40)	0,06 (0,07)/0,038 (0,05)
51	CF ₂ H	4,8	0,82 (0,93)/0,68 (0,76)	0,16 (0,17)/0,12 (0,152)
85	(CF ₂)Cl	5,9	1,20 (1,26)/1,02 (1,05)	0,84 (0,90)/0,53 (0,690)
87	(CF ₂)Cl	4,8	0,80 (0,84)/0,62 (0,68)	0,66 (0,72)/0,57 (0,062)
100	(CF ₂) ₂	4,8	0,64 (0,70)/0,44 (0,57)	0,12 (0,13)/0,08 (0,103)
101	(CF ₂)H	2,0	0,24 (0,29)/0,16 (0,22)	0,04 (0,05)/0,02 (0,030)
119	(CF ₂)F	4,8	0,86 (0,92)/0,58 (0,75)	0,15 (0,16)/0,09(0,141)
131	(CF ₂)CF	4,8	0,98 (1,05)/0,70 (0,88)	0,31 (0,38)/0,22 (0,352)
135	(CF ₂)Cl	3,6	0,51 (0,56)/0,32 (0,41)	0,34 (0,39)/0,23 (0,363)
137	(CF ₂)Cl	2,8	0,43 (0,51)/0,20 (0,34)	0,27 (0,35)/0,19 (0,310)
150	(CF ₂) ₃	4,8	0,78 (0,85)/0,52 (0,65)	0,23 (0,28)/0,15 (0,24)
151	(CF ₂) ₃ H	0,3	0,08 (0,09)/0,05 (0,07)	0,02 (0,03)/0,01 (0,02)
185	(CF ₂) ₃ Cl	0,9	0,12 (0,13)/0,080 (0,11)	0,08 (0,09)/0,04 (0,07)
187	(CF ₂) ₃ Cl	1,1	0,15 (0,16)/0,11 (0,14)	0,10 (0,11)/0,05 (0,08)
200	(CF ₂) ₄	0,7	0,20(0,18)/0,16(0,12)	0,32(0,28)/0,26(0,24)
201	(CF ₂) ₄	0,14	0,23(0,16)/0,17(0,11)	0,36(0,32)/0,27(0,23)
235	(CF ₂) ₄ Cl	0,28	0,20(0,18)/0,16(0,12)	0,30(0,26)/0,23(0,18)
237	(CF ₂) ₄ Cl	0,14	0,22(0,18)/0,15(0,12)	0,35(0,30)/0,28(0,22)

Примечание. В числителе указаны данные исходного, а в знаменателе – термообработанного наполнителя.

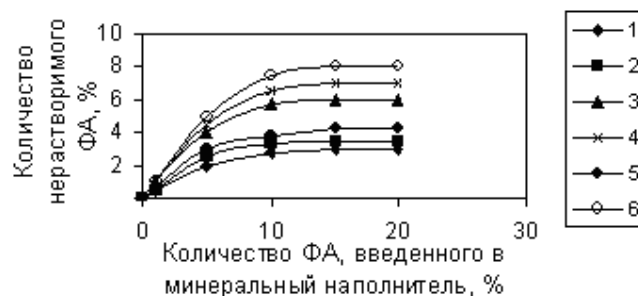


Рис. 4. Золь-гель анализ модифицированных ФА минеральных наполнителей:
1-травертин; 2-бентонит; 3-мрамор; 4- туф фельзитовый; 5-термообработанный травертин; 6- термообработанный туф фельзитовый

Масс-спектрометрический анализ продуктов термораспада свидетельствуют о том, что деструкция ФА под электронным ударом протекает с разрывом менее прочных С-С связей фторалкановой цепи и образованием активных радикалов. Прочность связи С- F препятствует переходу атома F с одного радикала на другой, что приводит, как и в случае ПТФЭ, к появлению m/z 100 (CF_2)₂.

Распад смеси травертин + ФА под электронным ударом в отличие от чистого ФА характеризуется заметным уменьшением "крупных" продуктов распада, что указывает на взаимодействие травертина с ФА в процессе совместного виброизмельчения. Для более детального исследования полученного продукта были проанализированы отмытая хлороформом часть ФА и остаток после отмывки. Масс-спектрометрический анализ растворимой в хлороформе части системы травертин + ФА свидетельствует о практическом воспроизведении исходного ФА. Незначительное уменьшение количества "крупных" частиц свидетельствует, вероятно, лишь о частичной деструкции ФА, остающегося в несвязанном состоянии. Однако в остатке, после отмывки части ФА, происходит изменение состава выделяющихся "крупных" продуктов по сравнению с исходной смесью. Полученные масс-спектрометрические результаты свидетельствуют, что в спектрах этого продукта также наблюдается значительное увеличение количества ионов $(\text{CF}_2)_n\text{Cl}^+$ относительно фтора. Это позволяет предположить, что взаимодействие при модификации травертина фторалканами происходит за счет радикальных продуктов, образующихся при деструкции С-С связей фторалкановой цепи.

В связи с этим продукты совместного измельчения были исследованы методом электронно-парамагнитного резонанса (ЭПР) (рис.5). Измельчение каждого из компонентов (травертин и ФА) в выбранных условиях не приводит к образованию парамагнитных центров (ПМЦ). Вероятно, это связано с быстрой рекомбинацией образующихся продуктов радикального типа. Сигналы ЭПР, характерные для фторсодержащих радикалов (значительные константы сверхтонкого взаимодействия с атомами F), отсутствуют и в смеси травертин + ФА. Однако наблюдается значительное количество парамагнитных частиц. Это, вероятно, связано с тем, что ПМЦ образуются при взаимодействии фторалкильных радикалов с поверхностью травертина.

Золь-гель анализ МАМН показал, что после совместного виброизмельчения часть ФА не отмывается растворителем. С увеличением количества ФА, введенного в минеральный наполнитель, возрастает и количество нерастворимого ФА. Этот процесс продолжается с введением ФА до 10% для травертина, мрамора, бентонита и 15% для туфа. Дальнейшее увеличение ФА не приводит к изменению количества нерастворимого ФА, что свидетельствует о насыщении минеральных наполнителей ФА. Аналогичные по характеру зависимости наблюдаются и с термообработанными наполнителями.

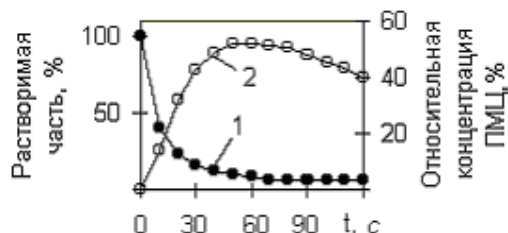


Рис. 5. Влияние продолжительности виброизмельчения МАМН на растворимость ФА (1) и концентрацию ПМЦ (2)

Таким образом, проведенное исследование показало, что при совместном виброизмельчении минеральных наполнителей фторалканами образуется новый антифрикционный продукт (МАМН), обладающий улучшенными смазывающими свойствами, сохраняющий структуру наполнителей с частично "привитым" слоем ФА, в котором атомы хлора расположены в основном на его периферии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. СССР ¹ 1446902. Литьевая антифрикционная композиция / В.В. Коршак, А.В. Фокин, И.А. Грибова, А.П. Краснов, А.К. Погосян, А.Н. Карапетян и др. - 1988.
2. А.с. СССР ¹ 1441761. Литьевая антифрикционная композиция / В.В. Коршак, А.В. Фокин, И.А. Грибова, А.П. Краснов, А.К. Погосян, А.Н. Карапетян и др. - 1988.
3. А.с. СССР ¹ 1706192. Литьевая антифрикционная композиция / А.К. Погосян, А.Н. Карапетян, К.В. Оганесян - 1991.
4. Погосян А.К., Карапетян А.Н. Влияние модифицированных минеральных наполнителей на триботехнические свойства композиций на основе сополимера СФД // Известия АН АрмССР.- 1989. -Т.42, ¹ 1.- С.7-11.
5. Pogosian A.K., Karapetyan A. N., Oganessian K.V. Tribochemical processes and wear of composite polymer materials // Proc. of Inter. Conf. Wear of Materials Denver, USA.-1989. - Vol.2. - P.521-528.
6. Погосян А.К., Оганесян К.В., Карапетян А.Н., Багдасарян А.А. Антифрикционные композиционные полимерные материалы на основе СФД // Трение и износ.-1998.-Т.19, № 1.- С.97-103.
7. Карапетян А.Н. Трибологические свойства самосмазывающихся композитов на основе гетероцепных полимеров // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2004.-Т.57, №1.- С. 58-62.

8. **Pogosian A., Karapetyan A., Hovhannisyan K.** Study of Physico-Chemical Modification Process of Heterochained Polymers by the Fillers Minerals // Tribologia (Poland).-2004.- №1 (193).- P. 63-73.
9. **Коршак В.В., Цванкин Д.Я., Грибова И.А., Краснов А.П., Студнев Ю.Н.** Структура двухкомпонентной системы графит-хлорперфтордодецилфторсульфат // ДАН СССР. -1985.- Т. 273, 11.- С.176-179.
10. **Коршак В.В., Фокин А.В., Грибова И.А., Краснов А.П., Студнев Ю.Н.** О природе взаимодействия в смеси графит-хлорперфтордодецилфторсульфат при механовоздействии // ДАН СССР.- 1987.- Т. 296, 15. - С.1157-1159.

ГИУА, ИНЭОС РАН.

Материал поступил в редакцию 03.09.2004.

**Ա.Ն. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ի.Ա. ԳՐԻԲՈՎԱ, Ա.Պ. ԿՐԱՍՆՈՎ,
Յ.Ն. ՍՏՈՒՆԵՎ, Ա.Կ. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Կ.Վ.ՀՈՎՀԱՆԻՍՅԱՆ**

**ՖՏՈՐ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ՕԼԻԳՈՄԵՐՆԵՐՈՎ ՁԵՎԱՓՈՒՎԱԾ
ՀԱՅՎԱԿԱՆ ԼՑԱՆՑՈՒԹԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԵՎ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Բերված են ֆտոր պարունակող օլիգոմերներով հայկական լցանյութերի ձևափոխման մեխանիզմի ուսումնասիրության արդյունքները: Ցույց է տրված, որ հանքային լցանյութերը ֆտորակաՆով մշակելիս առաջանում է ձևափոխված նյութ, որտեղ քլորի ատոմները տեղակայված են հիմնականում ծայրամասերում:

**A.N. KARAPETYAN, I.A. GRIBOVA, A.P. KRASNOV, J.N. STUDNEV,
A.K. POGOSIAN, K.V. HOVHANISYAN**

**ARMENIAN MINERAL STRUCTURE AND PROPERTY STUDIES OF MODIFIED FLUORINE
BEARING OLIGOMETERS**

Research results of the modification mechanism of the Armenian minerals containing fluorine with oligomers are given. It is shown that in treating mineral fillings with fluorine alkali a modified product preserving the structure of fillings with "developed" layers of fluorine alkali in which chlorine atoms are on the whole allocated on its periphery is formed.

О.К. ГЕОКЧЯН, Л.А. МКРТЧЯН, М.А. ПОГОСЯН, А.Г. АМБАРЦУМЯН,
Л.М. САВЧЕНКО

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО ПИГМЕНТА ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КРАСОК

В Ереванском институте материаловедения разработаны и внедрены в производство керамические краски разных цветов, кроме дорогостоящих золотосодержащих красок «пурпур». Изготовлены образцы красок, которые были нанесены на керамические изделия и металлические эмалированные поверхности. Получены рисунки хорошего качества.

Ключевые слова: керамика, краска, золото, эмаль, изделие.

Нанесение керамических красок на поверхность изделий позволяет получать долговечные высокохудожественные рисунки. В отличие от органических красителей, керамические краски обладают высокой устойчивостью к действию внешних условий (свет, влажность, температурные изменения) и долговечностью. Они представляют собой смеси жаростойких минеральных пигментов с легкоплавкими стеклами. Керамическими пигментами являются алуминаты, окрашенные окислы металлов, фосфаты, молибдаты, ванадаты и др. В отдельную группу объединяются золотосодержащие керамические пигменты, окраска которых вызывается коллоидными частицами золота. В Ереванском институте материаловедения в результате долгих лет работы разработаны и внедрены в производство керамические краски разных цветов, кроме дорогостоящих золотосодержащих красок «пурпур». Отмеченный пробел можно устранить разработкой новых пигментов и соответствующих им флюсов для получения керамических красок типа «пурпур».

Настоящая работа посвящена отмеченной актуальной задаче. Красящей основой при изготовлении пигментов для красных красок являются окись железа, золото, а также хромовокислый свинец – $PbCrO_4$ и селенокадмиевые соединения [1-3]. Золотые краски «пурпур» представляют собой гидрогели оловянной кислоты, гидроокиси магния и алюминия, окрашенные частицами тонкодисперсного металлического золота. Обычно их готовят осаждением золота в момент его восстановления сахаром из горячего раствора $AuCl_3$ в щелочной среде [1]. Красящее свойство золотого пигмента в основном зависит от чистоты восстановления и дисперсности полученных частиц. Вместо сахара в качестве восстановителя нами был использован гидразин и $SnCl_4$ с теллурическим коллектором по методу, изложенному в [4]. Предложенное видоизменение в технологии приводит к полному восстановлению золота из хлорида (не содержащего следы невосстановленного $AuCl_3$) и получению более однородной и тонкодисперсной структуры гелеобразных частиц золота. Полученная структура приводит к значительному улучшению качества готового пигмента.

Для приготовления красок полученные пигменты смешивают с флюсами и углекислым серебром. Флюсы, содержащие повышенные количества свинца, иногда придают краскам синий оттенок. Поэтому нами вместо многосвинцовых флюсов, содержащих до 70 масс.% PbO [1], были разработаны малосвинцовые составы флюсов и исследованы их технологические и эксплуатационные свойства. В табл. 1 и 2 приведены составы разработанных нами некоторых флюсов, их температуры варки и пределы характеристических температур.

Таблица 1

№ стекла	О к и с л ы, м а с с. %				
	SiO ₂	B ₂ O ₃	PbO	Na ₂ O	K ₂ O
1	40	20	25	7	8
2	37	24	23	7	9
3	34	27	26	7	7
4	35	20	30	7	8

Таблица 2

№ стекла	Т е м п е р а т у р а, °С			
	варки	размягчения	образования капли	полного растекания
1	1250 ... 1300	450 ... 480	580 ... 750	780 ... 900
2	1230 ... 1250	430 ... 450	550 ... 680	700 ... 800
3	1200 ... 1230	400 ... 430	500 ... 620	650 ... 750
4	1150 ... 1200	380 ... 420	460 ... 550	560 ... 650

Из табл. 2 видно, что по значениям температур размягчения, каплеобразования и растекания они подобны флюсам № 50, 51 и 52, применяемым на Дулевском красочном заводе. Однако разработанные нами составы малосвинцовые, экономичны, а образцы красок на их основе стабильны и устойчивы по цветовым тонам и мало меняются при температурных колебаниях.

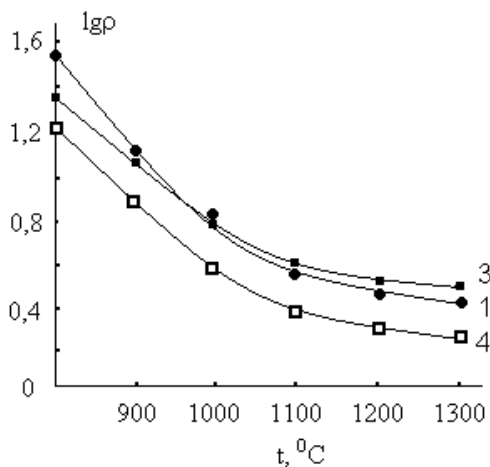


Рис. Зависимость логарифма электросопротивления от температуры для трех составов стекол

По химической устойчивости наши флюсы находятся на одинаковом уровне по сравнению с Дулевскими аналогами. Так как разработанные флюсы содержат окислы щелочных металлов, окись свинца и борный ангидрид, то при пламенном способе варки трудно получить однородные массы, а сам процесс неэкологичен из-за улетучивания щелочных боратов и соединений свинца. Поэтому нами предлагается методика их электроварки под слоем шихты с применением керамических электродов (например, электродов из SnO_2). Практика получения стекол методом электроварки показала, что для этого необходимо изучить электропроводность расплавов этих стекол. От формы зависимости кривых $\lg(-t)$ во многом зависит выбор способа электроварки и метод автоматического управления процессом. Поэтому нами были измерены электропроводности трех составов разработанных флюсов. На рисунке приведены кривые зависимости $\lg(-t)$ трех составов стекол. Кривые имеют пологий характер, что говорит о возможности автоматического управления электроваркой.

Из полученных пигментов и флюсов нами были изготовлены образцы красок, которые были нанесены на керамические изделия и металлические эмалированные поверхности. В результате были получены рисунки хорошего качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Визир В.А.** Керамические краски. - Киев: Техника, 1964. – 255 с.
2. **Штейнберг Ю.Г.** Стекловидные покрытия для керамики. – Л.: Стройиздат, 1978. – 199 с.
3. **Ашарина Н.** Российское художественное стекло XVIII – XIX веков // Стекло мира. – 2002. - №1. - С. 63-65.
4. **Геокчан Н.О., Егиазарян А.А., Микаелян Дж.А., Хачатрян А.Г.** Экстракционно-абсорбиметрическое определение микрограммовых количеств золота (III) тионином в сернокислой среде // Зав. лаб. Диагностика материалов. – 1998. - Т. 64, №11. - С. 15-17.

НПП Материаловедения РА. Материал поступил в редакцию 02.10.2003.

**Օ.Ղ. ԳԵՈՔՉՅԱՆ, Լ.Հ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Մ.Ա. ՊՈՂՈՍՅԱՆ, Ա.Գ. ՀԱՄԲԱՐԶՈՒՄՅԱՆ,
Լ.Մ. ՍԱՎՉԵՆԿՈ
ԿԵՐԱՄԻԿԱԿԱՆ ՆԵՐՎԵՐԻ ՀԱՄԱՐ ՈՍԿԻ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ՊԻԳՄԵՆՏԻ ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ
ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄ**

Երևանի նյութաբանության ինստիտուտում մշակվել և արտադրության մեջ ներդրվել են տարբեր գույնի ներկեր, բացի թանկարժեք, ոսկի պարունակող ալ-կարմիր՝ օպուրպուր ներկից: Պատրաստված ներկերով ձևավորվել են կերամիկայից և էմալպատված պողպատից պատրաստված իրեր: Ստացված ներկերն ունեն լավ որակ:

**H.Gh. GEOKCHYAN, L.A. MKRTCHYAN, M.A. POGHOSYAN,
A.G. HAMBARZUMYAN, L.M. SAVCHENKO
TECHNOLOGY IMPROVEMENT FOR OBTAINING GOLD BEARING PIGMENT FOR CERAMIC PAINTS**

Ceramic paints of diverse colors except for expensive gold-bearing paints «purple» are developed and implemented. Samples of paints covering the pottery and metallic enamel surfaces are obtained. Pictures of good quality are given.

В.С. САРКИСЯН, Г.А. АДИЛХАНИЯН

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНОГО УГЛА СДВИГА НА БОКОВЫХ ГРАНЯХ ФРАГМЕНТОВ ПРИЗМЫ ОБРУШЕНИЯ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ СТРОЕНИИ ГРУНТОВОГО МАССИВА

Описывается методика определения предельного угла сдвига на боковых гранях фрагментов призмы обрушения неоднородного грунтового массива при расчетах устойчивости грунтовых откосов. В основу методики заложены допущение независимости действия сил, а также гипотеза, согласно которой грани фрагментов, бывшие плоскими до деформации, остаются такими и во время деформации (гипотеза плоских сечений).

Ключевые слова: устойчивость грунтового откоса, предельный угол сдвига, неоднородный отсек обрушения, внецентренное сжатие, принцип независимости действия сил.

При определении устойчивости грунтового массива с применением расчлененной модели призмы обрушения [1,2] на боковых гранях фрагментов возникает нарушение закона Кулона-Мора. Величина расчетного угла наклона сил взаимодействия между фрагментами от нормали к боковой грани фрагмента превосходит предельно допустимое его значение, диктуемое физико-механическими свойствами грунтов, слагающих фрагмент на его боковой грани [3].

При решении задачи возникает вопрос, каким образом следует определить предельное значение угла наклона сил взаимодействия между фрагментами призмы обрушения с однородным и неоднородным строениями [4-6], т.е. в условиях, при которых боковые грани фрагментов могут пересекать различные по своим механическим свойствам слои грунтов.

При *однородном* строении грунтового массива возможны следующие расчетные случаи:

1) боковая грань фрагмента полностью находится в пределах однородного сыпучего грунта ($c=0$, $\varphi \neq 0$), тогда предельное значение угла наклона сил взаимодействия равно

$$\varphi_{\text{инр}} = \varphi_{\text{икр}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{инр}}$ – соответствующий предельный угол сдвига; $\varphi_{\text{икр}}$ – критический угол внутреннего трения на текущей грани;

2) слой, полностью включающий боковую грань фрагмента, состоит из однородного связного грунта ($c \neq 0$, $\varphi \neq 0$), тогда предельный угол будет равен

$$\varphi_{\text{инр}} = \arctg \frac{E_{\text{ix}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{икр}} + c_{\text{икр}} A_i}{E_{\text{ix}}}, \quad (2)$$

где E_{ix} – результирующая, критическая нормальная к боковой поверхности фрагмента сила; c_{ikp} – удельное критическое сцепление на боковой поверхности фрагмента; A_i – площадь текущей боковой грани.

В случае, когда грунтовый массив *неоднороден*, то есть в пределах боковой грани оказывается два и больше слоев грунтов, для каждого из них критические угол внутреннего трения и удельное сцепление известны: $tg\varphi_{ikp} = tg\varphi_{id} / k_{st}$; $c_{ikp} = c_{id} / k_{st}$ [2], где φ_{id} и c_{id} – действительные (расчетный) угол внутреннего трения и удельное сцепление соответственно; k_{st} – коэффициент запаса. Однако поскольку при расчете устойчивости силы взаимодействия являются равнодействующим вектором, который относится ко всей грани, а не к каждому слою грунта, пересеченному гранью, то для выяснения факта нарушения закона о предельном угле сдвига [3,7] на боковой грани следует каким-либо образом осреднить критические прочностные параметры на сдвиг и произвести сопоставление расчетного угла наклона сил взаимодействия со средневзвешенными прочностными параметрами.

Так как на поверхности сдвига равнодействующая касательных напряжений не может превосходить несущую способность, следовательно, должно соблюдаться следующее условие:

$$|E_{iy}| \leq \int_{A_i} \tau dA = \int_{A_i} (\sigma tg\varphi_{jkr} + c_{jkr}) dA, \quad (3)$$

где i – номер фрагмента; j – номер слоя грунта в текущем фрагменте.

В неравенстве (3) правая часть представляет собой равнодействующую предельных касательных напряжений для случая переменных физико-механических свойств в разных точках поверхности возможного сдвига согласно закону Кулона – Мора.

Суть осреднения критических угла внутреннего трения и удельного сцепления заключается в том, что эти осредненные прочностные параметры должны обеспечивать на поверхности сдвига такую же равнодействующую предельных касательных напряжений, что и по формуле (3), т.е.

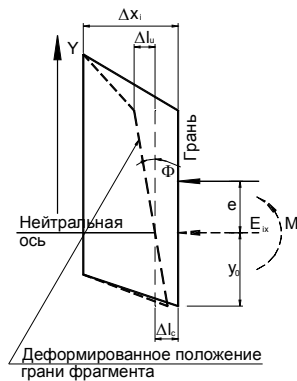


Рис.

$$\int_{A_i} \tau dA = tg\varphi_{is} \int_{A_i} \sigma dA + c_{is} A_i, \quad (4)$$

где τ – предельное касательное напряжение на грани фрагмента в текущем слое; φ_{is} и c_{is} – осредненные критические угол внутреннего трения и удельное сцепление соответственно; σ – нормальное напряжение на грани того же слоя.

В случае неоднородного строения грунтового массива расчетное значение предельного сопротивления сдвигу на различных участках граней фрагментов неодинаково и зависит как от характеристик прочности грунтов, так и от распределения нормальных напряжений на гранях фрагментов. Равнодействующая нормальных

напряжений на боковой грани фрагмента равна горизонтальной составляющей силы взаимодействия E_i , определяемой из уравнений предельного равновесия с использованием гипотез относительно угла их наклона к горизонтальной оси. Однако именно распределение нормальных напряжений неизвестно. Учитывая, что задача определения устойчивости откосов основана на модели фрагментированной призмы обрушения, каждый фрагмент которой является твердым телом, на боковой грани которого действует сила взаимодействия, приложенная на некоторой высоте от подошвы, то на грани возникнет внецентренное сжатие.

Это явление представляет собой напряженно-деформированное состояние, являющееся случаем сложного сопротивления материала, при котором твердое тело испытывает действие силы, вызывающей одновременно деформации двух видов - сжатия и изгиба тела. Как и для простых видов напряженно-деформированного состояния, теория внецентренного сжатия основана на следующих допущениях [8]:

- поперечные сечения, бывшие плоскими до деформации, остаются плоскими и во время деформации (гипотеза плоских сечений);
- деформации волокон одинаковы по ширине сечения, т. е. нормальные напряжения, изменяясь по высоте сечения, остаются одинаковыми по ширине.

Первое допущение вполне соответствует твердотелости модели призмы обрушения, а второе - рассматриваемому плоскому типу задачи.

Предполагается, что касательные напряжения не связаны со смещениями. При расчетах на сложное сопротивление [8] обычно исходят из принципа независимости действия сил, т. е. предполагают, что влиянием деформаций, вызванных одной из приложенных к упругой системе нагрузок, на расположение, а следовательно, и на результаты действия остальных нагрузок, можно пренебречь. Следовательно, для нахождения полных напряжений и деформаций, возникающих в упругой системе, можно применять способ сложения действия сил, т. е. геометрически суммировать напряжения и перемещения, соответствующие различным видам простейших деформаций. Таким образом, внецентренно приложенный вектор горизонтальной проекции силы взаимодействия может быть заменен сжимающим равным по модулю и параллельным вектором, приложенным на высоте нейтральной оси, и изгибающим моментом, равным моменту этого исходного вектора относительно его нового положения (см. рис.).

Из вышеизложенного следует

$$\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_u, \quad (5)$$

где ε - результирующая величина относительной деформации грани; $\varepsilon_c = \Delta l_c / \Delta x$ - относительная деформация от силы сжатия фрагмента; $\varepsilon_u = \Delta l_u / \Delta x$ - относительная деформация от воздействия момента; Δl_c - абсолютное смещение грани, вызываемое центральным сжатием; Δl_u - абсолютное смещение грани, вызываемое наклоном (переменное по высоте); Δx - ширина текущего фрагмента.

Согласно гипотезе плоских сечений, $\varepsilon_u = y \operatorname{tg} \Phi / \Delta x$ (Φ - угол поворота плоской грани вокруг нейтральной оси), где, вводя обозначение $B = \operatorname{tg} \Phi / \Delta x$, получим

$$\varepsilon_u = By. \quad (6)$$

Согласно закону Гука, напряжения центрального и внецентренного сжатий равны

$$\sigma_c = E_d(y) \varepsilon_c, \quad \sigma_u = E_d(y) a y, \quad (7)$$

где $E_d(y)$ – функция распределения модуля деформации вдоль грани фрагмента.

Подставляя (7) в уравнения, выражающие условия равновесия вдоль оси, нормальной к поверхности боковой грани фрагмента, и моментного равновесия относительно центра тяжести, взвешенного относительно модуля деформации соответственно:

$$\int_{A_l} \sigma dA = E_{ix}, \quad \int_{A_l} \sigma y dA = e E_{ix}, \quad (8)$$

и учитывая, что E_c и B - величины постоянные по высоте фрагмента, находим

$$\varepsilon_c = \frac{E_{ix}}{\int_{A_l} E_d(y) dA}, \quad (9)$$

$$B = \frac{e E_{ix}}{\int_{A_l} E_d(y) y^2 dA}. \quad (10)$$

В выражениях (7)-(10) σ - нормальные контактные напряжения; E_{ix} – нормальная сила.

Эксцентриситет e и ордината y отсчитываются от оси, проходящей через центр тяжести подошвы сооружения, взвешенный пропорционально E_d .

Таким образом, с учетом (7), (9) и (10) суммарное напряжение на грани фрагмента будет

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_u = E_d(y) \frac{E_{ix}}{\int_{A_l} E_d(y) dA} + E_d(y) \frac{e y E_{ix}}{\int_{A_l} E_d(y) y^2 dA}. \quad (11)$$

Принцип осреднения угла внутреннего трения состоит в том, что подбирается такое его значение, при котором грань фрагмента будет оказывать такое же сопротивление, как и при неоднородном распределении данной величины. Аналитически данное условие можно записать в следующем виде:

$$E_{ix} \operatorname{tg} \varphi_{is} = \int_{A_l} \sigma \operatorname{tg} \varphi dA. \quad (12)$$

Следовательно, для определения осредненного значения угла внутреннего трения будем иметь

$$\operatorname{tg}\varphi_{is} = \frac{\int_{A_i} E_d(y) \operatorname{tg}\varphi dy}{\int_{A_i} E_d(y) dy} + \frac{e \int_{A_i} E_d(y) \operatorname{tg}\varphi y dy}{\int_{A_i} E_d(y) y^2 dy}. \quad (13)$$

Поскольку значение осредненного удельного сцепления не зависит от значения нормальной силы, а является физическим свойством грунтов, слагающих массив, следовательно, его можно определить как обычное средневзвешенное, т. е.

$$c_{is} = \frac{1}{A} \int_{A_i} c dy. \quad (14)$$

Во всех вышеприведенных выражениях y – ордината, отсчитываемая от нейтральной оси, положение которой определяется из следующих рассуждений.

Рассмотрим первое из уравнений равновесия (8), описывающее условие равновесия вдоль оси, нормальной к поверхности взаимного сдвига между фрагментами.

Подставив в это выражение уравнение (11), получим

$$\int_{A_i} \frac{E_d(y) E_{ix} dy}{\int_{A_i} E_d(y) dy} + \int_{A_i} \frac{E_d(y) E_{ix} e y dy}{\int_{A_i} E_d(y) y^2 dy} = E_{ix}. \quad (15)$$

Поскольку определенные интегралы в знаменателях выражения (15) представляют собой константы, независимые от ординаты, следовательно, их можно вывести из-под знака интеграла, как и величину E_{ix} .

Проведя некоторые преобразования и учитывая, что $e \neq 0$, получим

$$\int_{A_i} E_d(y) y dy = 0. \quad (16)$$

Выражение (16) представляет собой статический момент распределения модуля деформации на боковой грани фрагмента. Тот факт, что эта величина равна нулю, указывает на то, что нейтральная ось находится в центре тяжести распределения модуля деформации на боковой грани, а следовательно, положение нейтральной оси определяется, по аналогии с выражением для определения центра масс, по следующей формуле:

$$y_0 = \frac{\int_{A_i} E_d(y) y dy}{\int_{A_i} E_d(y) dy}. \quad (17)$$

Легко заметить, что формулы (13) и (14), выражающие значения осредненных угла внутреннего трения и сцепления в случае неоднородного грунта, приводятся к выражениям (1) и (2), применяемым для однородных массивов, если принять во внимание (16) и учесть, что количество слоев равно 1. Следовательно, выведенные на основе вышеописанных допущений

выражения (13) и (14) позволяют решить вопрос учета закона о предельном угле наклона сил взаимодействия с универсальных позиций.

Таким образом, предельный угол наклона сил взаимодействия между фрагментами для любой расчетной схемы грунтового массива можно определить в виде

$$\varphi_{\text{инр}} = \arctg \frac{E_{ix} \operatorname{tg} \varphi_{is} + c_{is} A_i}{E_{ix}}. \quad (18)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хуан Я.Х.** Устойчивость земляных откосов. -М.: Стройиздат, 1988.- 240 с.
2. **Чугаев Р.Р.** Земляные гидротехнические сооружения. -М.: Энергия, 1967.- 460 с.
3. **Саркисян В.С., Адилханян Г.А.** О нарушении одного из основополагающих законов механики грунтов в методах расчета устойчивости грунтовых откосов и склонов // Сб. тезисов докладов к научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГУП “НИИ ВОДГЕО”.- М., 2004. - С.168-173.
4. **Адилханян Г.А., Адилханян А.Г.** Методы расчета устойчивости грунтовых откосов и склонов // Известия НАН РА и ГИУА.-2001.-Т. 54, №3. – С. 352 – 359.
5. **Саркисян В.С., Адилханян Г.А.** О методах расчета устойчивости грунтовых откосов и склонов // Сб. научн. тр., посвящ. 80-летию архит.-строит. образования.-2001.- Т.3.- С.179-182.
6. **Можевитинов А.Л., Шинтемиров М.** Общий метод расчета устойчивости откосов земляных сооружений // Известия ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева.-1970.-Т.92.-С.11-22.
7. **Тарг С.М.** Краткий курс теоретической механики.-М.: Наука, 1968.-460 с.
8. **Беляев Н.М.** Соппротивление материалов.-М.: Гос. изд-во техн. – теор. лит-ры,1949.-772 с.

ЕрГУАС. Материал поступил в редакцию 24.08.2004.

Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,Հ.Ա. ԱԴԻԼԽԱՆՅԱՆ

ՓԼՈՒՋՄԱՆ ՊՐԻՋՄԱՅԻ ՇԵՐՏԵՐԻ ԿՈՂԱՅԻՆ ՆԻՍՏԵՐԻ ՎՐԱ ՄԱՀՔԻ ԱՆԿՑԱՆ ՄԱՀՄԱՆԱՅԻՆ ԱՐԺԵՔԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ՝ ԳՐՈՒՆՏԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾԻ ԱՆՀԱՄԱՍԵՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԴԵՊՁՈՒՄ

Նկարագրվում է փլուզման պրիզմայի շերտերի կողային նիստերի վրա սահքի անկյան սահմանային արժեքի որոշման մեթոդ անհամասեռ կառուցվածքի գրունտային զանգվածների համար կայունության հաշվարկներ կատարելիս: Մեթոդը հիմնված է ուժերի ազդեցության անկախության մասին ընդունելության և հարթ հատույթների կանխավարկածի վրա:

V.S. SARGSYAN, H.A. ADILKHANYAN

CRITICAL ANGLE DESIGN PROCEDURE OF SHIFT ON LATERAL FACE OF COLLAPSE PRISM FRAGMENTS IN INHOMOGENEOUS GROUND MASS STRUCTURE

A technique for determining critical shift angle on lateral face of collapse prism fragments for inhomogeneous ground mass in the design of ground slope stability is discussed. This method is based on an assumption of action force independence and a hypothesis according to which the faces of fragments being flat before strain remain the same during the strain (hypothesis of flat cross-sections).

В.С. ХАЧАТРЯН, М.А. МНАЦАКАНЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРИРОСТОВ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Предлагается новый метод определения допустимых частных производных от потерь активной мощности по активным мощностям станционных узлов как результат расчета допустимого установившегося режима ЭЭС методом декомпозиции. Рассматривается случай, когда относительно независимых станционных узлов в качестве исходной информации задаются активные и реактивные мощности.

Ключевые слова: модель, узел, режим, матрица, модуль, потеря, мощность, аргумент, подсистема, оптимизация.

Как известно, при построении математической модели и оптимизации режима электроэнергетической системы (ЭЭС) важное место занимает учет состояния сети в виде функции потерь мощностей [1-5]. Из необходимого условия минимума целевой функции в последующих нелинейных алгебраических уравнениях оптимизации режима ЭЭС получаются выражения относительных приростов потерь в виде частных производных от потерь мощности по мощностям станционных узлов. Для определения допустимых оптимальных режимов ЭЭС необходимо обеспечить допустимость относительных приростов потерь мощностей.

В настоящей работе впервые ставится задача определения допустимых относительных приростов потерь активной мощности большой ЭЭС (БЭЭС) при P-Q типе станционных узлов методом декомпозиции.

Постановка задачи. Рассматривается БЭЭС, которая состоит из N электрически связанных подсистем и характеризуется M+1 узловыми точками. Каждая подсистема состоит из $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_N$ узлов так, что $M_1 + M_2 + \dots + M_N = M$. Один из станционных узлов выбирается базисным по напряжению и балансирующим по мощностям.

После удаления соответствующего количества межподсистемных связей БЭЭС представляется как совокупность N радиально связанных подсистем.

Принимается следующая система индексов:

- для станционных узлов:

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

- для нагрузочных узлов:

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

- для произвольных узлов, которые могут быть как станционными, так и нагрузочными:

При этом математическая модель БЭЭС для определения допустимых относительных приростов потерь мощностей представляется в виде

$$\ddot{\mathbf{I}}_a = (\ddot{\mathbf{I}}_{a1}, \ddot{\mathbf{I}}_{a2}, \dots, \ddot{\mathbf{I}}_{aN}), \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{c|c|c|c} \Phi_{p_{i_1}}(P, Q, U, \Psi_u)=0, & & & \\ \Phi_{q_{i_1}}(P, Q, U, \Psi_u)=0, & & & \\ \hline & \Phi_{p_{i_2}}(P, Q, U, \Psi_u)=0, & & \\ & \Phi_{q_{i_2}}(P, Q, U, \Psi_u)=0, & & \\ \hline & & \dots & \\ & & & \Phi_{p_{i_N}}(P, Q, U, \Psi_u)=0, \\ & & & \Phi_{q_{i_N}}(P, Q, U, \Psi_u)=0, \end{array} \right), \quad (2)$$

$$U_{m_1, \min} \leq U_{m_1} \leq U_{m_1, \max}, \quad Q_{m_1, \min} \leq Q_{m_1} \leq Q_{m_1, \max}; \quad (3)$$

$$U_{m_2, \min} \leq U_{m_2} \leq U_{m_2, \max}, \quad Q_{m_2, \min} \leq Q_{m_2} \leq Q_{m_2, \max}; \quad (4)$$

$$\begin{array}{c} \dots\dots\dots \\ U_{m_N,\min} \leq U_{m_N} \leq U_{m_N,\max}, \quad Q_{m_N,\min} \leq Q_{m_N} \leq Q_{m_N,\max}. \end{array} \quad (5)$$

Здесь $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2}, \dots, \dot{I}_{an}$ - функции потерь активных мощностей радиально связанных подсистем; в (2) приведены системы нелинейных алгебраических уравнений установившихся режимов отдельных подсистем, представленных в неявновыраженных формах; (3)-(5) изображают ограничения типа неравенств, налагаемые на режимные параметры станционных узлов.

Решение задачи. Представим математическую модель БЭЭС (1)-(5) как совокупность математических моделей отдельных подсистем:

- для первой подсистемы:

$$\ddot{I}_{a1} = \ddot{I}_{a1}(P, Q, U, \Psi_u), \quad (6)$$

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{pm}_i}(\text{P}, \text{Q}, \text{U}, \Psi_u) &= 0, & \Phi_{\text{pk}_i}(\text{P}, \text{Q}, \text{U}, \Psi_u) &= 0, \\ \Phi_{\text{qm}_i}(\text{P}, \text{Q}, \text{U}, \Psi_u) &= 0, & \Phi_{\text{qk}_i}(\text{P}, \text{Q}, \text{U}, \Psi_u) &= 0,\end{aligned}\tag{7}$$

$$U_{m_l, \min} \leq U_{m_l} \leq U_{m_l, \max}, \quad Q_{m_l, \min} \leq Q_{m_l} \leq Q_{m_l, \max}; \quad (8)$$

- для второй подсистемы:

$$\ddot{\Gamma}_{a2} = \ddot{\Gamma}_{a2}(P, Q, U, \Psi_u), \quad (9)$$

$$\begin{aligned}\Phi_{pm_2}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0, & \Phi_{pk_2}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0, \\ \Phi_{qm_2}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0, & \Phi_{qk_2}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0,\end{aligned}\quad (10)$$

$$U_{m_2, \min} \leq U_{m_2} \leq U_{m_2, \max}, \quad Q_{m_2, \min} \leq Q_{m_2} \leq Q_{m_2, \max}; \quad (11)$$

- для N-й подсистемы:

$$\dot{I}_{aN} = \dot{I}_{aN}(P, Q, U, \Psi_u), \quad (12)$$

$$\begin{aligned}\Phi_{pm_N}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0, & \Phi_{pk_N}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0, \\ \Phi_{qm_N}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0, & \Phi_{qk_N}(P, Q, U, \Psi_u) &= 0,\end{aligned}\quad (13)$$

$$U_{m_N, \min} \leq U_{m_N} \leq U_{m_N, \max}, \quad Q_{m_N, \min} \leq Q_{m_N} \leq Q_{m_N, \max}. \quad (14)$$

Аналитические выражения потерь мощностей приводятся в [1-3].

Теперь рассмотрим решение задачи для отдельных подсистем, т.е. математическую модель (6)-(8) первой подсистемы. В зависимости от исходной информации относительно независимых станционных узлов, выражения относительных приростов потерь активной мощности по активным мощностям представляются в соответствующей форме.

В настоящей работе рассматривается случай, когда станционные узлы являются типа P-Q т.е. относительно них в качестве исходной информации задаются активные и реактивные мощности. Соответствующее выражение относительных приростов потерь имеет вид

$$\frac{\partial \dot{I}_{a1}}{\partial P_{m_1}} = \left(\frac{\partial \dot{I}_{a1}}{\partial P_{m_1}} \right) + \sum_{j_1=1}^{M_1} \frac{\partial \dot{I}_{a1}}{\partial U_{j_1}} \frac{\partial U_{j_1}}{\partial P_{m_1}} + \sum_{j_1=1}^{M_1} \frac{\partial \dot{I}_{a1}}{\partial \Psi_{uj_1}} \frac{\partial \Psi_{uj_1}}{\partial P_{m_1}}. \quad (15)$$

С другой стороны, относительно системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима можно написать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial \Phi_{pi_1}}{\partial P_{m_1}} \right) + \sum_{j_1=1}^{M_1} \frac{\partial \Phi_{pi_1}}{\partial U_{j_1}} \frac{\partial U_{j_1}}{\partial P_{m_1}} + \sum_{j_1=1}^{M_1} \frac{\partial \Phi_{pi_1}}{\partial \Psi_{uj_1}} \frac{\partial \Psi_{uj_1}}{\partial P_{m_1}} &= 0, \\ \left(\frac{\partial \Phi_{qi_1}}{\partial P_{m_1}} \right) + \sum_{j_1=1}^{M_1} \frac{\partial \Phi_{qi_1}}{\partial U_{j_1}} \frac{\partial U_{j_1}}{\partial P_{m_1}} + \sum_{j_1=1}^{M_1} \frac{\partial \Phi_{qi_1}}{\partial \Psi_{uj_1}} \frac{\partial \Psi_{uj_1}}{\partial P_{m_1}} &= 0.\end{aligned}\quad (16)$$

Представим систему уравнений (16) в виде матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{p_{i_1}}}{\partial \Psi_{u_{j_1}}} & \frac{\partial \Phi_{p_{i_1}}}{\partial U_{j_1}} \\ \frac{\partial \Psi_{u_{j_1}}}{\partial \Phi_{q_{i_1}}} & \frac{\partial U_{j_1}}{\partial \Phi_{q_{i_1}}} \\ \frac{\partial \Psi_{u_{j_1}}}{\partial \Psi_{u_{j_1}}} & \frac{\partial U_{j_1}}{\partial U_{j_1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_{u_{j_1}}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial U_{j_1}}{\partial P_{m_1}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{p_{i_1}}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{q_{i_1}}}{\partial P_{m_1}} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Из матричного уравнения (17) можно определить столбцовую матрицу искоемых частных производных $\partial \Psi_{u_{j_1}} / \partial P_{m_1}$ и $\partial U_{j_1} / \partial P_{m_1}$:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_{u_{j_1}}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial U_{j_1}}{\partial P_{m_1}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{p_{i_1}}}{\partial \Psi_{u_{j_1}}} & \frac{\partial \Phi_{p_{i_1}}}{\partial U_{j_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{q_{i_1}}}{\partial \Psi_{u_{j_1}}} & \frac{\partial \Phi_{q_{i_1}}}{\partial U_{j_1}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{p_{i_1}}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{q_{i_1}}}{\partial P_{m_1}} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Аналитические выражения частных производных $(\partial \tilde{I}_{a1} / \partial P_{m_1})$, $\partial \tilde{I}_{a1} / \partial U_{j_1}$, $\partial \tilde{I}_{a1} / \partial \Psi_{u_{j_1}}$, а также $\partial \Phi_{p_{i_1}} / \partial P_{m_1}$, $\partial \Phi_{q_{i_1}} / \partial P_{m_1}$ подробно приводятся в [3].

Рассмотрим вопрос определения допустимых относительных приростов потерь активной мощности, определяемых формулой (15).

Матричное уравнение (18) в подробной форме можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_{un_1}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial \Psi_{uk_1}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial P_{m_1}}{\partial U_{n_1}} \\ \frac{\partial P_{m_1}}{\partial U_{k_1}} \\ \frac{\partial P_{m_1}}{\partial P_{m_1}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{uk_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{k_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{uk_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{k_1}} \\ \frac{\partial \Psi_{un_1}}{\partial \Phi_{qm_1}} & \frac{\partial \Psi_{uk_1}}{\partial \Phi_{qm_1}} & \frac{\partial U_{n_1}}{\partial \Phi_{qm_1}} & \frac{\partial U_{k_1}}{\partial \Phi_{qm_1}} \\ \frac{\partial \Psi_{un_1}}{\partial \Phi_{qk_1}} & \frac{\partial \Psi_{uk_1}}{\partial \Phi_{qk_1}} & \frac{\partial U_{n_1}}{\partial \Phi_{qk_1}} & \frac{\partial U_{k_1}}{\partial \Phi_{qk_1}} \\ \frac{\partial \Psi_{un_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Psi_{uk_1}}{\partial \Psi_{uk_1}} & \frac{\partial U_{n_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial U_{k_1}}{\partial U_{k_1}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pn_1}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial P_{m_1}} \\ \frac{\partial P_{m_1}}{\partial \Phi_{qn_1}} \\ \frac{\partial P_{m_1}}{\partial \Phi_{qk_1}} \\ \frac{\partial P_{m_1}}{\partial P_{m_1}} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Рассмотрим решение системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (7) методом Ньютона-Рафсона, при котором соответствующее рекуррентное выражение имеет вид

$$\begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \Psi_{uk_1} \\ U_{m_1} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^{\dot{E}+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{um_1} \\ \Psi_{uk_1} \\ U_{m_1} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^{\dot{E}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где И - номер итерации.

Вторая столбцовая матрица правой части рекуррентного выражения (20) определяется на основании следующего матричного выражения:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \\ \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{pk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{qm_1}}{\partial U_{\ell_1}} \\ \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial \Psi_{un_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial \Psi_{u\ell_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial U_{n_1}} & \frac{\partial \Phi_{qk_1}}{\partial U_{\ell_1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где ΔP_{m_1} , ΔP_{k_1} , ΔQ_{m_1} , ΔQ_{k_1} - приращения соответствующих режимных параметров независимых узлов первой подсистемы.

Выражения частных производных, входящих в матрицу Якоби (21), определяются на основании (7), аналитические выражения которых приведены в [5] в виде систем нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима (20) и (21).

Искомая столбцовая матрица приращений режимных параметров имеет вид

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{um_1} \\ \Delta\Psi_{uk_1} \\ \Delta U_{m_1} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_1n_1} & a_{m_1\ell_1} & b_{m_1n_1} & b_{m_1\ell_1} \\ a_{k_1n_1} & a_{k_1\ell_1} & b_{k_1n_1} & b_{k_1\ell_1} \\ c_{m_1n_1} & c_{m_1\ell_1} & d_{m_1n_1} & d_{m_1\ell_1} \\ c_{k_1n_1} & c_{k_1\ell_1} & d_{k_1n_1} & d_{k_1\ell_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_{m_1} \\ \Delta P_{k_1} \\ \Delta Q_{m_1} \\ \Delta Q_{k_1} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где a, b, c, и d - элементы обращенной матрицы.

Предположим, что относительно независимых станционных узлов задаются активные мощности и модули комплексных напряжений. Тогда матричное выражение (22) примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um_1}}{\Delta\Psi_{uk_1}} \\ 0 \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_1 n_1} & a_{m_1 \ell_1} & b_{m_1 n_1} & b_{m_1 \ell_1} \\ a_{k_1 n_1} & a_{k_1 \ell_1} & b_{k_1 n_1} & b_{k_1 \ell_1} \\ c_{m_1 n_1} & c_{m_1 \ell_1} & d_{m_1 n_1} & d_{m_1 \ell_1} \\ c_{k_1 n_1} & c_{k_1 \ell_1} & d_{k_1 n_1} & d_{k_1 \ell_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_{m_1}}{\Delta P_{k_1}} \\ \frac{\Delta Q_{m_1}}{\Delta Q_{k_1}} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Представим матричное выражение (23) в виде двух подматричных выражений:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um_1}}{\Delta\Psi_{uk_1}} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_{m_1 n_1} & a_{m_1 \ell_1} & b_{m_1 n_1} & b_{m_1 \ell_1} \\ a_{k_1 n_1} & a_{k_1 \ell_1} & b_{k_1 n_1} & b_{k_1 \ell_1} \\ c_{m_1 n_1} & c_{m_1 \ell_1} & d_{m_1 n_1} & d_{m_1 \ell_1} \\ c_{k_1 n_1} & c_{k_1 \ell_1} & d_{k_1 n_1} & d_{k_1 \ell_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_{m_1}}{\Delta P_{k_1}} \\ \frac{\Delta Q_{m_1}}{\Delta Q_{k_1}} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

$$0 = c_{m_1 n_1} \Delta P_{m_1} + c_{m_1 \ell_1} \Delta P_{k_1} + d_{m_1 n_1} \Delta Q_{m_1} + d_{m_1 \ell_1} \Delta Q_{k_1}. \quad (25)$$

Из (25) устанавливаем следующее выражение для приращения реактивной мощности:

$$\Delta Q_{m_1} = -d_{m_1 n_1}^{-1} K_{n_1 \ell_1}, \quad (26)$$

где

$$K_{n_1 \ell_1} = c_{m_1 n_1} \Delta P_{m_1} + c_{m_1 \ell_1} \Delta P_{k_1} + d_{m_1 \ell_1} \Delta Q_{k_1}. \quad (27)$$

На основании полученного выражения (27) можно установить численные значения реактивных мощностей независимых станционных узлов первой подсистемы. Затем определяются действительные значения реактивных мощностей Q_{m_1} , пользуясь вторым уравнением системы (7), и проверяются условия их допустимости:

$$Q_{m_1, \min} \leq Q_{m_1} \leq Q_{m_1, \max}. \quad (28)$$

1. Предположим, что условие (28) полностью обеспечивается, т.е. реактивные мощности независимых станционных узлов находятся в допустимых пределах. При этом, определяя на основании (24) приращения $\Delta\Psi_{um_1}$, $\Delta\Psi_{uk_1}$, ΔU_{k_1} , устанавливаем их действительные значения:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_1}}{\Psi_{uk_1}} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^{\dot{E}+1} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_1}}{\Psi_{uk_1}} \\ U_{k_1} \end{bmatrix}^{\dot{E}} - \begin{bmatrix} \frac{\Delta\Psi_{um_1}}{\Delta\Psi_{uk_1}} \\ \Delta U_{k_1} \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Фактически для станционных узлов, относительно которых были заданы активные мощности и модули комплексных напряжений, были определены их неизвестные аргументы и допустимые реактивные мощности. Для нагрузочных узлов определены модули и аргументы комплексных напряжений.

2. Если условие (28) не обеспечивается, то могут быть два случая, когда реактивные мощности больше $Q_{m_i, \max}$ или меньше $Q_{m_i, \min}$. В первом случае станционный узел типа $P_{m_i} - U_{m_i}$ заменяется на $P_{m_i} - Q_{m_i, \max}$, а во втором - на $P_{m_i} - Q_{m_i, \min}$. Фактически независимые станционные узлы типа P-U превращаются в узлы типа P-Q. При этом расчет установившегося режима осуществляется на основании рекуррентного выражения (20). Проведя первую итерацию, устанавливаем численные значения режимных параметров, Ψ_{um} , Ψ_{uk} , U_k и U_m . Определяя модули комплексных напряжений независимых станционных узлов, проверяется следующее условие допустимости:

$$U_{m_i, \min} \leq U_{m_i} \leq U_{m_i, \max} \quad (30)$$

Если это условие обеспечивается, то это означает, что задача допустимого установившегося режима решалась при P-Q типе станционных узлов. Следовательно, матрица Якоби рекуррентного выражения (21), т.е. матрица Якоби выражения (19), допустимая. В силу этого допустимые относительные приросты потерь активной мощности определяются на основании (15).

Определяя требуемые допустимые относительные приросты первой подсистемы, переходим к решению данной задачи для второй подсистемы путем построения соответствующей математической подмодели установившегося режима. При этом используются результаты расчета установившегося режима первой подсистемы. Имея численное значение комплексного напряжения примыкающего узла первой подсистемы, для определения допустимых относительных приростов второй подсистемы поступаем аналогичным образом и т.д. Допустимые относительные приросты потерь активной мощности для последней N - й подсистемы определяются на основании следующего выражения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ddot{I}_{aN}}{\partial P_{m_N}} = & \left(\frac{\partial \ddot{I}_{aN}}{\partial P_{m_N}} \right) + \sum_{n_N} \frac{\partial \ddot{I}_{aN}}{\partial U_{n_N}} \frac{\partial U_{n_N}}{\partial P_{m_N}} + \sum_{k_N} \frac{\partial \ddot{I}_{aN}}{\partial U_{k_N}} \frac{\partial U_{k_N}}{\partial P_{m_N}} + \\ & + \sum_{n_N} \frac{\partial \ddot{I}_{aN}}{\partial \Psi_{un_N}} \frac{\partial \Psi_{un_N}}{\partial P_{m_N}} + \sum_{k_N} \frac{\partial \ddot{I}_{aN}}{\partial \Psi_{uk_N}} \frac{\partial \Psi_{uk_N}}{\partial P_{m_N}}. \end{aligned} \quad (31)$$

Частные производные $\partial \Psi_{un_N} / \partial P_{m_N}$, $\partial \Psi_{uk_N} / \partial P_{m_N}$, $\partial U_{n_N} / \partial P_{m_N}$ $\partial U_{k_N} / \partial P_{m_N}$ определяются на основании следующего матричного выражения:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_{un_N}}{\partial P_{m_N}} \\ \frac{\partial \Psi_{uk_N}}{\partial P_{m_N}} \\ \frac{\partial P_{m_N}}{\partial U_{n_N}} \\ \frac{\partial P_{m_N}}{\partial U_{k_N}} \\ \frac{\partial P_{m_N}}{\partial P_{m_N}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial U_{\ell_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial U_{\ell_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial U_{\ell_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial U_{\ell_N}} \\ \frac{\partial \Psi_{un_N}}{\partial P_{m_N}} & \frac{\partial \Psi_{u\ell_N}}{\partial P_{m_N}} & \frac{\partial U_{n_N}}{\partial P_{m_N}} & \frac{\partial U_{\ell_N}}{\partial P_{m_N}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pn_N}}{\partial P_{m_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial P_{m_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{qn_N}}{\partial P_{m_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial P_{m_N}} \\ \frac{\partial P_{m_N}}{\partial P_{m_N}} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона-Рафсона, для решения систем нелинейных алгебраических уравнений (13) установившегося режима N - й подсистемы представляется в виде

$$\begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_N}}{\Psi_{uk_N}} \\ \frac{U_{mn}}{U_{k_N}} \end{bmatrix}^{\dot{E}+1} = \begin{bmatrix} \frac{\Psi_{um_N}}{\Psi_{uk_N}} \\ \frac{U_{mn}}{U_{k_N}} \end{bmatrix}^{\dot{E}} - \begin{bmatrix} \frac{\Delta \Psi_{um_N}}{\Delta \Psi_{uk_N}} \\ \frac{\Delta U_{mn}}{\Delta U_{k_N}} \end{bmatrix} \quad (33)$$

и

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{m_N} \\ \Delta P_{k_N} \\ \Delta Q_{m_N} \\ \Delta Q_{k_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{pm_N}}{\partial U_{\ell_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{pk_N}}{\partial U_{\ell_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{qm_N}}{\partial U_{\ell_N}} \\ \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial \Psi_{un_N}} & \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial \Psi_{u\ell_N}} & \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial U_{n_N}} & \frac{\partial \Phi_{qk_N}}{\partial U_{\ell_N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{um_N} \\ \Delta \Psi_{uk_N} \\ \Delta U_{mn} \\ \Delta U_{k_N} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

где ΔP_{m_N} , ΔP_{k_N} , ΔQ_{m_N} , ΔQ_{k_N} - приращения соответствующих режимных параметров N-й подсистемы.

Искомая столбцовая матрица приращений определяется в виде

$$\begin{bmatrix} \Delta \Psi_{um_N} \\ \Delta \Psi_{uk_N} \\ \Delta U_{mn} \\ \Delta U_{k_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m_N n_N} & a_{m_N \ell_N} & b_{m_N n_N} & b_{m_N \ell_N} \\ a_{k_N n_N} & a_{k_N \ell_N} & b_{k_N n_N} & b_{k_N \ell_N} \\ c_{m_N n_N} & c_{m_N \ell_N} & d_{m_N n_N} & d_{m_N \ell_N} \\ c_{k_N n_N} & c_{k_N \ell_N} & d_{k_N n_N} & d_{k_N \ell_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{m_N} \\ \Delta P_{k_N} \\ \Delta Q_{m_N} \\ \Delta Q_{k_N} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Затем требуется установить матрицу Якоби для определения допустимых относительных приростов согласно выражению (31). Допустимость матрицы Якоби осуществляется вышеприведенным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.- №2.-С. 101-108.
2. **Хачатрян В. С.** Метод определения относительных приростов потерь в сетях больших электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1974.- №5.-С. 138-142.
3. **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.-№2.-С. 57-65.
4. **Хачатрян В. С.** Метод и алгоритм оптимизации режимов больших энергосистем // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1976.- №5.- С. 24-34.
5. **Мнацаканян М. А.** Расчет допустимого установившегося режима ЭЭС методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2004.-Т. 57, №1.- С. 83-93.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.05.2004.

Վ. Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Մ. Ա. ՄՆԱՏԱԿԱՆՅԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱՎՏԻՎ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՍՏԻ ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆ ԱՃԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՏՐՈՀՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ

Առաջարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի ակտիվ հզորության կորստի թույլատրելի մասնակի ածանցյալների որոշման նոր մեթոդ՝ որպես թույլատրելի կայունացված ռեժիմի հաշվման արդյունք: Դիտարկվում է այն դեպքը, երբ անկախ կայանային հանգույցների համար որպես նախնական ինֆորմացիա տրվում են ակտիվ և ռեակտիվ հզորությունները:

V.S. KHACHATRYAN, M.A. MNATSAKANYAN PERMISSIBLE RELATIVE POWER LOSS GROWTH DETERMINATION IN THE ELECTRICAL POWER SYSTEM BY DECOMPOSITION METHOD

A new method of determining permissible partial derivative losses of active power in station units as a result of steady-state conditions by decomposition method is proposed.

В.Г. ПЕТРОСЯН

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ

Дается описание и основные функции информационной системы представления параметров безопасности (СППБ) блока №2 Армянской АЭС. Представлены её структура, описание программно-технического комплекса, её особые функции с подразделениями, а также программное обеспечение (ПО) со своими основными частями.

Ключевые слова: критические функции безопасности, программное обеспечение, алгоритм, подкритичность, герметичность.

1. Введение. СППБ энергоблока №2 Армянской АЭС - это информационная система реального времени, разработанная фирмой DS&S и НИИ «Арматом». Основное назначение СППБ – это осуществление информационной поддержки оперативного персонала блочного щита управления (БЩУ) при аварийных ситуациях и авариях. Кроме того, СППБ во всех режимах эксплуатации осуществляет контроль параметров, характеризующих критические функции безопасности (КФБ).

Поддержка оперативного персонала атомной станции обеспечивается:

- представлением в составе СППБ информации о состоянии КФБ с целью своевременного выявления симптомов нарушения условий целостности барьеров безопасности, принятых в соответствии с концепцией «глубоко эшелонированной защиты», и определением приоритетного для безопасности направления действий персонала;
- представлением оперативному персоналу и руководству АЭС обобщённой информации о параметрах, определяющих безопасность АЭС;
- контролем правильности выполнения аварийных действий.

2. Описание общей функциональной структуры СППБ. Целью создания СППБ является [1-3] повышение уровня безопасности энергоблока и снижение на энергоблоке вероятности возникновения аварийных ситуаций за счёт:

- раннего выявления отклонений в работе энергоблока;
- представления оперативному персоналу интегрированной информации о состоянии барьеров безопасности, систем безопасности, основного оборудования и параметров энергоблока;
- снижения количества ошибочных действий персонала, вызванных неправильной оценкой ситуации и/или принятием неправильных решений.

СППБ выполняет следующие функции:

(а) Сбор данных о технологических параметрах и состоянии арматуры и механизмов энергоблока и их передача.

(б) Обработка данных и управление ими:

- реализация алгоритмов обработки входной информации;
- реализация алгоритмов для вычисления расчётных переменных;
- ведение базы данных переменных СППБ.

(в) Запись данных:

- аналоговых и дискретных сигналов в оперативный архив;
- аналоговых и дискретных сигналов в долгосрочный архив;
- событий в архив сигнализации о нарушениях;
- дискретных сигналов в специальный архив;
- аналоговых и дискретных сигналов в архив возмущений.

(г) Представление данных:

- контроль состояния КФБ;
- контроль деревьев состояний КФБ;
- контроль основных технологических параметров в нормальных и аварийных режимах эксплуатации энергоблока;
- контроль состояния систем безопасности;
- контроль текущих и архивных значений технологических параметров;
- представление данных на форматах (мнемосхемы, тренды, диаграммы состояний, барграфы) ;
- вывод справочной информации;
- документирование информации.

С помощью СППБ для энергоблока №2 ААЭС осуществлён контроль следующих критических функций безопасности: подкритичности, охлаждения активной зоны, теплоотвода по второму контуру, целостности первого контура, герметичности.

3. Структура аппаратного обеспечения СППБ. Структурная схема аппаратного обеспечения СППБ представлена на рис. 1.

Аппаратное обеспечение состоит из следующих элементов:

(а) Системы сбора данных:

- подсистемы ввода-вывода;
- сервера данных G2 (процессоры ввода-вывода).

(б) Линии передачи данных:

- дублированной оптической сети сбора данных;
- дублированной оптической сети сбора верхнего уровня.

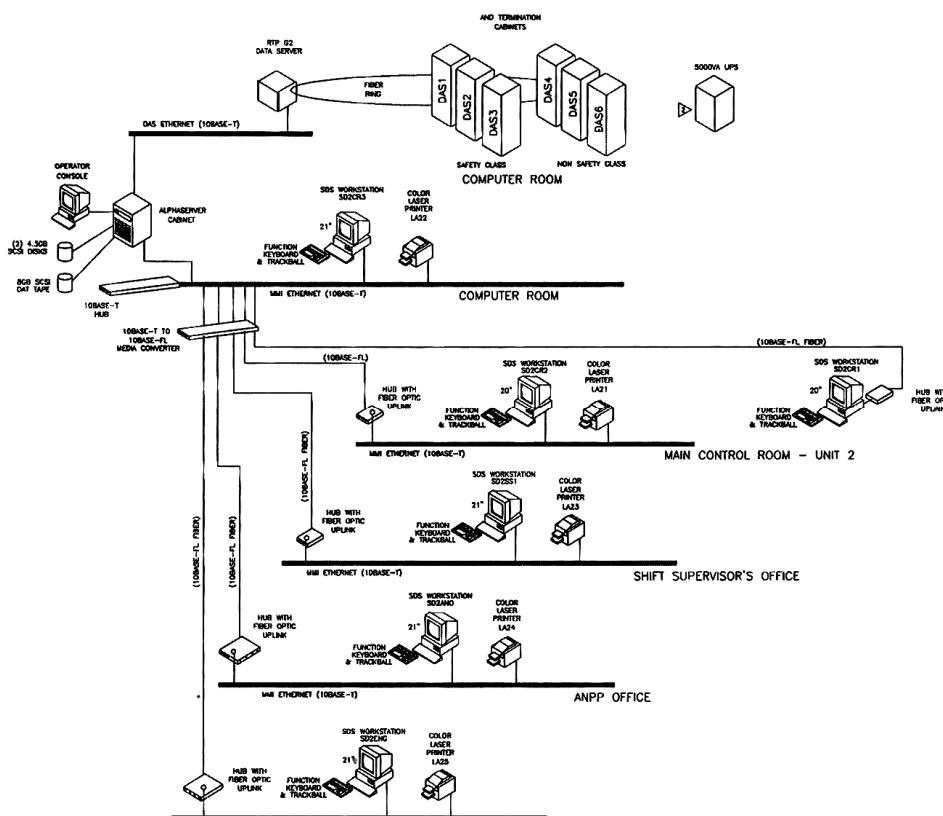


Рис.1. Структурная схема аппаратного обеспечения СПБ

(в) Альфа- сервера:

- рабочих станций для отображения информации;
- источников бесперебойного питания и печатающих устройств.

4. Структура программного обеспечения СПБ. Программное обеспечение (ПО) СПБ состоит из следующих частей:

- общесистемного программного обеспечения, включающего операционные системы и оболочки, стандартные сервисные программы, стандартные системы программирования и системы управления базами данных;
- специального программного обеспечения, включающего различные программные средства, решающие весь комплекс функциональных задач на блочном уровне. К этим программным средствам относятся программы обработки и анализа поступающей с блока информации,

базы данных, средств регистрации и документирования информации, отображения и графического представления информации персоналу АЭС.

На всех рабочих станциях СППБ установлена операционная система Windows NT4.0.

Для СППБ энергоблока №2 ААЭС используется специальное программное обеспечение SAIPMS и SDS/DV фирмы DS&S.

SAIPMS – это гибкое программное обеспечение для управления базой данных реального времени, тесно связанное с SDS/DV, работает под управлением операционной системы Open VMS и обеспечивает выполнение следующих функций:

- управление взаимодействием с системой сбора данных;
- поддержка и управление базой данных реального времени;
- проверка достоверности входных данных;
- выполнение различных типов арифметических, математических и логических операций;
- расчёт термодинамических состояний, архивирование базы данных и т. д.

SDS/DV – это программное обеспечение для организации человеко-машинного интерфейса в режиме реального времени, предназначенное для создания форматов и инструментов пользовательского интерфейса.

С помощью SDS/DV пользователь может создавать различные типы форматов, размещая на них объекты, устанавливая их динамические атрибуты, привязывая динамические объекты к источникам информации.

В качестве таких объектов могут использоваться: диаграммы, одно- и много-параметрические графики, деревья состояний, X-Y диаграммы, системы имитаций, табличный вывод данных, горизонтальные и вертикальные барграфы переменных, анимационные символы, динамические текстовые сообщения.

SDS/DV имеет доступ, отображает и манипулирует данными, поступающими практически от всех элементов SAIPMS: базы данных, оперативного архива, долговременного архива, подсистемы записи и анализа переходных процессов. Кроме того, SDS/DV обеспечивает интерфейс подсистеме сигнализаций и всем серверным приложениям. На рис. 2 представлены свод SAIPMS и SDS/DV, приложения и поддерживающие функции, из которых состоит SAIPMS.

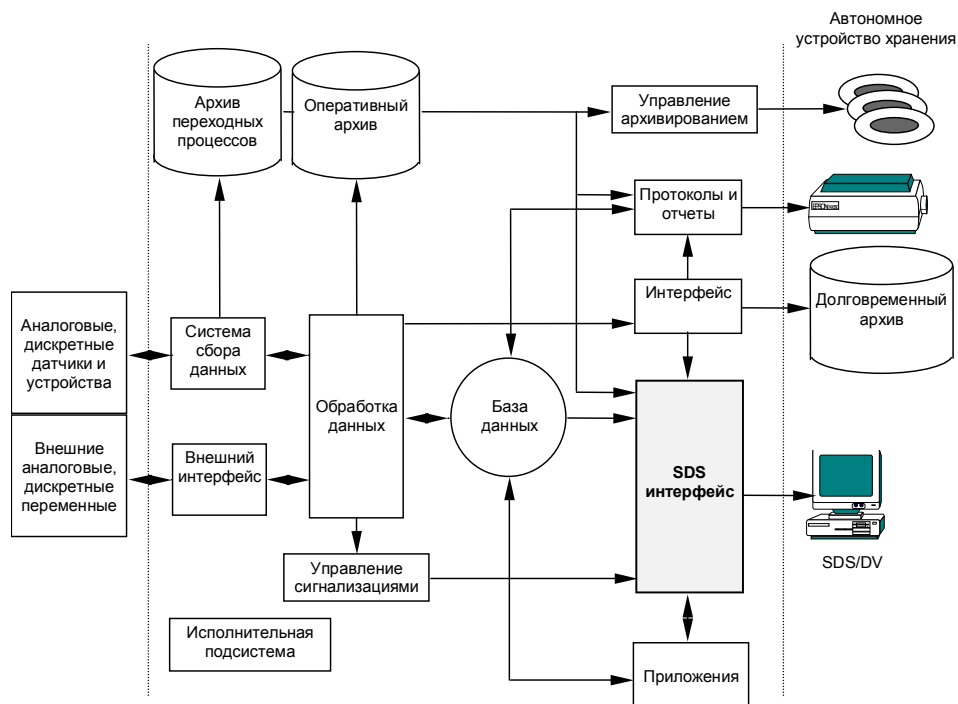


Рис. 2. Диаграмма передачи данных в SAIPMS

5. Назначение и описание форматов. Основные форматы СППБ предназначены для мониторинга параметров энергоблока. Форматы СППБ являются основным средством представления оператору операционной информации о параметрах энергоблока. Они организованы таким образом, что информация, относящаяся к различным системам, сгруппирована на разных форматах по функциональным признакам.

В СППБ для представления информации используются следующие типы форматов: мнемосхемы, диаграммы состояний, таблицы, временные зависимости переменных, гистограммы, сигнализации.

По каждому из параметров может быть получена дополнительная справочная информация, включающая:

- информацию о переменной;
- список входов;
- тренды по выбранным параметрам;
- общую информацию по базе данных.

В СППБ особое место занимают форматы верхнего уровня, предназначенные для отображения критических функций безопасности. Данный

формат предназначен для симптомно-ориентированной диагностики, роль которой заключается в том, чтобы:

- рассчитывать и представлять состояния КФБ на экране;
- указывать оператору необходимую симптомно-ориентированную инструкцию по восстановлению КФБ.

В заключение необходимо отметить, что программное обеспечение СППБ является открытым, математическое и программное обеспечения спроектированы с учетом возможности его расширения и совершенствования, модернизации и дальнейшего развития системы. Весь программно-технический комплекс СППБ функционирует нормально, является мощной системой для поддержки оперативного персонала и, как следствие, повышает уровень безопасности энергоблока №2 ААЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Atomic Energy Agency, Safety-Related Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. 50-SG-D8, 1984. - 50 p.
2. Functional design criteria for a safety parameter display system for nuclear power stations. IEC 960, 1988.
3. **Corcoran W.R., Finnium D.J., Hubbard F.R.** et.all. Nuclear Power-Plant Safety Functions // Nuclear Safety. – 1981. – V.22, № 2. – P.179-191.

НИИ «Арматом». Материал поступил в редакцию 10.12.2004.

Վ. Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԱԷԿ-Ի ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ԲԱՐՁՐԱՅՈՒՄԸ ԱՊՆՀ-Ի ՄԻՋՈՑՈՎ

Տրվում է Հայկական ԱԷԿ-ի երկրորդ էներգաբլոկի անվտանգության պարամետրերի ներկայացման համակարգի (ԱՊՆՀ) նկարագիրը, հիմնական գործառնություններն ու կառուցվածքը, նկարագրվում է ծրագրատեխնիկական համալիրը, վերջինիս առանձնահատուկ գործառնությունները բաժանմունքների հետ, ինչպես նաև ծրագրային ապահովումն իր հիմնական մասերով:

V.G. PETROSYAN

NPP SAFETY IMPROVEMENT WITH SPDS

Description and basic functions of the information safety parameter display system (SPDS) of ANPP unit #2, including the system structure, description of the program-technical complex, its specific functions with subdivisions, as well as software with its basic parts are presented.

Լ.Ա. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ՇԵՆՔԵՐԻ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՊԱՍԻՎ ՋԵՌՈՒՑՄԱՆ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Ներկայացվում են արևային պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետության որոշման հաշվարկային մեթոդ և վերջինիս օգնությամբ կառուցված գրաֆիկներ, որոնք բացահայտում են գոյություն ունեցող պասիվ ջեռուցմամբ կառույցների անկատարությունը, էներգետիկական անբավարար արդյունավետությունը, ինչպես նաև բացահայտում են այդ կոնստրուկցիաների բարելավման ուղիները:

Առանցքային բառեր. պասիվ արևային ջեռուցում, էներգետիկական արդյունավետություն, արևի ճառագայթման ինտենսիվություն, նոր կոնստրուկցիա:

Շենքերի արևային պասիվ ջեռուցման տեխնոլոգիան բավականին լայն կիրառություն ունի Եվրոպական երկրներում և ԱՄՆ-ում: Գոյություն ունեցող պասիվ ջեռուցման հիմնական եղանակը իրականացվում է շենքերի հարավային կողմնորոշման մակերևույթների մեծ մակերեսի ապակեպատման միջոցով, որի միջով թափանցող արևային ճառագայթային էներգիան, կլանվելով շենքի կոնստրուկցիաների և ներքին մակերևույթների կողմից, ներքին տարածքում ապահովում է որոշակի ջերմաստիճանային ռեժիմ [1, 2]:

Արևային պասիվ ջեռուցման հայտնի սխեմաներում շենքերի երկար և կրկնակի ապակեպատմամբ պատերը կողմնորոշվում են դեպի հարավ և շենքի բոլոր արտաքին կոնստրուկցիաները ջերմամեկուսացվում են: Ապակեպատ մակերեսները բաշխվում են անհավասարաչափ և հարավային մակերևույթների վրա կազմում են ամբողջ ապակեպատ մակերեսի շուրջ 75%-ը:

Ըստ գրականության մեջ առկա տվյալների [3], զարնանը և աշնանը արևի կողմից ստացված ջերմությունը բավարարում է շենքի լրիվ ջեռուցման համար և ապահովում է էներգիայի սպառման էական խնայողություն: Ձմռանը շենքերի ջերմապահանջի պակասորդը լրացվում է ջեռուցման տարբեր համակարգերի օգնությամբ: Սակայն չկա համապատասխան տեղեկատվություն պասիվ ջեռուցման հայտնի կոնստրուկցիաների՝ տարբեր կլիմայական պայմաններում էներգետիկական արդյունավետության մասին: Էներգիայի խնայողության տվյալները նշվում են հիմնականում Եվրոպական երկրների կլիմայական պայմանների համար, որտեղ, ինչպես հայտնի է, ձմռանը սեզոնում արտաքին օդի ջերմաստիճանները տատանվում են -5 -ից մինչև $+10^{\circ}\text{C}$ և ավելի սառնամանակում: Մեր գնահատումներով այդ կոնստրուկցիաները բավարար արդյունավետություն կարող են ունենալ, օրինակ, Տավուշի մարզի կլիմայական պայմաններում: Սակայն, Եվրոպական առկա փորձը չի հիմնավորում պասիվ ջեռուցման հայտնի կոնստրուկցիաների կիրառման արդյունավետությունը ավելի խիստ ձմռանային կլիմայական գոտիների համար, ինչպիսին, օրինակ, Հայաստանի տարածքի մեծ մասն է:

Մեր նախնական հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ հարավային պատի մեծ մակերեսով ապակեպատումը, արևի էներգիայի ընդունումից բացի, նաև

շենքի ներքին տարածքից ջերմության զգալի կորուստների պատճառ է: Հաշվարկներն ապացուցում են, որ արտաքին որոշակի ցածր ջերմաստիճանների տակ շենքի հարավային պատուհաններից ապակեպատ մակերեսով տեղի ունեցող ջերմային կորուստները գերազանցում են նույն մակերեսով թափանցող արևի էներգիային: Այդ հատկապես ցայտուն է արտահայտվում ամբողջ ջեռուցման սեզոնի կտրվածքով, երբ գիշերային և ոչ արևոտ ժամերին ապակեպատ մեծ մակերեսով թափանցող արևային ջերմությունը բացակայում է, իսկ դրա փոխարեն նույն մակերեսով տեղի են ունենում ավելի մեծ ջերմային կորուստներ, քան փոքր ապակեպատման դեպքում:

Այսպիսով, հարավային պատի մեծ ապակեպատումը սեզոնի արևոտ ժամերին տալիս է լրացուցիչ ջերմություն, սակայն, կլիմայական ցուրտ գոտիներում, օրվա և ամբողջ սեզոնի կտրվածքով, այն դառնում է ջերմային մեծ կորուստների աղբյուր: Ըստ մեր նախնական գնահատումների, օրինակ, Երևանի պայմաններում, այն կարող է բերել մինչև 40% ջերմության գերաձախսի, ինչը խոսում է պասիվ ջեռուցման հայտնի եղանակի էներգետիկական անբավարար արդյունավետության մասին:

Արևային պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետության գնահատման համար որոշ մասնագետների կողմից [4] առաջարկվում է կիրառել հարավային ապակեպատ մակերեսից դեպի շենք թափանցող արևի ջերմության $q_{\text{թ.հար.լ.}}$, $\varphi_{\text{տ}}$, և նույն շենքի ջերմապահանջի $q_{\text{ջ.պ.}}$, $\varphi_{\text{տ}}$, հետևյալ հարաբերությունը՝

$$\eta = \frac{q_{\text{թ.հար.լ.}}}{q_{\text{ջ.պ.}}}, \quad (1)$$

որը ցույց է տալիս, թե արևի ներթափանցած էներգիան շենքի ջեռուցման ամբողջ ջերմապահանջի որ մասն է կազմում: Սակայն այս մեթոդով կատարված գնահատումները գրականության մեջ լայն տարածում չունեն:

Պասիվ ջեռուցմամբ շենքերի ներկայումս կիրառվող եղանակի իրական արդյունավետության գնահատման համար (1) բանաձևի օգնությամբ կատարել ենք հաշվարկներ, որտեղ $q_{\text{թ.հար.լ.}}$ և $q_{\text{ջ.պ.}}$ մեծությունները վերագրել ենք շենքի միավոր ծավալին և նրանց որոշման համար առաջարկել ենք ներքևում շարադրված մեթոդը և հաշվարկային բանաձևերը:

Հարավային ապակեպատ մակերեսներով արևի ջերմության տեսակարար թափանցումները՝

$$q_{\text{թ.հար.լ.}} = I f_{\text{հար.լ.}} n, \quad (2)$$

որտեղ I -ն արևային ճառագայթման ինտենսիվությունն է հարավային կողմնորոշման մակերևույթի վրա, $\varphi_{\text{տ}}/u^2$, $f_{\text{հար.լ.}}$ -ը հարավային կողմնորոշման ապակեպատ մակերեսը՝ վերագրված շենքի $1/u^3$ -ին, u^2/u^3 , n -արևային էներգիայի թափանցումների նվազման գործակից, $n = 0,512$, որը հաշվի է առնում մակերեսի փոշոտվածությունը, ճառագայթների մի մասի անդրադարձումը և անթափանց շրջանակների ազդեցությունը:

Պասիվ ջեռուցվող շենքի տեսակարար ջերմապահանջը, $q_{\text{ջ.պ.}}$, $\varphi_{\text{տ}}/u^3$, ցերեկային ժամերին՝

$$q_{\text{ջ.պ.}} = q_{\text{կ.հար.պ.գ.}} + q_{\text{կ.հար.լ.գ.}} + q_{\text{կ.այլ.պ.գ.}} + q_{\text{կ.այլ.լ.գ.}} + q_{\text{կ.առ.գ.}} + q_{\text{օդ.գ.}} + q_{\text{իմֆ.գ.}} - q_{\text{ն.ջ.գ.}}, \quad (3)$$

որտեղ $q_{\text{կ.հար.պ.գ.}}$ և $q_{\text{կ.հար.լ.գ.}}$ -ը ջերմության տեսակարար կորուստներն են հարավային պատից և լուսամուտներից ցերեկային ժամերին, $\varphi_{\text{տ}}/u^3$, որոնց որոշման համար օգտագործվում են հետևյալ բանաձևերը՝

$$q_{կ,հար.ւ} = f_{հար.ւ} k_{ւ} (t_{\bar{u}} - t_{պայմ}), \quad (4)$$

$$q_{կ,հար.լ} = f_{հար.լ} k_{լ} (t_{\bar{u}} - t_{\eta.g}), \quad (5)$$

$q_{կ,այլ.ւ}$ -ը, $q_{կ,այլ.լ}$ -ը և $q_{կ,առ}$ -ը ջերմության տեսակարար կորուստներն են շենքի մյուս կողմնորոշման պատերից, լուսամուտներից և առաստաղից ցերեկային ժամերին, որոնք որոշվում են հետևյալ արտահայտություններով.

$$q_{կ,այլ.ւ.g} = f_{այլ.ւ} k_{ւ} (t_{\bar{u}} - t_{\eta.g}), \quad q_{կ,այլ.լ.g} = f_{այլ.լ} k_{լ} (t_{\bar{u}} - t_{\eta.g}), \\ q_{կ,առ.g} = f_{առ} k_{առ} (t_{\bar{u}} - t_{\eta.g}), \quad (6)$$

$q_{օդ.g}$ -ը և $q_{հնֆ.g}$ -ը՝ օդափոխման օդի և ինֆիլտրացվող օդի տաքացման համար պահանջվող տեսակարար ջերմաքանակները ցերեկային ժամերին, որոնք, ըստ մեր գնահատման, կարող են որոշվել հետևյալ արտահայտություններով.

$$q_{օդ.g} = 0.181(t_{\bar{u}} - t_{\eta.g}), \quad (7)$$

$$q_{հնֆ.g} = g_{հնֆ} c_{օդ} (t_{\bar{u}} - t_{\eta.g}), \quad (8)$$

$q_{ն.ջ.g}=3 \varphi_{տ}/u^3$ -ը տեսակարար ներքին ջերմանջատումները շենքում ցերեկային ժամերին:

Վերևում ներկայացված (3)-(8) արտահայտություններում բերված մեծությունները ունեն հետևյալ նշանակությունները.

$k_{ւ}$, $k_{լ}$, $k_{առ}$ -ը շենքի պատերի, լուսամուտների և առաստաղի կոնստրուկցիաների ջերմափոխանցման գործակցերն են, $\varphi_{տ}/u^2$ °C, $t_{\eta.g}$ -ը արտաքին օդի հաշվարկային ջերմաստիճանն է ցերեկային ժամերին, °C, $g_{հնֆ}$ -ը լուսամուտի միավոր մակերեսից թափանցող օդի քանակն է՝ $g_{հնֆ}=0.002 կգ/մ^2 վրկ$, $c_{օդ}$ -ը օդի տեսակարար ջերմունակությունն է, $c_{օդ} = 1000.2/կգ°C$, $t_{պայմ}$ -ը հարավային պատի արտաքին մակերևույթի պայմանական արևային ռադիացիոն ջերմաստիճանն է, °C, որը որոշվում է $t_{պայմ} = \frac{IP}{\alpha_{\eta}} + t_{\eta.g}$, բանաձևով:

Հետագա հաշվարկներում հարավային պատի մակերևույթի կողմից արևային ճառագայթների կլանման գործակիցն ընդունում ենք $P = 0.8$, ջերմատվության գործակիցը պատի արտաքին մակերևույթից դեպի արտաքին օդ՝ ($\eta = 20 \varphi_{տ}/u^2$ °C):

Շենքի կոնստրուկցիաների մակերեսների տեսակարար արժեքները վերևում բերված հավասարումներում որոշվում են հետևյալ արտահայտություններով.

$$\text{- հարավային պատ՝ } f_{հ.ւ} = \frac{(1-\mu_{հ})}{b}, u^2/u^3, \text{ հարավային լուսամուտներ՝ } f_{հ.լ} = \frac{\mu_{հ}}{b}, u^2/u^3,$$

$$\text{- այլ կողմնորոշման լուսամուտներ՝ } f_{այլ.լ} = \frac{\mu_{այլ}}{b}, u^2/u^3, \text{ առաստաղ՝ } f_{առ} = \frac{1}{h}, u^2/u^3,$$

$$\text{այլ կողմնորոշման բոլոր պատեր՝ } f_{այլ.ւ} = \frac{(1-\mu_{այլ})}{b} + \frac{2}{a}, u^2/u^3. \quad (9)$$

Վերջին արտահայտություններում $\mu_{հ}$ -ը և $\mu_{այլ}$ -ը հարավային և այլ կողմնորոշման պատերի ապակեպատման գործակցերն են, որոնք շենքի ապակեպատ

և համապատասխան ուղղաձիգ մակերևույթների մակերեսների հարաբերություններն են:

Օրինակ՝ հարավային կողմնորոշման համար $\mu_h = \frac{F_{h,l}}{F_{h,մակ}}$, որտեղ $F_{h,l}$ -ը և $F_{h,մակ}$ -ը

հարավային կողմնորոշման ապակեպատ և ուղղաձիգ մակերեսներն են:

Շենքի տեսակարար ջերմապահանջը զիջերային ժամերին, $q_{ջ.պ.զ}$, որոշվում է նույնանման հավասարումների օգնությամբ՝ օգտագործելով զիջերային արտաքին պարամետրերը: Այս դեպքում արդյունավետության գործակիցը կորոշվի հետևյալ հարաբերությամբ.

$$\eta_{op} = \frac{Z_g \cdot q_{թ.հար.լ}}{Z_g \cdot q_{ջ.պ.զ} + Z_q \cdot q_{ջ.պ.զ}}, \quad (10)$$

որտեղ $Z_g=6$ ժամ-ը, $Z_q=18$ ժամ-ը ձմեռային սեզոնում օրվա ցերեկային և զիջերային ժամերին օրվա միջին տևողություններն են:

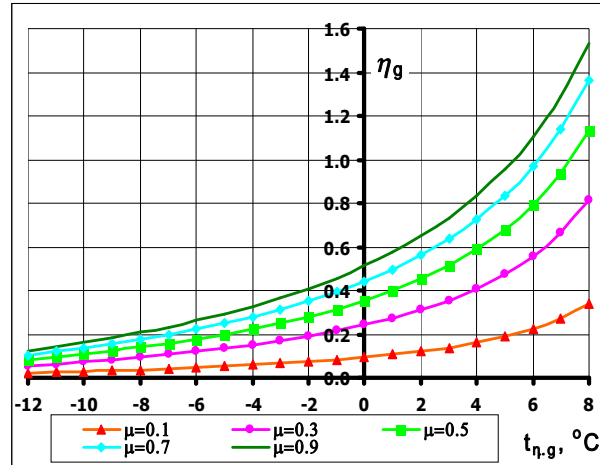
Առաջարկված մեթոդով և բանաձևերով հնարավոր է կատարել բազմատարբերակային հաշվարկներ՝ տարբեր կառուցվածքային և ջերմաֆիզիկական հատկանիշներ ունեցող շենքերի տեսակարար ջերմաթափանցումների և ջերմային կորուստների որոշման և, դրանով իսկ, նրանց արևային պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետության որոշման համար: Հաշվարկների մեծ ծավալը պահանջում է համակարգչի կիրառություն, որի նպատակով մշակվել է հատուկ ծրագրային ապահովում: Ըստ հաշվարկների կատարման մշակված ալգորիթմի, արտաքին օդի ջերմաստիճանը, շենքի հարավային պատի ապակեպատման գործակիցը և կոնստրուկցիաների ջերմաֆիզիկական բնութագրերը հանդես են գալիս որպես մուտքային փոփոխական տվյալներ:

Առաջարկված մեթոդը հնարավորություն է տալիս գնահատել նշված բոլոր պարամետրերի համատեղ ազդեցությունը պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետության վրա:

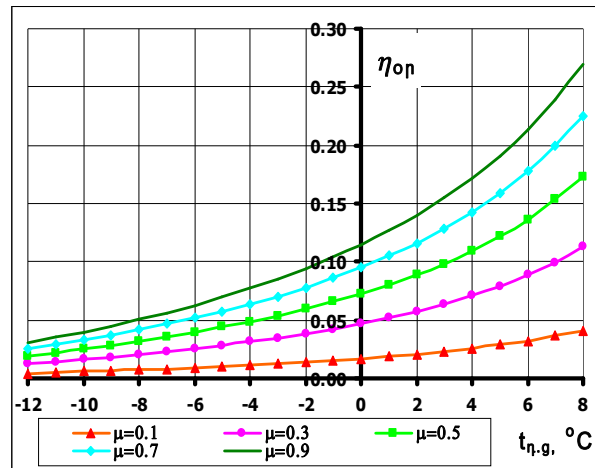
Արևային պասիվ ջեռուցման հայտնի եղանակի էներգետիկական արդյունավետության գնահատման և հետազոտության նպատակով մշակված մեթոդի օգնությամբ, կատարվել են հաշվարկներ $a=12$ Մ, $b=12$ Մ և $h=3$ Մ չափերով առանձնատան օրինակի վրա՝ ընդունելով արևի ճառագայթման I , $\varphi_{տ/լ^2}$, ինտենսիվությունը փոփոխական, կախված արտաքին օդի ցերեկային տարբեր $t_{դ.ջ}$ ջերմաստիճաններից: Ըստ հիդրոմետ ծառայության տվյալների համակարգչային “Excel” ծրագրի օգնությամբ մշակման արդյունքների՝ այդ կախումը բարձր ճշտությամբ արտահայտվում է հետևյալ հավասարման տեսքով.

$$I = \frac{t_{դ.ջ} + 21,25}{0,1125} :$$

Հաշվարկները կատարվել են նույն շենքի հարավային ուղղաձիգ մակերևույթի ապակեպատման (h տարբեր գործակիցների և արտաքին օդի ցերեկային տարբեր $t_{դ.ջ}$ ջերմաստիճանների արժեքների համար (նկ. 1 և 2):



Նկ.1. Ցերեկային ժամերին արևային պասիվ ջեռուցման արդյունավետությունը՝ η_g , հարավային պատի ապակեպատման գործակցի և արտաքին օդի ջերմաստիճանի փոփոխական արժեքների դեպքում



Նկ.2. Արևային պասիվ ջեռուցման ամբողջ օրվա արդյունավետությունը՝ η_{op} , հարավային պատի ապակեպատման գործակցի և արտաքին օդի ջերմաստիճանի փոփոխական արժեքների դեպքում

Գրաֆիկների վերլուծությամբ հիմնավորվում է, որ պասիվ ջեռուցման հայտնի եղանակը որոշ պայմաններում իսկապես ապահովում է շենքի ջերմապահանջը ($\eta_g=1$): Սակայն շենքի հարավային ապակեպատման նույնիսկ առավելագույն՝ $\mu_n=0,9$ արժեքի դեպքում, այդ տեղի է ունենում արտաքին օդի $t_{г,г}= +5^{\circ}C$ -ից բարձր ջերմաստիճանների տակ:(Ավելի փոքր ապակեպատման դեպքում $\eta_g=1$ պ այմանը ապահովվում է ավելի բարձր ջերմաստիճանների դեպքում: Գրաֆիկներից հետևում է

նաև, որ եթե ցերեկային ժամերին $t_{\eta, g} < 4^{\circ}\text{C}$ -ից, շենքի ցանկացած ապակեպատման դեպքում η_g - ն զգալիորեն փոքր է մեկից: Հետևաբար, պասիվ ջեռուցմամբ հայտնի կոնստրուկցիաներով տների բավարար ջեռուցումը նշված պայմաններում կպահանջի էլեկտրաէներգիա կամ վառելիք սպառող լրացուցիչ տաքացուցիչների (լրացուցիչ ջեռուցիչների) օգտագործում: Սպառվող էներգիան այնքան ավելի մեծ է, որքան ցածր է արտաքին ջերմաստիճանը և փոքր է ապակեպատման գործակիցը: Այդ սպառումը շատ ավելի մեծ է օրվա կտրվածքով (նկ. 2):

Շարադրված մեթոդի և կառուցված գրաֆիկների ավելի մանրակրկիտ վերլուծությունը բացահայտում է, որ հայտնի եղանակը չի արտահայտում ջեռուցման իրական արդյունավետությունը, քանի որ չի արտացոլում միևնույն շենքի տարբեր ապակեպատումների դեպքում լրացուցիչ ջեռուցիչների օգտագործած էներգիայի կամ վառելիքի սպառման չափը: Այն պարզապես ցույց է տալիս, թե ներթափանցած արևային էներգիան շենքի ջեռուցման ջերմապահանջի որ մասն է կազմում: Ինչպես հիմնավորում են հետազոտությունները, այդ մասը կարող է լինել մեծ, սակայն լրացուցիչ ջեռուցիչի պահանջվող հզորությունը և սպառած էներգիան ավելի փոքր ապակեպատման դեպքում կարող է լինել ավելի փոքր ինչպես ցերեկվա, այնպես էլ օրվա կտրվածքներով:

Խնդրի ընդհանրացված լուծման և ներկայումս նախագծվող ու կառուցվող արևային պասիվ ջեռուցմամբ տների կոնստրուկտիվ լուծումների իրական արդյունավետության գնահատման նպատակով առաջ ենք քաշել արևային պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետության նոր գաղափար, որը, ի տարբերություն դիտարկվածի, լրացուցիչ ջեռուցչի պահանջվող հզորությունն է և օրվա կտրվածքով նրա սպառած էներգիան: Ակնհայտ է, որ ինչքան փոքր է այս բնութագիրը, այնքան մեծ է արևային պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետությունը:

Ըստ առաջ քաշված այս բնորոշման, արևային պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետությունը ճշգրիտ կարող է գնահատվել շենքի ջեռուցման ջերմապահանջի և արևի ներթափանցած ջերմությունների տեսակարար արժեքների տարբերությամբ, որն էլ հենց լրացուցիչ տաքացուցչի էներգետիկական բեռնվածության բնութագիրն է: Այս ձևակերպման համաձայն, արևային պասիվ ջեռուցման էներգետիկական արդյունավետությունը կգնահատվի հետևյալ արտահայտություններով.

$$- \text{ցերեկային արևոտ ժամերի համար} \quad Q_{b, g} = q_{2, \eta, g} - q_{\theta, \text{հար. l}}, \quad (11)$$

$$- \text{ամբողջ օրվա համար} \quad$$

$$Q_{b, \text{op}} = Z_g q_{2, \eta, g} + Z_q q_{2, \eta, q} - Z_g q_{\theta, \text{հար. l}},$$

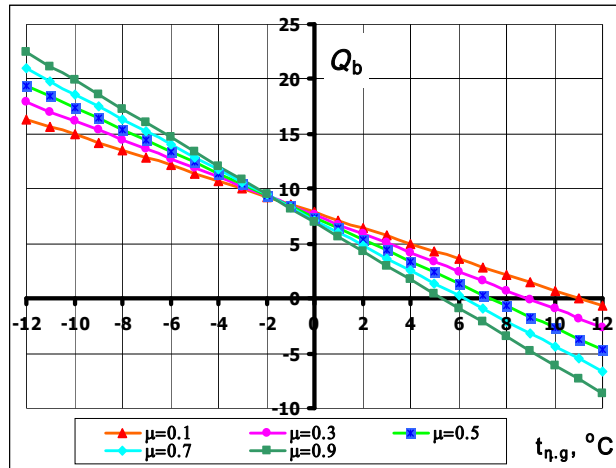
կամ

$$Q_{b, \text{op}} = Z_g (q_{2, \eta, g} - q_{\theta, \text{հար. l}}) + Z_q q_{2, \eta, q} : \quad (12)$$

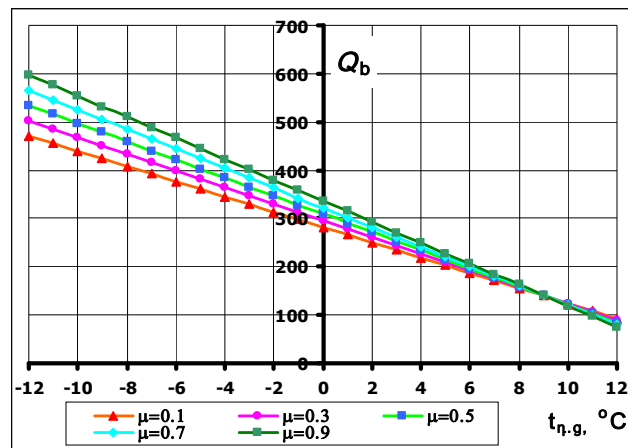
Վերջին արտահայտությունների մեջ բոլոր մեծությունները որոշվում են վերևում ներկայացված հավասարումների միջոցով: Օգտվելով (11) և (12) արտահայտություններից՝ կատարել ենք արդյունավետության գնահատումներ վերևում դիտարկված շենքի և պայմանների համար: Կատարված հաշվարկների արդյունքները ներկայացված են գրաֆիկների տեսքով (նկ. 3-6):

Նկարներում գրաֆիկների օրդինատները ցույց են տալիս արտաքին օդի $t_{\eta, g}$ տարբեր ջերմաստիճանների տակ լրացուցիչ ջեռուցչի պահանջվող ջերմային հզորությունը՝ կախված շենքի հարավային ուղղաձիգ մակերևույթի ապակեպատման գործակցի արժեքներից, օրվա ցերեկային ժամերի (նկ.3) և ամբողջ օրվա (նկ.4) համար: Նկ.3 գրաֆիկից հետևում է, որ արտաքին $t_{\eta, g} = -2^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանից

ավելի ցածր ջերմաստիճանների պայմաններում պասիվ ջեռուցման արդյունավետությունն ավելի բարձր է փոքր ապակեպատման գործակիցների դեպքում. օրինակ՝ $t_{\eta, g} = -12^{\circ}\text{C}$ -ի տակ լրացուցիչ ջեռուցչի ապահոված ջերմությունը նույն ջենքի $\mu_h = 0,9$ ապակեպատման դեպքում կազմում է $22,48 \text{ Վտ/մ}^2$, իսկ $\mu_h = 0,1$ -ի դեպքում՝ $16,38 \text{ Վտ/մ}^2$, այսինքն, մոտ 37%-ով ավել: Հակառակ պատկերն է դիտվում $t_{\eta, g} > -2^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանների դեպքում, այսինքն, մեծ ապակեպատման $\mu_h = 0,9$ կիրառման հայտնի դրույթն արդյունավետ է դառնում $t_{\eta, g} > -2^{\circ}\text{C}$ պայմաններում, երբ այն ավելի փոքր ջերմություն է պահանջում լրացուցիչ ջեռուցչից:



Նկ.3. Ցերեկային ժամերին արևային պասիվ ջեռուցման արդյունավետությունը՝ $Q_{b, g}$, հարավային պատի ապակեպատման (գործակիցի և արտաքին օդի $t_{\eta, g}$ ջերմաստիճանի տարբեր արժեքների դեպքում

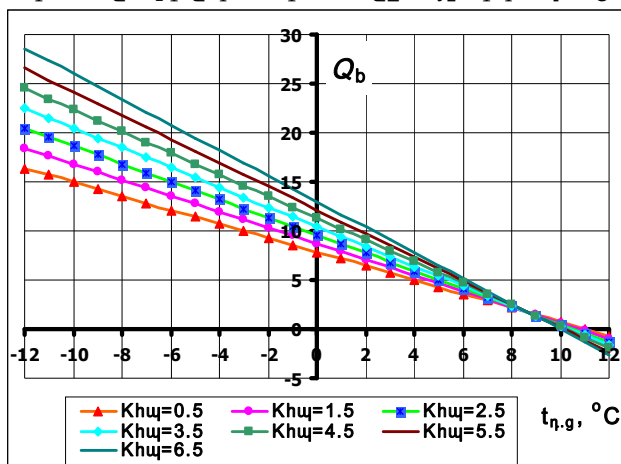


Նկ.4. Արևային պասիվ ջեռուցման ամբողջ օրվա արդյունավետությունը՝ $Q_{b, op}$, հարավային պատի ապակեպատման (գործակիցի և արտաքին օդի $t_{\eta, g}$ ջերմաստիճանի տարբեր արժեքների դեպքում

Նույն մոտեցմամբ գրաֆիկի վերլուծությունը (նկ.4) ցույց է տալիս, որ մեծ ապակեպատումը ամբողջ օրվա կտրվածքով արդյունավետ է դառնում $t_{\eta,g} = +9^{\circ}\text{C}$ պայմաններում:

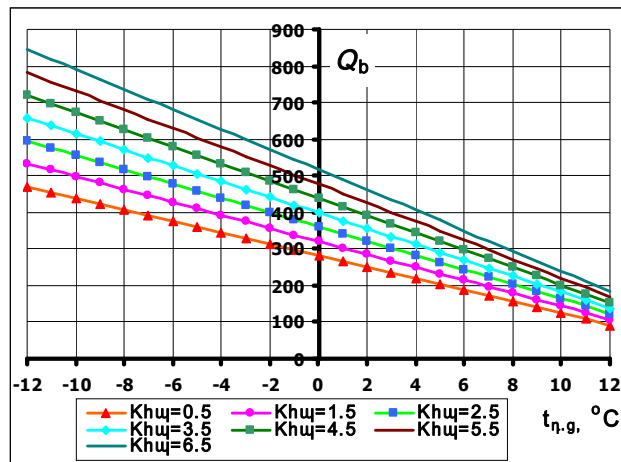
Նշված տվյալների վերլուծությունն ապացուցում է, որ հարավային մակերևույթի առավելագույն ապակեպատման հայտնի եվրոպական եղանակը պասիվ ջեռուցման համար արդյունավետ է միայն մեղմ ձմեռվա կլիմայական պայմաններում: Հետևաբար, այն համապիտանի չէ և նույնիսկ անարդյունավետ է արտաքին ցածր ջերմաստիճաններով բնութագրվող կլիմայական գոտիների համար, ինչպիսին, օրինակ, Երևանն է, որտեղ ջեռուցման հաշվարկային ջերմաստիճանը կազմում է -19°C : Դիտարկված գրաֆիկներից կարելի է հանգել եզրակացության. դինամիկ ջերմամեկուսացման անհրաժեշտության մասին, այսինքն, ապակեպատումը պետք է ունենա շարժական ջերմամեկուսիչ շերտ, որը $t_{\eta,g} = -2^{\circ}\text{C}$ -ից ցածր ջերմաստիճանների տակ փակվում է այնքան, որ μ_n -ն լինի 0,1, զիջերային ժամերին փակվում է ամբողջությամբ, իսկ $t_{\eta,g} = -2^{\circ}\text{C}$ -ից բարձր ջերմաստիճանների տակ բացվում է մինչև $\mu_n=0,9$:

Առաջարկված մեթոդի օգնությամբ կատարվել են նաև հաշվարկներ հարավային պատի կոնստրուկցիայի ջերմափոխանցման գործակցի ազդեցության բացահայտման համար: Հաշվարկի արդյունքները նույն շենքի $\mu_n=0,9$ ապակեպատման դեպքում բերված են նկ. 5-ում՝ ցերեկային ժամերի և նկ.6-ում՝ ամբողջ օրվա համար: Նկ. 5-ի գրաֆիկից հետևում է, որ պասիվ ջեռուցման հայտնի կոնստրուկցիաներում արտաքին $t_{\eta,g}=+9^{\circ}\text{C}$ -ից ցածր ջերմաստիճանների տակ ավելի արդյունավետ է ունենալ հաստ և ջերմային մեծ դիմադրություն ունեցող հարավային պատ: Սրանից հետևում է, որ տեխնիկական որոշակի լուծումների դեպքում, եթե հարավային մակերևույթի վրա նույնիսկ արտաքին բացասական ջերմաստիճանների տակ հնարավոր լինի ապահովել $t_{\eta,g} = +9^{\circ}\text{C}$ -ից ավելի բարձր ջերմաստիճաններ (օրինակ՝ ջերմոցային էֆեկտով, ապա ավելի արդյունավետ կլինի, եթե հարավային պատը արվի հնարավորինս փոքր ջերմային դիմադրությամբ: Նույն գրաֆիկի վրա Q_b -ի բացասական արժեքները նշում են, որ ցերեկային ժամերին $t_{\eta,g} > +9^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանների տակ լրացուցիչ ջեռուցչի կողմից ջերմամատակարարումն անհրաժեշտ չէ, քանի որ ներթափանցած արևի ջերմությունը ոչ միայն ամբողջովին ծածկում է շենքի ջերմապահանջը, այլև գերազանցում է:



Նկ.5. Ցերեկային ժամերին արևային պասիվ ջեռուցման արդյունավետությունը՝ $Q_{b,g}$, հարավային պատի ապակեպատման $\mu_n=0,1$ գործակցի դեպքում՝ կախված արտաքին օդի $t_{\eta,g}$ ջերմաստիճաններից

Սակայն ամբողջ օրվա կտրվածքով (նկ. 6) նույնիսկ $t_{n,g} = +12^{\circ}\text{C}$ -ի դեպքում դեռևս պահանջվում է որոշակի ջեռուցում լրացուցիչ ջեռուցչի միջոցով:



Նկ.6. Արևային պասիվ ջեռուցման ամբողջ օրվա արդյունավետությունը՝ $Q_{b,op}$, հարավային պատի ապակեպատման $\mu_n=0,1$ գործակցի դեպքում՝ կախված արտաքին օդի $t_{n,g}$ ջերմաստիճաններից

Շարադրված մեթոդը և նրանով կատարված վերլուծությունները հիմնավորում են, որ պասիվ ջեռուցման հայտնի կոնստրուկցիաները չեն կարող արդյունավետ կերպով կիրառվել ցածր ջերմաստիճանային կլիմայական գոտիներում և, օրինակ, Հայաստանի տարածքի մեծ մասում նրանց կիրառությունը աննպատակահարմար է: Հետևաբար, անհրաժեշտ է դարձել մշակել արևային պասիվ ջեռուցման բարձր արդյունավետությամբ օժտված շենքերի կոնստրուկցիաներ՝ ցածր ջերմաստիճանային կլիմայական պայմանների համար, որոնցում պետք է կիրառել տվյալ վերլուծության եզրակացություններն ու առաջարկները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Универсальный справочник застройщика «Теплый дом».-М.: Информационное агентство НОРМА, 2000.
2. **Kachadorian James**. The passive solar house. Vermont, 2001.
3. The Sun Factor –Passive Solar Design in the Netherlands. Technical Brochure N 69. CADDET IEA/OECD, renewable energy, 2000.
4. **Douglas Steege, Bruce Keiffer and Gary Tipler**. A Passive Solar Design Handbook for Wisconsin. Madison, 2001.

ԵրՃՇՊՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.03.2004:

Л.А. ХАЧАТРЯН

**МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО
ПАССИВНОГО ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ**

Изложен расчетный метод и построены с его помощью графики для определения энергетической эффективности, подтверждающие несовершенство и недостаточно высокую энергетическую эффективность существующих конструкций солнечного пассивного отопления и выявляющие пути их улучшения.

L.A. KHACHATRYAN

**METHOD FOR EVALUATION OF SOLAR PASSIVE BUILDING HEATING
ENERGY EFFICIENCY**

At present solar passive heating technologies for buildings are in use in different countries. The main feature of these constructions is the installation of large glazing on south oriented surfaces of houses. There are some methods for calculating and designing this kind of heating, but they don't reflect the energy efficiency and conditions of solar passive heating optimization. A method and diagrams are proposed proving low efficiency of existing constructions and discovering new ways for their perfection.

Г. Д. АКОПДЖАНЫН, В.С. САФАРЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ ЦЕПНЫХ СХЕМ

На основе алгебры структурных чисел получены общие формулы для определения входных сопротивлений и передаточных функций по напряжению однородной цепной схемы. Алгоритм реализован в виде программы для решения задач на ЭВМ.

Ключевые слова: цепная схема, четырехполюсник, передаточная функция, рекуррентные соотношения.

Известно, что однородные электрические цепи с распределенными параметрами могут быть представлены каскадно-соединенными одинаковыми симметричными четырехполюсниками - однородной цепной схемой. При исследовании и расчете таких схем практический интерес представляет нахождение передаточных функций (по напряжению, току) между различными ступенями цепной схемы (рис. 1).

Имеются соотношения, определяющие передаточные функции всей цепной схемы с n элементами (U_{n+1}/U_1) [1]. Интерес представляет также определение промежуточных передаточных функций типа U_{i+1}/U_1 ($i=1, \dots, n$), т.е. с выхода i -го элемента к входу цепной схемы.

В настоящей статье, пользуясь алгеброй структурных чисел, выводится общая формула для определения передаточных функций по напряжению однородной цепной схемы от выхода любого i -го элемента к входу цепной схемы.

Указанным путем для определения коэффициента передачи четырехполюсника (рис. 2) по напряжению получена формула [2]

$$K_u = \frac{U_b}{U_a} = \left(\frac{Z_b - Z_{ba}}{Z_a} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где Z_a и Z_b - входные сопротивления четырехполюсника со стороны входных (a, a') и выходных (b, b') зажимов при холостом ходе; Z_{ba} - входное сопротивление со стороны выходных зажимов при короткозамкнутых входных зажимах.

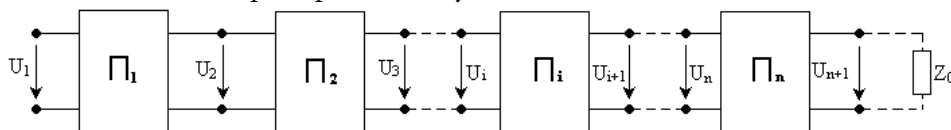


Рис. 1

Предварительно рассмотрим работу однородной цепной схемы в режиме холостого хода ($Z_0 = \infty$, рис. 1).

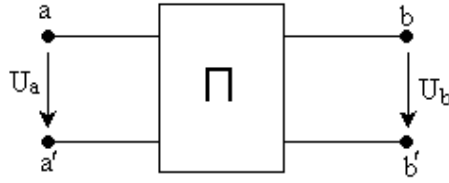


Рис. 2

Объединив первые $(1, \dots, i)$ и последующие $(i+1, \dots, n)$ одинаковые симметричные четырехполюсные элементы в единые четырехполюсники, приведем схему, представленную на рис.1, к каскадному соединению двух симметричных четырехполюсников (рис. 3).

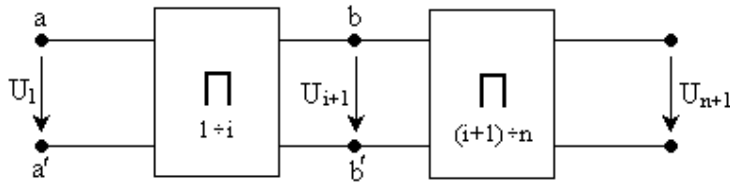


Рис. 3

Применив формулу (1) к схеме на рис. 3, будем иметь

$$K_{ui}^2 = \frac{U_{i+1}^2}{U_1^2} = \frac{\frac{Z_{ia}Z_{(n-i)a}}{Z_{ia} + Z_{(n-i)a}} - \frac{Z_{iab}Z_{(n-i)a}}{Z_{iab} + Z_{(n-i)a}}}{Z_{na}} = \frac{Z_{(n-i)a}}{Z_{na}} \left(\frac{Z_{ia}}{Z_{ia} + Z_{(n-i)a}} - \frac{Z_{iab}}{Z_{iab} + Z_{(n-i)a}} \right), \quad (2)$$

где Z_{ia} и Z_{iab} - входные сопротивления левого четырехполюсника (рис. 3), соответственно, в режимах холостого хода и короткого замыкания; $Z_{(n-i)a}$ - входное сопротивление правого четырехполюсника; Z_{na} - входное сопротивление всей цепной схемы в режиме холостого хода. В (2) первые индексы у сопротивлений $(Z_{ia}, Z_{(n-i)a})$ означают количество четырехполюсников, объединенных в одном (рис.3).

Для сопротивлений Z_{ia} и Z_{iab} можно записать следующие рекуррентные соотношения [2]:

$$Z_{ia} = \frac{Z_{(i-1)a} + Z_{ab}}{Z_{(i-1)a} + Z_a} Z_a, \quad Z_{iab} = \frac{Z_{(i-1)ab} + Z_{ab}}{Z_{(i-1)ab} + Z_a} Z_a \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $Z_{ab} = Z_{lab}$, $Z_a = Z_{la}$ - соответствующие входные сопротивления одного четырехполюсника (рис. 2).

Из соотношений (3) можно получить

$$Z_{ia} Z_{iab} = Z_a Z_{ab} = Z_c^2, \quad (4)$$

где Z_c - характеристическое сопротивление четырехполюсника.

Рассматривая цепную схему с бесконечным числом симметричных четырехполюсников ($n \rightarrow \infty$), будем иметь $Z_{\infty a} = Z_{\infty ab} = Z_c$. Пользуясь методом математической индукции, докажем справедливость соотношения (4). Покажем, что выражение (4) имеет место при $i = 2$. Исходя из равенств (3), запишем

$$Z_{2a} = \frac{Z_a + Z_{ab}}{Z_a + Z_a} Z_a = \frac{Z_a + Z_{ab}}{2},$$

$$Z_{2ab} = \frac{Z_{ab} + Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_a} Z_a = \frac{2Z_{ab}}{Z_{ab} + Z_a} Z_a,$$

при умножении которых получим

$$Z_{2a} Z_{2ab} = Z_a Z_{ab}.$$

Приняв, что равенство (4) имеет место при $(i - 1)$, покажем, что оно будет иметь место также при i :

$$\begin{aligned} Z_{ia} Z_{iab} &= \frac{(Z_{(i-1)a} + Z_{ab})(Z_{(i-1)ab} + Z_{ab})}{(Z_{(i-1)a} + Z_a)(Z_{(i-1)ab} + Z_a)} Z_a^2 = \\ &= \frac{Z_{(i-1)a} Z_{(i-1)ab} + Z_{(i-1)a} Z_{ab} + Z_{ab} Z_{(i-1)ab} + Z_{ab}^2}{Z_{(i-1)a} Z_{(i-1)ab} + Z_{(i-1)a} Z_a + Z_a Z_{(i-1)ab} + Z_a^2} Z_a^2 = \\ &= \frac{Z_{ab}(Z_a + Z_{(i-1)a} + Z_{(i-1)ab} + Z_{ab})}{Z_a(Z_{ab} + Z_{(i-1)a} + Z_{(i-1)ab} + Z_a)} Z_a^2 = Z_a Z_{ab}. \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Z_{(n-i)a}}{Z_{na}} = 1, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} Z_{(n-i)a} = \lim_{n \rightarrow \infty} Z_{(n-i)ab} = Z_c,$$

определим коэффициент передачи при $n \rightarrow \infty$.

Из выражения (2) будем иметь

$$\begin{aligned} K_{ui}^2 &= \frac{Z_{ia}}{Z_{ia} + \sqrt{Z_a Z_{ab}}} - \frac{Z_{iab}}{Z_{iab} + \sqrt{Z_a Z_{ab}}} = \frac{\sqrt{Z_a Z_{ab}}(Z_{ia} - Z_{iab})}{2Z_a Z_{ab} + \sqrt{Z_a Z_{ab}}(Z_{ia} + Z_{iab})} = \\ &= \frac{Z_{ia} - Z_{iab}}{2\sqrt{Z_a Z_{ab}} + Z_{ia} + Z_{iab}} = \frac{Z_{ia} - Z_{iab}}{(\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}})^2} = \frac{\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}}{\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}}. \end{aligned}$$

Таким образом, при $n \rightarrow \infty$ коэффициент передачи определится из соотношения

$$K_{ui}^2 = \frac{\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}}{\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}}. \quad (5)$$

Учитывая, что рассматривается цепная схема с бесконечным числом звеньев, следует считать, что все четырехполюсники, входящие в состав цепной схемы, находятся в одинаковых условиях и загружены на характеристическое сопротивление.

Можно показать, что

$$\frac{\sqrt{Z_{ia}} - \sqrt{Z_{iab}}}{\sqrt{Z_{ia}} + \sqrt{Z_{iab}}} = \left(\frac{\sqrt{Z_a} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_a} + \sqrt{Z_{ab}}} \right)^i. \quad (6)$$

Таким образом, при $n \rightarrow \infty$ коэффициент передачи определится по формуле

$$K_{ui} = C^{i/2}, \quad (7)$$

где $C = \frac{\sqrt{Z_a} - \sqrt{Z_{ab}}}{\sqrt{Z_a} + \sqrt{Z_{ab}}}$

Рассмотрим совместно соотношения (4) и (6) и решим их относительно Z_{ia} и Z_{iab} . В результате получим

$$Z_{ia} = \frac{1 + C^i}{1 - C^i} Z_C, \quad (8)$$

$$Z_{iab} = \frac{1 - C^i}{1 + C^i} Z_C. \quad (9)$$

Полученные соотношения (8) и (9) дают возможность через параметры одного четырехполюсника (Z_a и Z_{ab}) определить входные сопротивления всей симметричной цепной схемы в зависимости от количества входящих в ее состав звеньев (четырёхполюсников).

Подставив (8) и (9) в (2), после преобразований получим

$$K_{ui} = \frac{1 + C^{n-i}}{1 + C^n} C^{i/2}. \quad (10)$$

Это выражение дает возможность определить промежуточные передаточные функции (U_{i+1}/U_i) симметричной цепной схемы по напряжению при работе ее в режиме холостого хода.

Теперь рассмотрим однородную цепную схему, нагруженную на сопротивление Z_0 (рис.1). Для определения входного сопротивления Z_{na}^0 нагруженной цепной схемы представим ее в виде рис. 4.

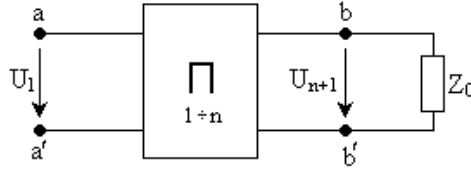


Рис. 4

Входное сопротивление такой цепи определяется по формуле [2]

$$Z_{na}^0 = \frac{Z_{nab}Z_{na} + Z_{na}Z_0}{Z_{na} + Z_0}.$$

Подставляя значения сопротивлений Z_{nab} , Z_{na} для цепной схемы с n звеньями, получим

$$Z_{na}^0 = \frac{1 + \alpha C^n}{1 - \alpha C^n} Z_C, \quad (11)$$

где $\alpha = (Z_0 - Z_C)/(Z_0 + Z_C)$.

Передаточную функцию по напряжению для цепной схемы, нагруженной на сопротивление Z_0 , запишем по аналогии с рассмотренным выше случаем (холостой ход цепной схемы) в виде выражения (2) с заменой в ней $Z_{(n-i)a}$ на $Z_{(n-i)a}^0$:

$$K_{ui}^2 = \frac{Z_{(n-i)a}^0}{Z_{na}^0} \left(\frac{Z_{ia}}{Z_{ia} + Z_{(n-i)a}^0} - \frac{Z_{iab}}{Z_{iab} + Z_{(n-i)a}^0} \right). \quad (12)$$

Подставляя значения входных сопротивлений из (8), (9) и (11) в (12) и производя алгебраические преобразования, получим

$$K_{ui} = \frac{1 + \alpha C^{n-i}}{1 + \alpha C^n} C^{i/2}. \quad (13)$$

Таким образом, получены выражения, определяющие: 1) входное сопротивление нагруженной симметричной цепной схемы в зависимости от числа звеньев и сопротивления нагрузки (11); 2) передачную функцию и все промежуточные передаточные функции нагруженной симметричной цепной схемы в зависимости от числа звеньев и сопротивления нагрузки (13).

В частных случаях:

- а) при режиме холостого хода $\alpha = 1$, и для определения передаточной функции получаем выражение (10);
- б) при режиме короткого замыкания $\alpha = -1$, и передаточные функции определяются из выражения

$$K_{ui} = \frac{1 - C^{n-i}}{1 - C^n} C^{i/2};$$

- в) при согласованной нагрузке ($Z_0 = Z_C$), $\alpha = 0$ и $K_{ui} = C^{i/2}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 522 с.
2. **Беллерт С., Возняцки Г.** Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел. - М.: Мир, 1972. - 332 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 26.12.2003.

Գ.Դ. ՀԱԿՈԲՋԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ՄԱՖԱՐՅԱՆ

ՀԱՄԱՄԵՌ ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ

Կառուցվածքային թվերի հանրահաշվի հիման վրա ստացվել են ընդհանուր արտահայտություններ համասեռ շղթայական սխեմայի մուտքային դիմադրության և լարման փոխանցման ֆունկցիայի որոշման համար: Մշակված ալգորիթմի հիման վրա կազմվել է համակարգչային ծրագիր՝ Delphi-7 ալգորիթմական լեզվով:

G. D. HAKOBIJANYAN, V. S. SAFARYAN

ON THE STUDY OF HOMOGENEOUS CHAIN CIRCUITS

Using algebra of structural numbers general formulas for determination of input resistance and transmission functions according to voltage homogeneous chain circuits are obtained. The algorithm is used as a program for solving tasks on a computer.

Մ.Ե. ՅՈՒՂԵՄ

ՄԿԱՎԱՌԱԿԱԶԵՎ ԽԱՐԻՄԽՈՎ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄԵՔԵՆԱ

Բերվում է նոր մշակված սկավառակաձև խարիսխով հաստատուն հոսանքի էլեկտրական մեքենայի կառուցվածքի, աշխատանքի սկզբունքի և փորձնական մանրակերտի պատրաստման նկարագրությունը:

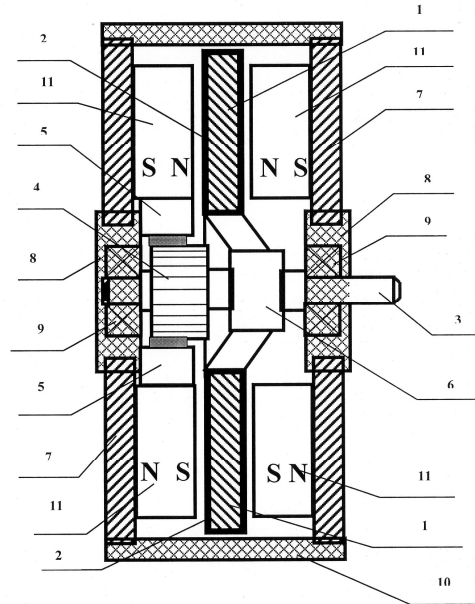
Առանցքային բառեր. սկավառակաձև, ռոտոր, ստատոր, օղակաձև, միջուկ, պարուրաձև փաթույթ, հաստատուն մագնիս, բևեռներ, հանդիպակաց:

Հայտնի է հաստատուն հոսանքի էլեկտրական շարժիչ [1], որում խարիսխը պատրաստված է առանց ֆեռոմագնիսական միջուկի, սկավառակաձև, և հաստատուն մագնիսները ստատորի վրա դասավորված են խարսխի մի կողմում, իսկ մյուս կողմում՝ որպես մագնիսական հոսքի փակման ճանապարհ, ստատորի վրա նախատեսված է ֆեռոմագնիսական լրացուցիչ լուծ:

Հայտնի է նաև հաստատուն հոսանքի էլեկտրական մեքենա [2], որտեղ առանց ֆեռոմագնիսական միջուկի խարսխի երկու սկավառակներ նստեցված են միևնույն լիսեռի վրա, իսկ հաստատուն մագնիսները՝ իրենց ֆեռոմագնիսական նյութից պատրաստված կցարկներով, տեղադրված են ստատորի վրա և տարբեր բևեռայնությամբ դասավորված են խարսխի սկավառակների երկու կողմում՝ հանդիպակաց:

Վերը նշված կոնստրուկցիաներին բնորոշ են նույնատիպ թերություններ՝ հաստատուն մագնիսների գրգռման հոսքը առանցքային ուղղությամբ հատում է խարսխի սկավառակները և փակվում է հաղիպակաց մագնիսապարփակիչի միջոցով: Հետևաբար, սկավառակաձև խարսխի փաթույթի քայլը իր մեծությամբ մոտիկ է բևեռային բաժանմունքի մեծությանը և, մանավանդ փոքր բևեռների թվի դեպքում, փաթույթի ճակատային մասերի երկարությունը ստացվում է համեմատաբար մեծ, որի հետևանքով շատանում է պղնձի ծախսը, մեծանում են էլեկտրական կորուստները խարսխի փաթույթում և վատանում են մեքենայի էներգետիկական ցուցանիշները:

Նշված թերություններն իսպառ վերանում են, եթե սկավառակաձև խարիսխը պատրաստվում է ֆեռոմագնիսական նյութից օղակաձև միջուկով, որի վրա փաթաթվում է պարուրաձև փաթույթը, իսկ հաստատուն մագնիսները ստատորի վրա տեղադրվում են այնպես, որ խարսխի երկու կողմում՝ հանդիպակաց դասավորվեն նույն բևեռայնության մագնիսներ: Հեղինակի կողմից առաջարկվում է հաստատուն հոսանքի հենց այդպիսի էլեկտրական մեքենա [3], որի կառուցվածքն ու էությունը պարզաբանվում է գծագրով (տես՝ նկարը):



Նկ. Սկավառակաձև խարիսխով հաստատուն հոսանքի էլեկտրական մեքենա

Մեքենան ունի պտտվող խարիսխ, որի ֆեռոմագնիսական նյութից պատրաստված օղակաձև միջուկի (1) վրա փաթաթվում է պարուրաձև (Գրահամային) փաթույթ (2), որի սեկցիաների ծայրերը միացվում են լիսեռի (3) վրա նստեցված կոլեկտորային թմբուկի (4) կոլեկտորային թիթեղներին: Հոսանքը խարսխի փաթույթին (2) տրվում է ստատորին ամրացված խոզանակների (5) միջոցով: Խարսխի օղակաձև միջուկը (1), կորուստների փոքրացման նպատակով, պատրաստվում է ֆեռոմագնիսական փոշեմետաղագործության ճանապարհով կամ էլեկտրատեխնիկական պողպատյա ժապավենից՝ փաթաթման եղանակով և ամրացվում է լիսեռի (3) վրա նստեցված, ոչ ֆեռոմագնիսական նյութից պատրաստված վռանին (6): Ստատորն ունի ֆեռոմագնիսական նյութից պատրաստված երկու օղակաձև միջուկներ (7), որոնք դասավորվում են խարսխի երկու կողմերում՝ իրար զուգահեռ: Ստատորի օղակաձև միջուկների (7) կենտրոնական մասում նախատեսված են ոչ ֆեռոմագնիսական նյութից պատրաստված առանցքակալային վահանակներ (8), որոնց բնիկներում տեղադրվում են լիսեռի (3) վրա նստեցրած առանցքակալները (9): Ստատորի օղակաձև միջուկները (7) արտաքին շրջագծով ամրացվում են ոչ ֆեռոմագնիսական նյութից պատրաստված ընդհանուր հենոցին (10): Հիմնական գրգռման մագնիսական հոսք ստեղծող հաստատուն մագնիսները (11), որոնք մագնիսացված են առանցքային ուղղությամբ, ամրացվում են ստատորի օղակաձև միջուկների (7) դեպի խարսխի օղակաձև միջուկին (1) նայող ներքին մակերևույթների վրա, ընդ որում՝ միևնույն միջուկի վրա ըստ շրջագծի դասավորվում են զույգ թվով տարանուն բևեռայնությամբ հաստատուն մագնիսներ: Մեքենան հավաքելու ժամանակ խարսխի միջուկի երկու հանդիպակաց կողմում դեմ դիմաց պետք է տեղադրվեն միևնույն բևեռայնությամբ հաստատուն մագնիսներ: Խոզանակները (5) խարսխի պարուրաձև փաթույթը բաժանում են

գուգահեռ ճյուղերի, որոնց թիվը հավասար է խոզանակների թվին: Յուրաքանչյուր իրար դիմաց դասավորված նույնանուն բևեռների միջև, ըստ շրջագծի մեկ բևեռային բաժանմունքի սահմաններում, գտնվում են խարսխի փաթույթի մեկ գուգահեռ ճյուղին պատկանող սեկցիաներ:

Էլեկտրական մեքենան աշխատում է հետևյալ կերպ. խոզանակներով խարսխի փաթույթին տրվում է հաստատուն հոսանք, մեկ խոզանակի հոսանքը բաժանվում է երկու գուգահեռ ճյուղերի միջև, ընդ որում, մեկ գուգահեռ ճյուղի հոսանքը հոսում է սեկցիաների գալարների փաթաթման ուղղությամբ, իսկ մյուսը՝ հակառակ: Հետևաբար, գուգահեռ ճյուղերի ՄՇՈՒ-ներն ազդում են հանդիպակաց և արդյունաբար ՄՇՈՒ-ի վրա ու նրանցով պայմանավորված խարսխի փաթույթի մագնիսական հոսքը ուղղվում է միջբևեռային առանցքով: Քանի որ բևեռների գրգռման հոսքը օդային բացակում ուղղված է բևեռների առանցքով, ապա այդ երկու հոսքերի փոխազդեցությամբ առաջանում է պտտող մոմենտ, և մեքենան աշխատում է որպես հաստատուն հոսանքի շարժաբե:

Գեներատորային ռեժիմում լիսեռին (3) մատուցված մեխանիկական էներգիայի շնորհիվ խարսխը պտտվում է: Նույնանուն հանդիպակաց դասավորված բևեռների գրգռման հոսքը, հատելով խարսխի պարուրաձև փաթույթի մեկ գուգահեռ ճյուղի գալարները, ինդուկտում է ԷԼՇՈՒ, ընդ որում գուգահեռ ճյուղերի ԷԼՇՈՒ-ները խարսխի փաթույթում ուղղված են հանդիպակաց և պարապ ընթացքի ռեժիմում ապահովում են խոզանակների միջև մեկ գուգահեռ ճյուղի ԷԼՇՈՒ-ին հավասար լարում: Երբ խոզանակների միջև միացվում է էլեկտրական էներգիայի սպառիչ, նրա վրա հաստատվում է համապատասխան լարում, և մեքենան աշխատում է որպես հաստատուն հոսանքի էլեկտրաէներգիայի աղբյուր:

Հաստատուն մագնիսները կարող են ունենալ ուղղանկյուն գուգահեռանիստի տեսք և գրգռման դաշտի կորի պահանջվող ձևը կարելի է ապահովել՝ օգտագործելով մագնիսափափուկ նյութից պատրաստված համապատասխան բևեռային ծայրապանակներ: Հաստատուն մագնիսների փոխարեն կարելի է օգտագործել էլեկտրամագնիսներ՝ ապահովելով գրգռման փաթույթների համապատասխան միացումն ու սնումը: Խարսխի միջուկի (1) և բևեռների միջև արդյունաբար օդային բացակի մեծությունը փոքրացնելու նպատակով խարսխի պարուրաձև փաթույթի (2) սեկցիաների ակտիվ կողմերը կարող են տեղադրվել խարսխի միջուկի՝ դեպի բևեռներ ուղղված մակերևույթներում նախատեսված փորակների մեջ: Որպես խարսխի փաթույթ, պարուրաձև փաթույթի օգտագործումը հանգեցնում է փաթույթի ճակատային մասերի երկարության էական փոքրացմանը, բարձրացնելով փաթույթի նյութի օգտագործման արդյունավետությունը, ապահովելով նյութատարողության և էլեկտրական կորուստների նվազեցումը, մեքենայի էներգետիկական ցուցանիշների բարձրացումը, և հնարավորություն է տալիս ստատորի վրա խոզանակները (5) տեղավորել լայնական առանցքով՝ օգտագործելով միջբևեռային տարածությունը:

Սկավառակաձև ռոտորի միջուկը (1) (տես՝ նկարը) մանրակերտում պատրաստվեց թերթավոր պողպատից փաթաթված լաբորատորային ավտոտրանսֆորմատորի միջուկից կտրելով 20 մմ լայնությամբ մեկ օղակ: Օղակի արտաքին և ներքին տրամագծերը համապատասխանաբար հավասար են 100 մմ և 52 մմ: Օղակի ճակատային մակերևույթներում շառավղային ուղղությամբ տաշվել են 8 մմ լայնությամբ և 5 մմ խորությամբ երկկողմանի տասական փորակներ, որտեղ տեղադրվել է խարսխի փաթույթը (2): Խարսխի փաթույթի պատրաստման համար օգտագործվել է կնժ մակնիշի 0,5 մմ տրամագծով կլոր հատությամբ հաղորդալար: Երկկողմանի փորակներում տեղադրվել են 56...58 գալարանի պարուրաձև

փաթույթի սեկցիաներ, որոնց ծայրերը զոդվել են լիսեռի (3) վրա նստեցրած կոլեկտորային թմբուկի (4) թիթեղներին: Ռոտորի միջուկը, շառավղային ուղղությամբ կատարված անցքերի միջով, հեղուսների օգնությամբ ամրացվել է լիսեռի վրա նստեցրած բրոնզից պատրաստված հինգ թևանի աստղաձև վռանին: Ստատորի օղակաձև միջուկները (7) պատրաստվել են Cm5 մակնիշի պողպատից՝ սկավառակի տեսքով, որոնց կենտրոնական մասում առանցքակալների նստեցման համար տաշվել են 4 *մմ* խորությամբ շրջանաձև բնիկներ և լիսեռի ազատ ծայրերի դուրս բերման համար բնիկների կենտրոնական մասում անցքեր են բացվել: Հիմնական գրգռման մագնիսական հոսք ստեղծող բևեռները (11) պատրաստվել են առանցքային ուղղությամբ մագնիսացված բարձրախոսի օղակաձև մագնիսներից, որոնց արտաքին, ներքին տրամագծերը և հաստությունը եղել են համապատասխանաբար 80, 30 և 15 *մմ*: Օղակաձև հաստատուն մագնիսները շառավղային ուղղությամբ մեջտեղից կտրվել և ստատորի օղակաձև միջուկներին սոսնձվել են՝ ապահովելով յուրաքանչյուր օղակաձև միջուկի վրա տարբեր բևեռայնությամբ բևեռների միջև 20...22 *մմ* միջբևեռային տարածություն: Որպես խոզանակակալ՝ իր գրաֆիտային խոզանակներով, օգտագործվեցին համապատասխան չափի փոշեկուլի շարժիչի խոզանակակալներ (5), որոնք ամրացվեցին միջբևեռային տարածությունում՝ մեկուսացվելով ստատորի օղակաձև միջուկից և բևեռներից: Որպես հենոց (10) օգտագործվել են լատունից պատրաստված վեց ձողեր, որոնք ամրացվել են հեղուսների միջով ստատորի օղակաձև միջուկների արտաքին շրջագծով հավասար հեռավորության վրա՝ ապահովելով ռոտորի ճակատային մակերևույթների և բևեռների միջև 0,5...0,7 *մմ* օդային բացակ:

Մանրակերտի նախնական փորձարկումը հաստատում է ներկայացված մեքենայի առավելությունները և հիմք է ծառայում կենցաղային էլեկտրական սարքերի մեջ նրա օգտագործման նպատակով գիտահետազոտական աշխատանքներ սկսելու համար:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Гюльмамедов С.А., Мингалеев М.Г.** Электродвигатель постоянного тока. Патент Российской Федерации, N 2076435, HO2K23/54, 03.27.97.
2. **Ник энд Си корпорейшн (US)** Электрическая машина постоянного тока. Патент Российской Федерации, N 2092958, HO2K23/54, 10.10.97.
3. **Յոնդեմ Մ.** Հաստատուն հոսանքի էլեկտրական մեքենա: Հայաստանի Հանրապետության արտոնագիր, N1112A2, ՄԱԴ HO2K23/54, 08.05.02:

ՀՊԵՀ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 25.04.2003:

М.Е. ЙОНДЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДИСКООБРАЗНЫМ ЯКОРЕМ

Приводится принцип действия и дается описание конструкции изготовленного макетного образца новой разработанной машины постоянного тока с дискообразным якорем.

М.Е. YONDEM DIRECT CURRENT ELECTRICAL MACHINE WITH A DISC SHAPED ANCHOR

The operation principle and the description of the prepared mock up construction for the new direct current electrical machine with a disc shaped anchor are given.

М.Г. АЗАРЯН

ПОНДЕРОМОТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

На основании анализа аналитических выражений зависимостей емкости плоскопараллельного конденсатора и электростатической силы притяжения его электродов от величины межэлектродного зазора предложен более чувствительный способ регистрации пространственного смещения (и связанной с ним любой физической величины). Описаны возможные конструкции и схемы, реализующие способ. Приведены результаты качественной проверки выдвинутой идеи в применении ее к конструкции предложенного ранее датчика силы для атомно-силового микроскопа.

Ключевые слова: пондеромоторный, аналитические выражения, емкость, электростатическая сила, пространственное смещение, конструкции и схемы, атомно-силовой микроскоп.

Наука и техника непременно сталкиваются с задачей регистрации и измерения различных физических величин. Этот контроль осуществляется разнообразными датчиками. Принципы их функционирования обуславливают их метрологические возможности, конструктивные особенности и область применения. Например, по мере активного проникновения в микромир оказались необходимыми сенсоры с большей пространственной и энергетической чувствительностью. Специфическая область применения выдвигает требования также к габаритам и технологичности их изготовления. Так появились кантилеверы – чувствительные сенсоры зондовых микроскопов. (Это упругие консоли миниатюрных размеров, на свободном конце которых имеются острия с нанометровыми радиусами кривизны, и создаются они современной микротехнологией и из кремния). Для регистрации ангстремных отклонений конца такой детали требуется высокочувствительный способ. Как правило, это оптический или емкостной. Первый требует достаточно сложной оснастки и периодической юстировки. Второй способ конструктивно более прост, но связан с использованием высокочастотной (МГц) техники и, следовательно, с проблемой соответствующей помехозащиты. Разработка подобных преобразователей с более высокой чувствительностью и технически относительно легко осуществимых представляется востребованной. Возможное решение такой задачи и описывает предлагаемая работа.

Известно [1], что на плоские электроды, образующие электрический конденсатор C с зазором h ($h \ll a, b$ – стороны электрода), при приложении к ним электрического напряжения U действует пондеромоторная (электростатическая) сила F_p , описываемая следующим выражением:

$$F_p = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{U^2 S}{2h^2}. \quad (1)$$

Здесь S - площадь электродов, m^2 ; h - величина зазора между ними, m ; ϵ - диэлектрическая проницаемость среды зазора и $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Конденсатор, образованный неподвижным электродом и упруго закрепленным на расстоянии h вторым электродом, лежит в основе конструкций емкостных датчиков разнообразных физических величин [2-6]. В таких датчиках контролируемая величина – электрическая емкость C :

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{h}. \quad (2)$$

Как видно из приведенных выражений, любое физическое возмущение, вызвавшее изменение h , может быть зарегистрировано по изменению и F_p , и C , но зависимость F_p от h сильнее, чем C от h , и пондеромоторную силу F_p , в отличие от C , можно "управлять" напряжением U .

Чтобы иметь возможность количественно сравнить их, следует воспользоваться относительными чувствительностями. Для чувствительностей (γ_C и γ_F) относительного смещения δ из исходного положения между электродами h_0 можно написать

$$\gamma_C = \frac{\Delta C}{C} = \frac{\delta}{h_0} \frac{1}{1 - \left(\frac{\delta}{h_0}\right)}, \quad (3)$$

$$\gamma_F = \frac{\Delta F}{F} = \frac{\delta}{h_0} \frac{2 - \frac{\delta}{h_0}}{\left[1 - \left(\frac{\delta}{h_0}\right)\right]^2}. \quad (4)$$

Из них следует $\gamma_F = \gamma_C (2 - \delta/h_0)/(1 - \delta/h_0)$, т.е. γ_F почти вдвое больше γ_C при малых значениях δ/h . Таким образом, можно ожидать, что если удастся предложить такой способ, который позволил бы контролировать поведение пондеромоторной силы, то мы получили бы возможность создать более высокочувствительный датчик.

Если использовать синусоидальное напряжение $U_s = U_0 \sin(\omega t + \varphi)$, то, согласно (1), получим переменную силу F_{sp} , которая описывается следующим выражением:

$$F_{sp} = \epsilon_0 \epsilon \frac{U_0^2 S}{2h} \sin^2(2\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где U_0 - амплитудное значение стимулирующего напряжения; φ – фаза; $\omega = 2\pi/T$ - угловая частота; T – период сигнала. Помимо прочего, переменная сила уменьшает то минимальное расстояние между электродами динамического конденсатора, после которого проявляется эффект слипания [3-8].

На рис.1 приведена одна из возможных схем измерения и конструкции ячейки, в которой можно реализовать предлагаемую идею: 1 – заземленная площадка-электрод, перемещение которой необходимо регистрировать. Около

нее на расстоянии h расположена упругая пластина – электрод 2. Поступающее на 2 со звукового генератора (ЗГ) синусоидальное напряжение U_s инициирует силу F_{sp} , которая приведет в колебание этот электрод. Его собственная частота механического резонанса ω_r должна значительно отличаться, а жесткость – уступать аналогичным характеристикам 1. Если $U_s = U_0 \sin((\omega_r/2)t + \varphi)$, то при заданном U_s амплитуда колебаний 2 максимальна [8], а отмеченная выше разность характеристик должна обеспечить нечувствительность 1 к переменной силе F_{sp} . Колебание с пропорциональной F_{sp} амплитудой преобразуется в электрический сигнал в биморфном пьезоэлементе 3 и поступает на вход синхронного детектора (СД), который засинхронизирован от ЗГ. Сигнал с СД подается на регистрирующий прибор (РП). Перемещение 1 из своего исходного положения, меняя величину начального зазора h , изменяет, согласно (1), амплитуду измеряемых колебаний. По сути дела, совокупность описанного колеблющегося элемента и детектора колебаний является регистратором переменной пондеромоторной силы (ППС).

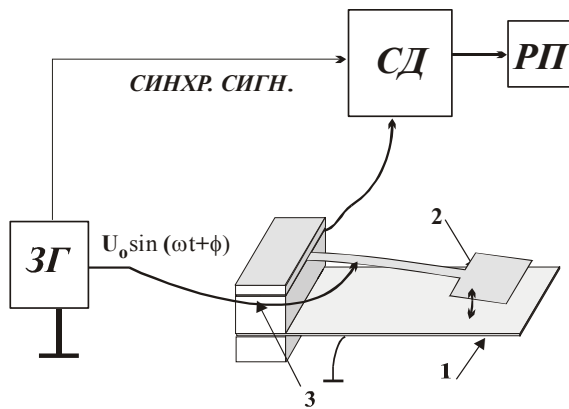


Рис.1

На рис.2 проиллюстрирован другой способ. Его можно назвать способом контроля наличия колебаний. Он основан на применении ранее использованной трехэлектродной конструкции ячейки [9]. Если между электродами 1,2 и электродом 3 приложить переменное напряжение U_s (5), то на подвижный электрод 3 будет действовать сумма противоположно направленных сил притяжения ($F_{\blacksquare s} = F_{Sp1/3} - F_{Sp2/3}$), где $F_{Sp1/3} = (\epsilon_0 \epsilon S U_{Sp1/3}^2 / 2) \sin(2\omega t + \varphi)$ и $F_{Sp2/3} = (\epsilon_0 \epsilon S U_{Sp2/3}^2 / 2) \sin(2\omega t + \varphi)$.

При отсутствии равенства этих сил электрод 3 начинает колебаться. Если же зазоры $h_{1/3}$ и $h_{2/3}$ между фиксированными и подвижным электродами равны ($h_{1/3} = h_{2/3} = H/2$, H – неизменный зазор между электродами 1 и 2), то $F_{\blacksquare s} = 0$ (при равных S , U_{Sp} и φ), и электрод 3 не колеблется. Нарушение такого взаиморасположения электродов приведет к появлению колебаний, амплитуда которых пропорциональна $F_{\blacksquare s}$:

$$F_{\Sigma S} = F_{\Sigma S_0} \sin(2\omega t + \varphi)^2. \quad (6)$$

Если принять, что $h_{1/3} = H - h_0$ и $h_{2/3} = h_0$, то можно записать

$$F_{\Sigma S_0} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S \cdot U_0^2 \cdot \frac{h_0^2 - (H - h_0)^2}{(H - h_0)^2 \cdot h_0^2}. \quad (7)$$

Зависимость этой силы от смещения δ центрального электрода-индикатора из исходного положения h_0 зависит от амплитуды $F_{\Sigma 0}$.

Относительные пондеромоторная ($\gamma_{p\Sigma}$) и емкостная ($\gamma_{c\Sigma}$) чувствительности такой измерительной ячейки определяются соответственно в виде

$$\gamma_{F\Sigma} = \frac{\left(\frac{H}{h_0} - 1\right) \cdot \left(1 + \frac{\delta}{h_0}\right)^2 - \left[\frac{H}{h_0} - \left(1 + \frac{\delta}{h_0}\right)\right]^2}{1 - \left(\frac{H}{h_0} - 1\right) \cdot \left[\frac{H}{h_0} - \left(1 + \frac{\delta}{h_0}\right)\right]^2 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{h_0}\right)^2} - 1, \quad (8)$$

$$\gamma_{c\Sigma} = \frac{\left(\frac{H}{h_0} - 1\right)}{\left[\frac{H}{h_0} - \left(1 + \frac{\delta}{h_0}\right)\right]} - 1. \quad (9)$$

Численная оценка этих выражений при $h_0 \approx H/2$ и $h_0 \gg \delta$ показала, что $\gamma_{p\Sigma} \gg \gamma_{c\Sigma}$. Из (8) также вытекает, что при значениях $\delta/h_0 \ll 1$ зависимость $\gamma_{p\Sigma}$ от δ линейна.

Этот способ предоставляет возможность введением обратной связи (ОС) [7] непрерывно контролировать и восстанавливать отсутствие механических колебаний подвижного электрода. ОС принуждает соответствующим изменением амплитуды переменного сигнала, например $\epsilon_0 \epsilon_{SU_{sp1/3/2}}$, "убирать" колебание центрального электрода 3, возникшее при его смещении, по какой-то причине, из равновесного положения. По величине компенсирующего изменения амплитуды можно измерять и смещение измерительного электрода-датчика.

Технически гораздо проще "убирать" колебание прикладыванием постоянного компенсирующего напряжения необходимой величины к одному из фиксированных электродов.

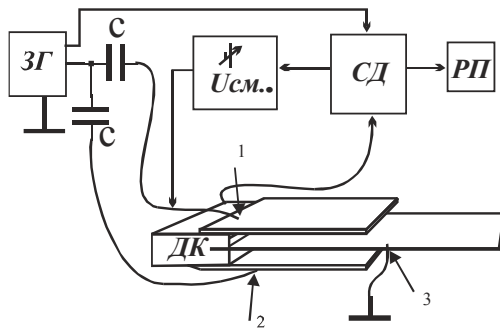


Рис.2

Схема, реализующая такой способ, приведена на рис.2. Возбуждающее напряжение с ЗГ через развязывающие конденсаторы (С) поступает на электроды 1 и 2. Корпус генератора и электрод 3 заземлены. Датчик колебаний (ДК) регистрирует колебания 3 и выдает сигнал на СД, который засинхронизирован от ЗГ. Выпрямленный и проинтегрированный СД сигнал ($U_{сд}$), пропорциональный амплитуде колебаний 3, суммируется с пред-варительным постоянным напряжением ($U_{см}$). Это $U_{см}$ несколько притягивает 3 к 1, компенсируя заранее специально созданное неравенство зазоров $h_{1/3}$ и $h_{2/3}$. Так как между электродами может существовать только сила притяжения, то

Так как между электродами может существовать только сила притяжения, то

такое ухищрение позволяет напряжением $U_{см}-U_{сд}$ вернуть электрод 3 в исходное положение (на приведенном рисунке предполагается, что первоначальное положение электрода 3 нарушено его сдвигом в сторону электрода 1). Сигнал, пропорциональный $U_{сд}$, подается на РП.

В работах [3-5] обсуждаются емкостно-чувствительные кантилеверы для атомно-силовых микроскопов и методы регистрации сигналов с них. Конструкции этих элементов позволяли предположить, что и тут можно было бы использовать пондеромоторную регистрацию перемещения электрода датчика. Наиболее адаптирована к обсуждаемому выше способу конструкция датчика силы, предложенного в [5].

На рис.3 приведены изображение конструкции этого датчика и принципиальная схема осуществления измерений перемещения подвижного элемента датчика.

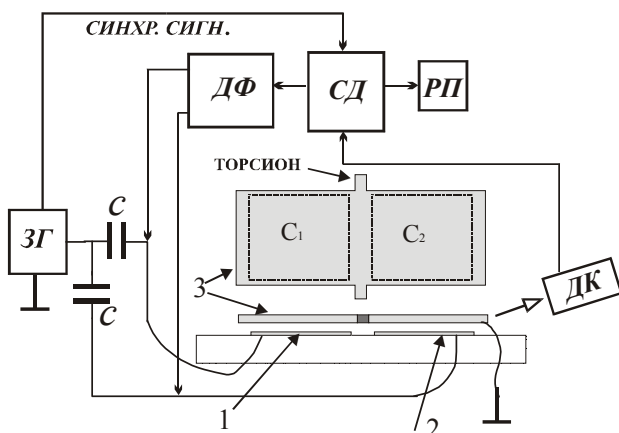


Рис.3

Над двумя неподвижными плоскими электродами 1 и 2 подвешена на торсионах общая пластина 3, образующая две емкости (C_1, C_2). Под воздействием силы эта пластина поворачивается наподобие коромысла, в результате чего межэлектродный зазор одного элемента датчика увеличивается (емкость C_1 уменьшается), а зазор другого уменьшается (емкость C_2 увеличивается).

Легко заметить, что к такому датчику можно применить все

рассуждения, приведенные выше. Особенность конструкции и схема компенсирующей цепи позволяют избежать ухищрений, отмеченных выше. Однако здесь синусоидальный сигнал, подаваемый одновременно на оба неподвижных электрода, не высокочастотный (т.к. не используется для измерения емкостей C_1 и C_2), а призван, согласно (7), возбудить колебание коромысла, и его частота должна быть равной половине механической резонансной частоты коромысла ($\Omega_{рез}^K$). Контроль отсутствия колебания коромысла можно детектировать любым технически осуществимым в конкретном случае датчиком колебания (ДК). Обработка команды сигнала ОС осуществляется подачей соответствующего постоянного потенциала с СД через диодные фиксаторы (ДФ) на неподвижный электрод 1 или 2. Появляющаяся при этом статическая сила восстанавливает исходное, безколебательное положение коромысла, нарушенное внешним возмущением. Сигнал, пропорциональный восстанавливающему, регистрируется РП.

Для качественной экспериментальной проверки предлагаемой идеи был использован описанный выше способ, предполагающий наличие ППС. Использованный в эксперименте коромысловый кантилевер повторял предложенный в [5]. Подбором материала и размеров упругого элемента ППС была обеспечена

необходимая разница между $\omega_{рез}^{кз}$ и $\Omega_{рез}^к$. ППС представляет собой берилбронзовую фольгу толщиной в 20 мкм, шириной 0,3 мм и длиной 1 мм, скрепленную с биморфным ДК. Эта конструкция вмонтирована в стенд [9] для обеспечения микрометрического подвода к верхней поверхности коромысла. Прикладываемое переменное напряжение имело амплитуду $U_0 = 86 В$ и частоту $\omega = 1,8$ кГц. Синхронный детектор (UNIPAN 232P) регистрировал микровольтовые величины изменения амплитуды сигнала ППС. При напряжении $U = 1,01 В$, прикладываемом между одним из неподвижных электродов, и находящейся на расстоянии $h = 50$ мкм поверхностью плеча коромыслового кантилевера развивается сила, равная $1,8 \cdot 10^{-8}$ Н. Легко наблюдаемая при этом реакция ПРП—подтверждение предлагаемой идеи.

В дальнейшем будут проведены детальные исследования с целью сравнения в едином эксперименте представленной пондеромоторной и емкостной регистрации, примененной в описанном в [5] датчике силы. В конечном итоге предполагается, применив для регистрации колебаний метод динамического конденсатора (что позволяет конфигурация коромысловой ячейки) и охватив его ОС с коромысловой ячейкой, реализовать соответствующий кантилевер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов.— М.: Энергоиздат, 1982.— 318 с.
2. Осипович Л.А. Датчики физических величин. — М., 1979. —159 с.
- Нойбауэр Г., Коэн С., Макклеланд Г., Хорн Д., Мейт К. Атомно-силовой микроскоп с двухкомпонентным емкостным датчиком // Приборы для научных исследований. -1990.-№ 9. -С.22-36.
3. Miller G.L.,Wagner E.R., Sleator T. Resonant phase shift technique for the measurement of small changes in grounded capacitors // Rev. Sci. Instrum. -1990. -61, №4.- P.1267-1272.
4. Joyce S.A., Hoyston J.E. A nev force sensor incorporation force-feedback control for interfacial force microscopy // Rev. Sci. Instrum. -1991.-62, №3.- P.710-715.
5. Боднер В.А., Алферов А.В. Измерительные приборы.— Т1. - М.: Изд-во стандартов, 1986. —392 с.
6. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин / Под ред. Е.С. Полищука. — Киев: Вища школа, 1984. —359 с.
7. Милохин Н.Г. Частотные датчики систем автоконтроля и управления. - М.: Энергия, 1968. -128 с.
8. Азарян М.Г., Адамян З.Н. Метод и стенд для исследования параметров пористых материалов // Материалы 2-й Национальной конференции. —Дилижан, 1999. - С. 237-240.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 23.04.2004.

Մ.Հ. ԱԶԱՐՅԱՆ

ՏԱՐԱԾԱԿԱՆ ՏԵՂԱՇԱՐԺԻ ՊՈՆԴԵՐՈՄՈՏՈՐ ՓՈԽԱԿԵՐՊԻՉ

Ունակության և էլեկտրաստատիկ ձգողության ուժի միջէլեկտրոդային հեռավորությունից կախվածության վերլուծության հիման վրա առաջարկվում է տարածական տեղափոխության (և դրա հետ կապված բոլոր ֆիզիկական մեծությունների) ավելի զգայուն գրանցման եղանակ: Ներկայացված են հնարավոր կոնստրուկտիվ և սխեմատիկական լուծումները: Բերված են առաջարկվող եղանակի որակական ստուգման տվյալները՝ ստացված հայտնի ատոմա-ուժային մանրադիտակի զգայուն բջիջում կիրառման արդյունքում:

M.H. AZARYAN

THE PONDEROMOTOR CONVERTER OF DISPLACEMENTS

Based on the analysis of analytical expression dependences for flat-parallel condenser and electrostatic gravitation capacity on interelectrode gap quantity, the more sensible method of spatial displacement registration (as well as any physical value connected with it) is proposed. The possible constructions and schemes for realizing the method are described. Qualitative testing results of this idea for applying it to the proposed earlier force transducer for atomic force microscope is presented.

Р.М. МАРТИРОСЯН, А.Г. ГУЛЯН, В.А. САНАМЯН, Г.А. ПИРУМЯН,
В.П. ЗАЛИНЯН

УЛУЧШЕНИЕ РЯДА ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА МЕТОДОМ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА

Рассматриваются возможности улучшения чувствительности интерференционного радиотелескопа методом цифрового анализа данных наблюдения. Приведены способы узкополосной частотной и степенной фильтрации интерференционной гармоники (ИГ) принимаемого сигнала, а также накопления мощностей отдельных лепестков ИГ.

Ключевые слова: радиотелескоп, интерференционная гармоника, цифровой анализ.

Введение. В [1] приведены реализации некоторых функций интерференционного радиотелескопа с использованием метода цифрового анализа выходного сигнала. В настоящей работе рассматриваются две возможности применения цифровой технологии для указанной выше цели: частотная (узкополосная) цифровая фильтрация интерференционной гармоники принимаемого сигнала; накопление мощностей отдельных лепестков.

При обыкновенном двухантенном радиоинтерферометре выходной сигнал наблюдаемого космического радиоисточника, в зависимости от его пространственного положения, угловых размеров (точнее, от распределения радиояркости по источнику), характеристик радиоинтерферометра (длина волны, полоса приема, длина базы), является квазипериодической переменной функцией от времени определенной частоты повторения, известной как пространственная или интерференционная гармоника. Если на выходе радиометра (после детектора) включить узкополосный усилитель, настроенный на частоту ИГ (F) с полосой ΔF , то, как известно, чувствительность повышается пропорционально

$\sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}$, где Δf - полоса принимаемого излучения [2]. Впервые такое предложение было реализовано в [3] по рекомендации С. Э. Хайкина - основателя радиоастрономии в СССР. Однако оно не нашло широкого применения из-за сложности практической реализации настраиваемого квазипериодического узкополосного усилителя и неустойчивости таких усилителей к кратковременным внешним помехам.

1. Цифровая фильтрация ИГ

Узкополосный цифровой частотный фильтр ИГ. При наличии современной вычислительной техники указанную выше задачу (фильтрация интерференционной гармоники) можно решить более простым и эффективным

образом, а именно, можно уже записанный на выходе детектора интерферируемый сигнал записать в память ЭВМ, а затем его фильтрацию осуществить методами цифрового анализа. Метод практически реализовался на примере наблюдения космического радиоисточника Телец-А на длине волны $\lambda = 4,2\text{ м}$ с помощью радиоинтерферометра ИРФЭ с базой $D = 15 \lambda$ и эффективной поверхностью антенн 40 м^2 и 10 м^2 .

Полный аналоговый сигнал (радиоисточника, галактического фона и шумов) зарегистрированного на выходе радиометра (рис.1а) оцифровывался 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) с временным разрешением $0,01\text{ с}$ и вводился в компьютер в виде последовательной записи данных в отдельный иницилируемый текстовый файл. По второму параллельному каналу записывались метки времени. Такая регистрация позволяла с большой степенью точности учитывать фазовый сдвиг при последующей обработке результатов измерений. Дальнейшая обработка данных производилась с помощью программы „Origin-6” , которая имеет встроенные функции Фурье анализа, расширенные математические возможности для построения узкополосных цифровых фильтров, настраиваемых на частоту гармоник. Процесс цифровой частотной фильтрации происходит по следующей примерной схеме. Из зарегистрированного после детектора аналогового сигнала (рис.1а) с помощью полинома N-й степени выделяется фоновое излучение, которое затем вычитывается. Далее для ИГ источника строится частотный спектр мощности и определяются параметры полосового фильтра F и ΔF .

Результаты цифровой фильтрации дали возможность выявить слабый полезный сигнал на фоне шумов и радиопомех. Почти незаметная интерференционная гармоника радиоисточника Телец-А после цифровой фильтрации четко выделяется на уровне несравненно более сильного фонового излучения Галактики, шумов и помех (рис.1б). Даже далекие от центра боковые лепестки ИГ, которые вообще не заметны до фильтрации, тоже хорошо выделяются. Это свидетельствует о том, что радиоисточники, имеющие на порядок меньшую интенсивность, чем Телец-А, можно наблюдать с помощью радиоинтерферометров, имеющих малые эффективные площади антенн.

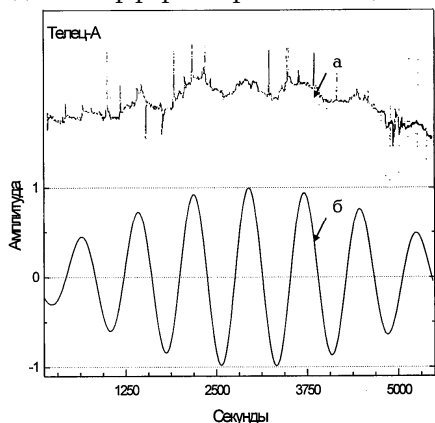


Рис. 1. ИГ радиоисточника Телец-А до (а) и после (б) цифрового узкополосного частотного фильтра

Степенной цифровой фильтр. Степенной цифровой фильтр фактически усиливает переменную составляющую зарегистрированного после детектора сигнала космического радиоисточника, в данном случае - его пространственную гармонику. При этом чем больше ее амплитуда, тем больше она усиливается, соответственно улучшается избирательность системы.

Представим интерферированную запись космического излучения (сигнал дискретного источника, галактического фона и шумов) в виде цифровой последовательности во времени и введем ее в память ЭВМ. Умножим каждый член $P(t) \sim \{P_i(t)\}$ последовательности $P_i(t)$, соответственно, на степенной множитель, например, $\exp - \left\{ \frac{P_m - P_i(t)}{P_m} \right\}$ (как основание можно взять любое целое число), и запишем ее в виде новой последовательности во времени:

$$P(t) = P_i(t) \exp - \left\{ \frac{P_m - P_i(t)}{P_m} \right\}, \quad (1)$$

где P_m - член последовательности $P_i(t)$ с максимальным значением.

Очевидно, что в результате такого преобразования получится отфильтрованное значение переменной составляющей последовательности. Это хорошо видно на примере фильтрации интерференционной записи сигнала радиоисточника Лебедь-А (рис.2б), который, как известно, находится в области сильного фоновое галактического излучения (рис.2а)

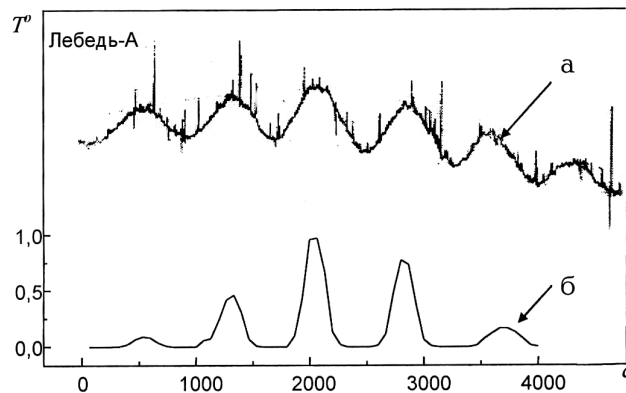


Рис. 2. ИГ радиоисточника Лебедь-А до (а) и после (б) степенного цифрового фильтра

2. Накопление мощностей отдельных ИГ

Впервые в радиоастрономии подобное накопление реализовалось в Бюраканской обсерватории фотографическим методом [3]. Позже авторы книги [4] писали о принципиальной возможности такого накопления. Однако этот метод тоже не нашел широкого применения из-за сложности практических

наблюдений и отсутствия в этот период технических возможностей для обеспечения наблюдений по широкой программе. При наличии высокоразвитой вычислительной техники эту задачу можно решить сравнительно просто. Если известны характеристики интерферометра и координаты радиоисточника, то однозначно можно подсчитать время и скорость прохождения интерференционных лепестков по диаграмме направленности антенны радиотелескопа, т.е. за период наблюдений. Следовательно, если выходную интерференционную кривую, записанную в память ЭВМ в виде числовой последовательности с метками реального времени, усреднить по интервалам времени интерференционных лепестков, то, очевидно, получится выигрыш чувствительности пропорционально числу усредненных лепестков. Практически достаточно усреднить мощности нескольких центральных лепестков (рис.3а), которые находятся в пределах половины мощности диаграммы направленности, для которых отношение сигнал/шум наибольшее (рис.3б).

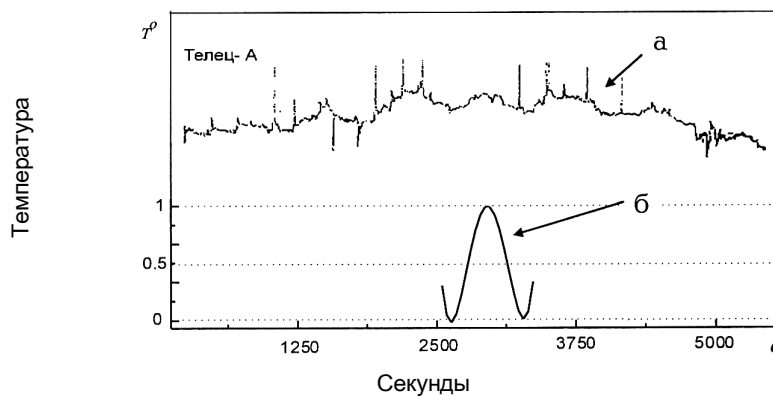


Рис. 3. Результаты интегрирования мощностей пяти центральных лепестков ИГ радиоисточника Телец-А

В работе не приводятся очевидные математические выкладки для оценки величины выигрыша чувствительности предлагаемым методом. Он убедительно виден на примере результатов, полученных для радиоисточника Телец-А, после усреднения центральных пяти лепестков его интерференционной гармоника (рис.3б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мартirosян Р. М., Санамян В. А., Гулян А. Г., Пирумян Г. А., Манаселян Х.А.** О компьютерной реализации метода фазового переключения в радиоастрономии //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 2003. - Т. 56, №3. - С. 514-519.
2. **Есепкина Н. А., Королков Д. П., Парийский Ю. Н.** Радиотелескопы и радиометры. – М.: ИЛ, 1961. - 236 с.
3. **Санамян В. А., Товмасын Г. М.** Радиоастрономия. - М.: ИЛ, 1961. - 488 с.
4. **Стейнберг Ж., Леку Ж.** Радиоастрономия.- М.: ИЛ, 1963. – 111 с.

Ин-т радиофизики и электроники НАН РА, Бюраканская астрофизическая обсерватория НАН РА. Материал поступил в редакцию 10.10.2004.

**Ռ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ա. Գ. ԴՈՒԼՅԱՆ, Վ. Ա. ՍԱՆԱՄՅԱՆ,
Հ. Ա. ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ, Վ. Պ. ՋԱԼԻՆՅԱՆ**

**ԹՎԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԻՆՏԵՐՖԵՐԵՆՑԻՈՆ
ՌԱԴԻՈԴԵՍԿՈՊԻ ՄԻ ՇԱՐՔ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԼԱՎԱՑՈՒՄ**

Քննարկված են դիտման արդյունքների թվային վերլուծության եղանակով ինտերֆերենցիոն ռադիոդիտակի զգայունության մեծացման հնարավորությունները, ինտերֆերենցիոն հարմոնիկի (ԻՀ) թվային նեղշերտ հաճախային և աստիճանային ֆիլտրացման, ինչպես նաև վերջինիս առանձին թերթիկների հզորությունների կուտակման եղանակները:

**R. M. MARTIROSSYAN, A. G. GHULYAN, V. A. SANAMYAN,
H. A. PIROUMYAN, V.P. ZALINYAN**

**IMPROVEMENT of SOME CHARACTERISTICS for INTERFERENCE RADIOTELESCOPE by
DIGITAL ANALYSIS of RECEIVED SIGNAL**

A possibility of sensitivity improvement for an interference radiotelescope is, by digital observation data processing considered. Narrowband frequency and power-degree filtration methods of the interference harmonic (IH) of the received signal, as well as the power accumulation method for individual IH lobes are described.

Ф.В. ГАСПАРЯН, В.М. АРУТЮНЯН, В.В. БУНИАТЯН

ТЕРМО-ЭДС НЕОДНОРОДНО-ЛЕГИРОВАННОГО р-п ПЕРЕХОДА

Рассмотрено влияние неравномерного (экспоненциального) распределения концентрации легирующих мелких акцепторов на коэффициент термо-ЭДС термоэлемента на основе р-п перехода. Показано, что созданное дополнительное внутреннее тянущее поле способствует увеличению коэффициента термо-ЭДС. Численные расчеты проведены для р-п переходов на основе Si и $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$.

Ключевые слова: термоэлемент, термо-ЭДС, градиент концентрации, диффузия, дрейф.

Введение. Расчет термо-ЭДС р-п перехода проводился многими авторами [1-4]. Традиционный способ поиска оптимальных термоэлектрических материалов [5], создание барьерных структур [6], использование искусственно созданных анизотропных материалов [7] и термомагнитных эффектов [8] для увеличения значений коэффициента термо-ЭДС и добротности не дали весомых результатов. Интересный путь увеличения добротности одно-родного полупроводника (на примере PbTe) предложен в [9], где теоретически показана возможность превращения биполярного полупроводника в монополярный с использованием эффекта электрического поля (EFE-doping), создаваемого посредством ферроэлектрической подложки. В [10] вычислена термоэлектрическая добротность биполярных полупроводниковых материалов с вырожденным газом носителей тока и непараболической зонной структурой. Показано, что в кристаллических термоэлектрических материалах добротность всегда $<1,5$. Исследования показали, что добротность $\text{n-Pb}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}\text{Te}$ может достигать величины 1,19 при температуре 500 K [11], добротность $\text{p-Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ и $\text{n-Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}_{0.1}$ - порядка 1,4...1,7 при температуре 300 K [12]. Для монокристаллических α -SiC и поликристаллических β -SiC исследование коэффициента термо-ЭДС показало соответственно следующие результаты: $-9 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ и $-108 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$ [13]. Наличие внутренних тянущих полей в р-п переходах или р-і-п структурах влияет на величину фоточувствительности и обнаружительной способности инфракрасных и ультрафиолетовых фотоприемников [14-16] и эффективность солнечных элементов [17-20]. В [21] показана возможность получения высоких значений термо-ЭДС в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}<\text{Cd}>$ (коэффициент термо-ЭДС порядка 500...550 $\text{мкВ}/^\circ\text{C}$ при комнатных температурах).

С целью выявления новых возможностей повышения термо-ЭДС р-п переходов в настоящей работе нами учитывалось влияние неоднородного легирования р области на термоэлектрические явления р-п перехода.

Для определенности примем наиболее реальное распределение акцепторов в р области $N_A(x)$:

$$N_A(x) = N_{A0} \exp[-\xi_1(l_p - x_s)], \quad (1)$$

где N_{A0} - концентрация акцепторов на поверхности р области при $x = l_p$ (рис.1); ξ_1 - темп изменения $N_A(x)$.

Пусть температурный градиент имеет линейную зависимость

$$T = T_0 + \xi_2 x, \quad (2)$$

где T_0 - температура на холодном конце р-п перехода; ξ_2 - темп изменения температуры.

Методика вычисления термо-ЭДС р-п перехода обычная. Решением дифференциальных уравнений определяются стационарные пространственные распределения концентрации неравновесных носителей тока для квазинейтральных областей вблизи р-п перехода. Термо-ЭДС определяется из условия равенства нулю полного тока через диод. На рис.1 показаны схематический вид, энергетическая диаграмма, распределение акцепторов и температурного градиента, а также система координат, используемая для расчетов.

Расчет барьерной термо-ЭДС. Модель перехода ограничивается следующими предположениями:

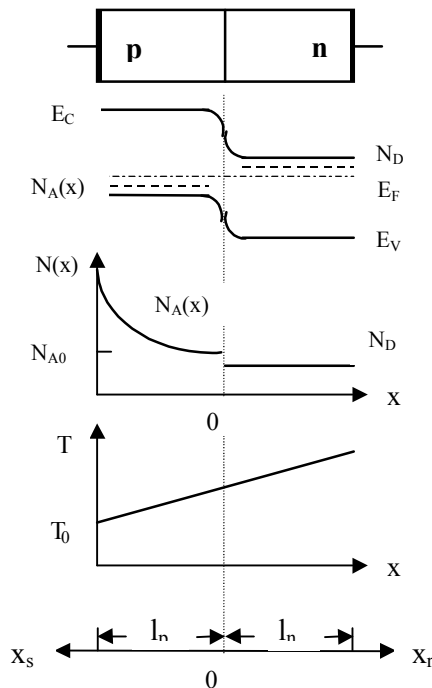


Рис.1. Схематическое изображение, зонная диаграмма, распределение акцепторов, доноров и температуры, система координат

1. Толщина области перехода пренебрежимо мала по сравнению с размерами р и п областей и с длиной диффузии дырок в п материале или электронов в р материале. Поэтому можно пренебречь рекомбинацией носителей заряда в области перехода.
2. Электростатическое поле ограничено узкой областью перехода. Принимаем, что вне этой области существует только встроенное поле в р области, обусловленное неоднородным распределением акцепторов. Следовательно, поток носителей заряда регулируется диффузией и теплом дырок в п материале и диффузией, дрейфом и теплом электронов в р материале.

Уравнения непрерывности для неосновных носителей заряда при отсутствии внешней генерации имеют следующий вид:

- для электронов в р области:

$$-\frac{1}{e} \frac{\partial j_n}{\partial x} = -\frac{n - n_p}{\tau_n}; \quad (3)$$

- для дырок в п области:

$$\frac{1}{e} \frac{\partial j_p}{\partial x} = - \frac{p - p_n}{\tau_p}. \quad (4)$$

Здесь p и p_n - неравновесные, а p_p и p_n - равновесные концентрации электронов и дырок в p и n областях перехода, соответственно; j_n и j_p - плотности токов неосновных носителей в p и n областях перехода, соответственно; τ_n и τ_p - времена жизни неравновесных электронов и дырок.

В p области неосновные носители движутся за счет дрейфа в тянущем поле $E_v = \frac{kT}{e} \frac{1}{N_A(x)} \frac{dN_A(x)}{dx}$, диффузии и температурного градиента. В n области дырки движутся только за счет диффузии и температурного градиента. Следовательно [3],

$$j_n = e\mu_n n E_v + eD_n \frac{\partial n}{\partial x} + \mu_n n Q_n^* \frac{1}{T} \frac{dT}{dx}, \quad (5)$$

$$j_p = -eD_p \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p Q_p^* \frac{1}{T} \frac{dT}{dx}, \quad (6)$$

где μ_n , μ_p и D_n , D_p - соответственно подвижности и коэффициенты диффузии электронов и дырок.

Величины $Q_{n(p)}^* = Q_{n(p)} - \bar{E}$ представляют собой избыток средней кинетической энергии переноса электрона (дырки) над средней кинетической энергией $\bar{E}$, которая для сферических поверхностей энергии равна $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$; $Q_n = Q_n' - E_C$, $Q_p = -Q_n' + E_v$, E_C и E_v - энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны полупроводника, соответственно; $Q_{n(p)}'$ - плотность потока тепла (теплота переноса) электрона (дырки), которая состоит из электронной (дырочной) $Q_{n(p),e}'$ и фононной $Q_{n(p),ph}'$ частей: $Q_{n(p)}' = Q_{n(p),e}' + Q_{n(p),ph}'$ [3]; k - постоянная Больцмана.

Фононные составляющие потока тепла связаны с влиянием потока фононов на движение электрона или дырки (эффект увлечения). Так как они существенны только при очень низких температурах, то для упрощения дальнейшего рассмотрения можно принять $Q_{n(p)}' \equiv Q_{n(p),e}'$. При квадратичном законе дисперсии и степенной зависимости времени релаксации от энергии ($\tau \sim E^\gamma$) имеем $Q_{n,e}' = \left(\frac{5}{2} + \gamma \right) kT$. При рассеянии носителей на тепловых

колебаниях решетки $\gamma = -1/2$, а при рассеянии носителей на ионизированных примесях - $\gamma = 3/2$. При смешанном рассеянии обычно считается $2kT < Q'_{n,e} < 4kT$. В дальнейшем при численных расчетах мы использовали $Q'_{n,e} \equiv Q'_{p,e} = 3kT$. Тогда $Q_n^* = \frac{3}{2}kT - E_C$ и $Q_p^* = -\frac{9}{2}kT + E_V$. Если отсчет энергии начать с потолка валентной зоны, то $E_V = 0$ и $E_C = E_g$, где E_g - энергия запрещенной зоны полупроводника. Тогда $Q_n^* = \frac{3}{2}kT - E_g$ и $Q_p^* = -\frac{9}{2}kT$.

Выражение для барьерной термо-ЭДС, как обычно, определяется из условия равенства нулю полной плотности тока $j = j_n + j_p$. С целью определения j_n и j_p необходимо иметь выражения для $n(x)$ и $p(x)$. Их можно определить из дифференциальных уравнений второго порядка, которые получаются подстановкой соответственно (5) в (3) и (6) в (4). При наличии градиента концентрации и температурного градиента они имеют следующий вид:

$$\frac{d^2(n - n_p)}{dx^2} + \xi_{n,T} \frac{d(n - n_p)}{dx} - \frac{n - n_p}{L_{n,T}^2} = \frac{n_p}{L_1^2}, \quad (7)$$

$$\frac{d^2(p - p_n)}{dx^2} + \xi_{p,T} \frac{d(p - p_n)}{dx} - \frac{p - p_n}{L_{p,T}^2} = \frac{p_n}{L_2^2}. \quad (8)$$

В (7) и (8) использованы следующие обозначения:

$$\xi_{n,T} = \xi_1 + \frac{\xi_2 \mu_n Q_n^*}{eTD_n}, \quad \xi_{p,T} = \frac{\xi_2 \mu_p Q_p^*}{eTD_p}, \quad \frac{1}{L_1^2} = \frac{\xi_2^2 \mu_n Q_n^*}{eD_n T^2}, \quad \frac{1}{L_2^2} = \frac{\xi_2^2 \mu_p Q_p^*}{eD_p T^2},$$

$$\frac{1}{L_{n,T}^2} = \frac{1}{D_n \tau_n} \left(1 + \frac{\xi_2^2 \mu_n \tau_n Q_n^*}{eT^2} \right), \quad \frac{1}{L_{p,T}^2} = \frac{1}{D_p \tau_p} \left(1 + \frac{\xi_2^2 \mu_p \tau_p Q_p^*}{eT^2} \right).$$

Для решения (7) и (8) использованы обычные граничные условия:

- для уравнения (7):

$$p = p_n \exp\left(\frac{eU}{kT}\right), \quad x_r = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad x_r = l_n; \quad (9)$$

- для уравнения (8):

$$n = n_p \exp\left(\frac{eU}{kT}\right), \quad x_s = 0; \quad \frac{\partial n}{\partial x} = 0, \quad x_s = l_p. \quad (10)$$

Тогда решения (7) и (8) можно представить в следующем виде:

$$n(x_s) = n_p \left(1 - \frac{L_{nT}^2}{L_1^2} \right) + \left\{ n_p \left[e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right] \right\} \frac{2 \operatorname{ch}[(l_p - x_s)/L_{n,TV}] - \xi_{n,T} L_{n,TV} \operatorname{sh}[(l_p - x_s)/L_{n,TV}]}{2 \exp(-\xi_{n,T} x_s/2) \operatorname{ch}(l_p/L_{n,T})}, \quad (11)$$

$$p(x_r) = p_n \left(1 - \frac{L_{pT}^2}{L_2^2} \right) + \left\{ p_n \left[e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right] \right\} \frac{2 \operatorname{ch}[(l_n - x_r)/L_{p,TV}] - \xi_{p,T} L_{p,TV} \operatorname{sh}[(l_n - x_r)/L_{p,TV}]}{2 \exp(-\xi_{p,T} x_r/2) \operatorname{ch}(l_n/L_{p,T})}, \quad (12)$$

$$L_{n,TV} = L_{n,T} \sqrt{1 + \left(\frac{\xi_{n,T} L_{n,T}}{2} \right)^2}, \quad L_{p,TV} = L_{p,T} \sqrt{1 + \left(\frac{\xi_{p,T} L_{p,T}}{2} \right)^2}.$$

Далее, подставляя (11) и (12) в выражение для полного тока через р-п переход

$$j = j_n(x_s = 0) + j_p(x_r = 0) \quad (13)$$

и приравнявая к нулю, определим барьерную термо-ЭДС в виде

$$U_C = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{j_N + j_T}{j_0} \right). \quad (14)$$

Здесь j_N - плотность тока, обусловленная дрейфом электронов в тянущем поле E_V ; j_T - плотность тока, обусловленная тепловым градиентом; j_0 - плотность тока насыщения;

$$\begin{aligned} j_N &= \xi_1 kT \mu_n n_p \left(1 - \frac{L_{nT}^2}{L_1^2} \right), \\ j_T &= \frac{\xi_2}{T} \left[\mu_p p_n Q_p^* \left(1 - \frac{L_{pT}^2}{L_2^2} \right) - \mu_n n_p Q_n^* \left(1 - \frac{L_{nT}^2}{L_1^2} \right) \right], \\ j_0 &= \frac{\mu_n n_p}{2 \operatorname{ch}(l_p/L_{n,T})} \left(\frac{\xi_2 Q_n^*}{T} - \xi_1 kT \right) \left[2 \operatorname{ch} \left(\frac{l_p}{L_{n,TV}} \right) - \xi_{n,T} L_{n,TV} \operatorname{sh} \left(\frac{l_p}{L_{n,TV}} \right) \right] - \\ &\quad - \frac{\xi_2 \mu_p p_n Q_p^*}{2 T \operatorname{ch}(l_n/L_{p,T})} \left[2 \operatorname{ch} \left(\frac{l_n}{L_{p,TV}} \right) - \xi_{p,T} L_{p,TV} \operatorname{sh} \left(\frac{l_n}{L_{p,TV}} \right) \right] + \\ &\quad + \frac{e D_n n_p}{2 \operatorname{ch}(l_p/L_{n,T})} \left[2 \xi_{n,T} \operatorname{ch} \left(\frac{l_p}{L_{n,TV}} \right) - \frac{2}{L_{n,TV}} \operatorname{sh} \left(\frac{l_p}{L_{n,TV}} \right) - \frac{\xi_{n,T}^2 L_{n,TV}}{2} \operatorname{sh} \left(\frac{l_p}{L_{n,TV}} \right) \right] - \end{aligned}$$

$$-\frac{eD_p p_n}{2\text{ch}(l_n/L_{p,T})} \left[2\xi_{p,T} \text{ch}\left(\frac{l_n}{L_{p,TV}}\right) - \frac{2}{L_{p,TV}} \text{sh}\left(\frac{l_n}{L_{p,TV}}\right) - \frac{\xi_{p,T}^2 L_{p,TV}}{2} \text{sh}\left(\frac{l_n}{L_{p,TV}}\right) \right].$$

Коэффициент термо-ЭДС α определяется в виде

$$\alpha = \frac{U_c}{\Delta T} = U_c / \left[(l_n + l_p) \frac{dT}{dx} \right] = \frac{U_c}{\xi_2 (l_n + l_p)},$$

а безразмерная термоэлектрическая эффективность или добротность ZT в виде $ZT = \frac{\alpha^2 T}{KR}$, где K - теплопроводность и R - сопротивление диода. Обычно величина ZT в наиболее эффективных материалах не превышает единицы. Ясно, что чем выше значение ZT , тем больше КПД термогенератора или обнаружительная способность приемника излучения.

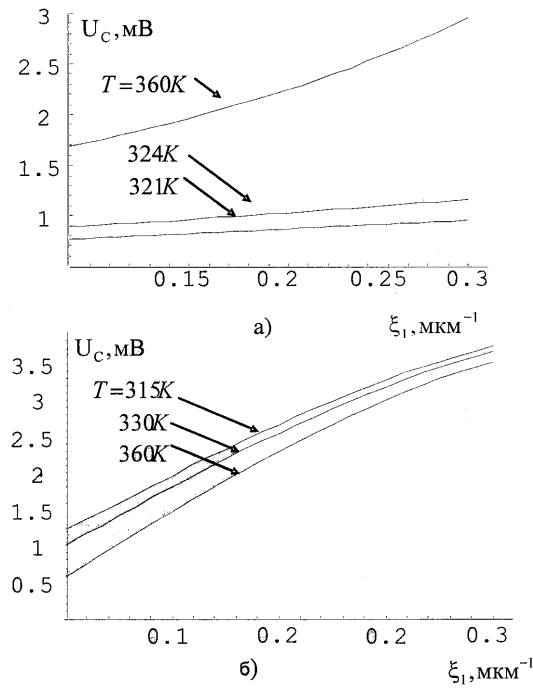


Рис.2. Зависимости абсолютных значений $U_c(\xi_1)$ для p-п переходов из Si (а), $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ (б)

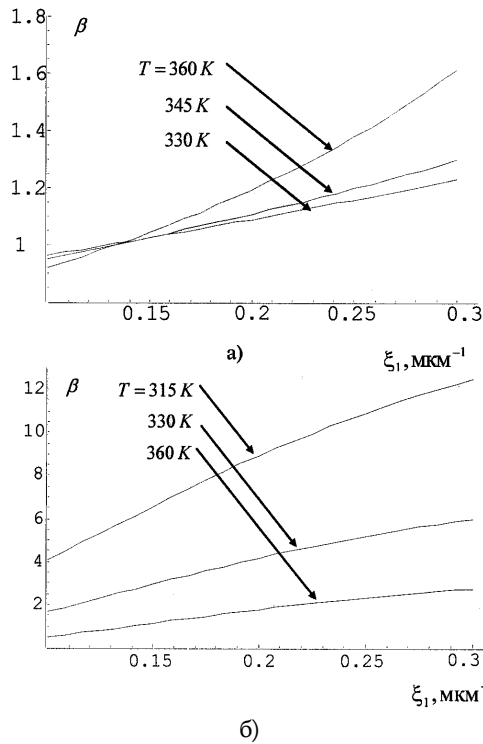


Рис.3. Зависимости значений $\beta(\xi_1)$ для р-п переходов из Si (а), $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ (б)

Численные расчеты и обсуждение результатов. Численные расчеты U_c , коэффициентов термо-ЭДС α_0 и α , а также $\beta = U_c/U_{c0}$ (индекс “0” соответствует случаю отсутствия градиента и $\xi_1 = 0$) проведены для р-п переходов из Si и $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$. Результаты представлены соответственно на рис.2-3. Для Si при $T_0 = 300\text{ K}$ принято: $L_n = 10\text{ мкм}$, $L_p = 8\text{ мкм}$, $l_p = l_n = 20\text{ мкм}$, $N_D = 10^{16}\text{ см}^{-3}$, $N_{A0} = 10^{18}\text{ см}^{-3}$, $\mu_n = 4 \cdot 10^9 T^{-2.6}\text{ см}^2/\text{Вс}$, $E_g(T) = 1,21 + \frac{1,21T - 4,1 \cdot 10^{-4} T^2}{T - 300}\text{ эВ}$, $n_i = \sqrt{1,5 \cdot 10^{33} T^3 \exp(-E_g(T)/kT)}\text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 4 \cdot 10^8 T^{-2.3}\text{ см}^2/\text{Вс}$, [22]. Для $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ использованы следующие параметры при $T_0 = 77\text{ K}$: $L_n = 10\text{ мкм}$, $L_p = 10\text{ мкм}$, $l_p = 5\text{ мкм}$, $l_n = 20\text{ мкм}$,

$$N_D = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, N_{A0} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}, \mu_n = 5 \cdot 10^4 \left(\frac{T}{77} \right)^{-2.6} \text{ см}^2/\text{Вс}, \mu_p = 2,5 \cdot 10^4 \left(\frac{T}{77} \right)^{-3.6} \text{ см}^2/\text{Вс},$$

$$n_i = 2,9 \cdot 10^{15} \sqrt{(TE_g(T))^3 \exp(-E_g(T)/KT)} \text{ см}^{-3}, E_g(T) = 0,0814 + \frac{4,5 \cdot 10^{-4} T^2}{T + 50} \text{ эВ} [22,23].$$

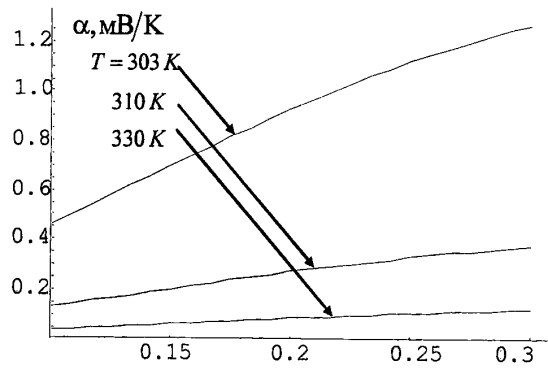
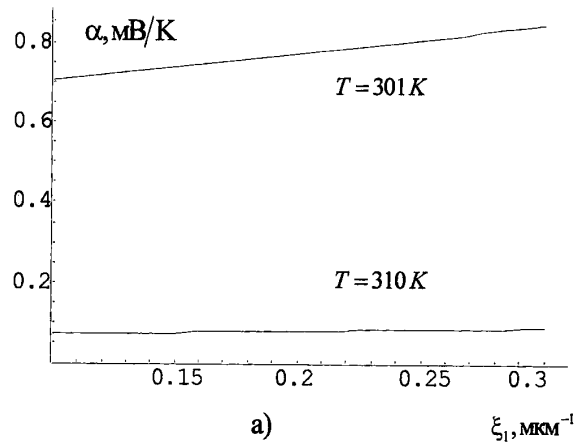


Рис.4. Зависимости коэффициента термо-ЭДС $\alpha(\xi_1)$ для р-п переходов из Si (а), $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ (б)

На рис.2-4 представлены результаты численного расчета зависимости абсолютных значений $U_c(\xi_1)$ (рис.2а, б), $\beta(\xi_1)$ (рис.3а, б), $\alpha(\xi_1)$ (рис.4а, б) для р-п переходов из Si (рис.2а, 3а, 4а) и из $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ (рис.2б, 3б, 4б).

При градиенте температуры $300 \leq T \leq 360$ К и концентрации акцепторов $0 \leq \xi_1 \leq 0,3$ мкм⁻¹ величина термо-ЭДС увеличивается почти в два раза для Si (~3 мВ) и более одного порядка для $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ (~3,5 мВ), а коэффициент термо-ЭДС растет до 800 мкВ/К для Si и 1200 мкВ/К для $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ ¹,

Внутреннее тянущее поле E_v , создаваемое градиентом концентрации легирующих акцепторов, увеличивая “эффективную” длину свободного пробега “горячих” носителей заряда², способствует скоплению избыточных электронов в р области (или дырок в п области). Образующееся при этом дополнительное электрическое поле приводит к снижению высоты потенциального барьера на величину, равную барьерной термо-ЭДС. Ясно, что при определенном направлении градиента температуры в зависимости от параметров полупроводника созданием неоднородного распределения акцепторов или/и доноров можно существенно увеличить $L_{n,Tv}$ или $L_{p,Tv}$. Отметим, что неоднородное легирование (в частности, по закону (1)) легко можно создавать по обычному методу термической диффузии. Таким образом, созданием различных форм распределения легирующих примесей (акцепторов, доноров или совместно обоих) можно добиться существенного увеличения величины добротности и коэффициента термо-ЭДС обычных термоэлементов на основе р-п переходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ISTC A-322 и ANSEF PS 53.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стафеев В.И. Инжекционный перенос тепла //ФТП.-1960.-Т.11, N3.-С. 438-444.
2. Вейнгер А.И., Парицкий Л.Г., Акопян Э.И., Дадамирзаев Г. Термо-ЭДС горячих носителей тока на р-п переходе //ФТП.-1975.-Т.9, N2.-С.216-224.
3. Балмуш И.И., Дашевский З.М., Касиян А.И. Термоэлектрические эффекты в многослойных полупроводниковых структурах.- Кишинев: Штиница, 1992. - 189 с.
4. Равич Ю.И., Пшеная-Северин Д.А. Термоэлектрическая добротность р-п перехода //ФТП.-2001.-Т.35, N10.-С.1214-1217.

¹ При длине р области $l_p = 20$ мкм (Si) и $l_p = 5$ мкм ($Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$) концентрация акцепторов изменяется примерно на два порядка для Si и в три раза для $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$.

² “Эффективная” длина свободного пробега электронов в р области $L_{n,Tv} \sim \xi_{n,T} \sim \xi_1$ и увеличивается при наличии градиента концентрации акцепторов. Ясно, что для увеличения “эффективной” длины свободного пробега дырок в п области необходимо создать градиент концентрации доноров в п области перехода.

5. Гольцман Б.М., Дашевский З.М., Кайданов В.А., Коломиец Н.В. Пленочные термоэлементы: Физика и применение. - М.: Наука, 1985.- 232 с.
6. Балмуш И.И., Дашевский З.М., Касиян А.И. Термоэлектрическая добротность полупроводниковых материалов //ФТП.-1995.-Т.29, N6.-С. 17961801.
7. Гудкин Т.С., Иорданишвили Е.К., Фискинд Е.Э. Эффект поперечного охлаждения в слоистой искусственно-анизотропной среде //Письма в ЖТФ.-1978.-Т.4, N10.-С.607-610.
8. Бородин В.В., Гельфгат Д.М., Дашевский З.М. Пленочные термоэлектрические и термомагнитные датчики теплового излучения и их выходные параметры //Инж.-физ. журнал.-1983.-Т.44, N4.-С.573-580.
9. Sandomirsky V., Butenko A.V., Levin R. and Schlesinger Y. Electric-field-effect thermoelectrics //J. of Appl. Phys.-2001.-V.90, N5.-P.2370-2379.
10. Булат Л.И., Закордонец В.С. Предельная термоэлектрическая добротность полупроводниковых кристаллических материалов //ФТП.-1995.-Т.29, N6.-С.17431748.
11. Kohri H., Tanaka K., Shiota I. Proc. Int. Conf. CIMTEC 2002, Florence, July 14-18, 2002.
12. Ghoshal U., Ghoshal S., McDowell C., Shi L., Cordes S. and Farinelli M. Enhanced thermoelectric cooling at cold junction interfaces //Appl. Phys. Letters.-2002.-V.80, N16.-P.3006-3008.
13. Abu-Ageel N., Aslam M., Ager R. and Rimai L. Thermoelectric effect in p-n junction // Semicond. Sci. Technol.-2000.-V.15, N3.-P.32-36.
14. Гаспарян Ф.В., Адамян З.Н., Арутюнян В.М. Чувствительность S-фотодиодов при наличии градиента концентрации глубоких центров //ФТП.-1981.-Т.15, N10.-С.1879-1882.
15. Гаспарян Ф.В., Адамян З.Н., Арутюнян В.М. Кремниевые фотоприемники. - Ереван: Изд. ЕГУ, 1989.-362 с.
16. Гаспарян Ф.В., Агасарян Г.Г. Новый механизм внутреннего усиления в инжекционных фотодиодах из компенсированных полупроводников //ДАН АрмССР.-1993.-Т.94, N1.-С.29-36.
17. Гаспарян Ф.В., Матевосян К.Б. Солнечные элементы на основе неоднородно-легированного полупроводника //ДАН АрмССР.-1996.-Т.96, N2-4.-С.55-60.
18. Gasparyan F.V., Buniatyan V.V., Aroutiounian V.M., Soukiassian P. Sensitivity of p-n junction based on SiC, doped with deep impurity acceptor levels //Appl. Surface Science.-2001.-V.184, N1-4.-P.466-470.
19. Гаспарян Ф.В., Арутюнян В.М., Буниатян В.В. Физические процессы в солнечных элементах с внутренним тянущим полем //Изв. НАН РА. Физика.-2001.-Т.36, N4.-С.210218.
20. Gasparyan F.V., Aroutiounian V.M., Soukiassian P. Solar cells on the base of non-uniform doped 6H-SiC p-n junction //Proc. of World Renewable Energy Congress VII, 29 June-5 July, 2002, Cologne, Germany (WREC 2002).-P.56-61.
21. Абрамян Ю.А., Арутюнян В.М., Ваганян А.И., Гаспарян Ф.В., Багиян Е.М. Полупроводниковые соединения $Pb_{1-x}Sn_xTe<Cd>$ с высокими значениями термо-ЭДС // Мат.2-й Нац. конф."Полупр.микроэл.". 21-24 мая, 1999, Дилижан.- Ереван, 1999.-С.103-105.
22. Таблицы физических величин: Справочник /Под ред. И.К. Киикоина. - М.: Атомиздат, 1976.-1005 с.
23. Абрамян Ю.А., Гаспарян Ф.В., Мартirosян Р.М. Пороговые характеристики фотодетекторов, ИК-радиометры и основные материалы современной фотоэлектроники.-Ереван: Изд. ЕГУ, 2000.-153 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 03.06.2004.

**Ֆ.Վ. ԳԱՍՊՊԱՐՅԱՆ, Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ,
Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱՏՅԱՆ**

ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ԼԵԳԻՐԱՑՎԱԾ p-n ԱՆՑՄԱՆ ՋԵՐՄԱԷԼԵՄԵՆՏ

Դիտարկված է լեգիրացնող ծանծաղ ակցեպտորների անհամասեռ (էքսպոնենցիալ) բաշխվածության ազդեցությունը p-n անցման հիման վրա ստեղծված ջերմաէլեմենտի ջերմաէլԵՄԵՆՏ-ի վրա: Ցույց է տրված, որ ստեղծված լրացուցիչ ներքին ձգող դաշտը նպաստում է ջերմաէլԵՄԵՆՏ-ի գործակցի արժեքի աճին: Թվային հաշվարկները կատարված են Si-ից և $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$ -ից պատրաստված p-n անցումների համար:

F.V. GASPARYAN, V.M. AROUTIOUNIAN, V.V. BUNIATYAN

THERMO-EMF OF NON-HOMOGENEOUSLY DOPED p-n JUNCTION

The influence of non-homogeneously (exponential) distribution of shallow acceptors on thermo-emf coefficient of the thermo element based on p-n junction is discussed. It is shown that the developed additional internal field facilitates the increase of thermo-emf coefficient. Numerical calculations are carried on for p-n junctions based on Si and $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$.

Ю.О. АВETИСЯН, А.А. АХУМЯН, В.Р. ТАТЕВОСЯН, А.К. МЕЛИКЯН

ЧАСТОТНО - СКАНИРУЮЩАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЩЕЛЯМИ

Разработана новая антенна с частотным управлением направления основного излучения, основанная на применении зеркального волновода с периодическими неоднородностями. Изменением частоты в диапазоне 36...54 ГГц достигнуто сканирование главного лепестка в пределах 70°. При этом угловая ширина лепестка не превосходила 2° в Е-плоскости. Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с расчетными.

Ключевые слова: антенна, миллиметровый диапазон, зеркальный волновод.

В последние годы в связи с задачей создания радиолокаторов с высокой разрешающей способностью резко возрос интерес к разработке антенн миллиметрового диапазона волн (ММДВ) с быстрым сканированием диаграммы направленности (ДН). Как правило, в радиолокационных системах слежения движущихся объектов сканирование ДН производится либо механическим поворотом антенны, либо с помощью электрически управляемых фазовращателей в составе антенной решетки. Основным недостатком первого способа является малое быстродействие, а практическая реализация антенных решеток ММДВ связана с известными трудностями ввиду больших потерь в микрополосковых и металлических волноводах [1]. В настоящее время развитие полупроводниковой техники позволило создать целый ряд широкополосных приемо-передающих устройств ММДВ. В этой связи представляет интерес разработка новых антенн ММДВ с управлением направления главного лепестка ДН путем изменения частоты сигнала. Очевидно, что такие антенны могут быть выполнены на основе волноводов с сильной дисперсией. В настоящее время в ММДВ широко применяются диэлектрические волноводы (ДВ), в которых распространение волны сопровождается достаточно низким затуханием за счет использования диэлектриков с малыми потерями, и, кроме того, определенная часть электромагнитного поля распространяется в приграничной воздушной области. Частотно-сканирующая антенна на основе ДВ с дифракционной решеткой была исследована в работе [2]. Угол сканирования составлял около 40° и ограничивался условием одномодовости распространения волны в ДВ.

В настоящей работе нами предлагается использовать зеркальный диэлектрический волновод (ЗДВ), который, как известно [3, 4], имеет достаточно разряженный модовый состав и обладает тем достоинством, что металлическое зеркало волновода способно выполнять роль опоры и теплоотвода. Для эффективного испускания волны с поверхности ЗДВ (т.е. для обеспечения утечки волны из волноводной моды в радиационную) в металлическом основании волновода выполняются периодические неоднородности –

вырезаются поперечные щели глубиной порядка $\lambda_0/4$, где λ_0 - средняя длина в рабочем диапазоне частот. Картина ЗДВ с периодическими щелями в металлическом основании представлена на рис. 1.

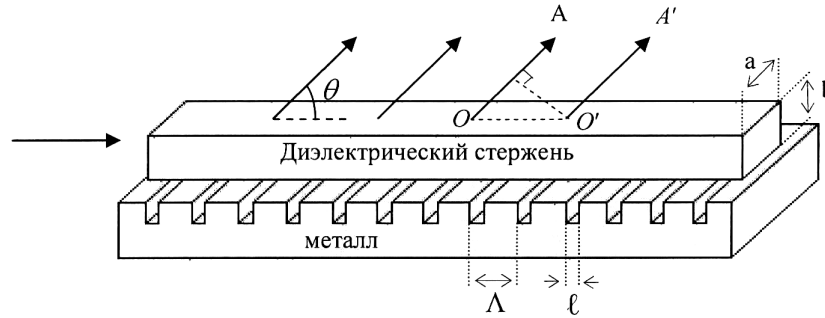


Рис.1. Схематическое изображение ЗДВ с периодическими неоднородностями

Для определения условия излучения поле в периодическом ЗДВ представим в виде суммы пространственных гармоник [5]:

$$E = \sum_p E_p(x, y) e^{i(\omega t - \beta_p z)}, \quad (1)$$

где направление z выбрано вдоль оси волновода, и

$$\beta_p = \beta_0 + \frac{2\pi}{\Lambda} p, \quad p = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, \quad (2)$$

p - номер пространственной гармоники; β_0 - фазовая постоянная основной пространственной гармоники; Λ - период повторения неоднородностей.

Пользуясь понятием эффективного показателя преломления, формулу (2) представим в виде

$$n_p = n_{\text{eff } 0} + \frac{\lambda}{\Lambda} p, \quad p = 0, \pm 1, \pm 2 \dots, \quad (3)$$

где $n_p = \beta_p / k_0$ - эффективный показатель преломления p -й пространственной гармоники; $k_0 = 2\pi / \lambda$ - волновое число в свободном пространстве; λ - длина волны.

Для определения направления возможного испускания волны рассмотрим взаимодействие лучей OA и OA' (рис. 1). Для конструктивной интерференции необходимо, чтобы разность фаз была равна нулю, т.е.

$$\beta_p \cdot OO' = k_0 \cdot OO' \cos \theta. \quad (4)$$

Отсюда следует, что угол распространения излучения определяется условием: $\cos \theta = \beta_p / k_0 = n_p$. Очевидно, что ответственными за излучение из волновода являются пространственные гармоники с $|n_p| < 1$. При проектировании

антенны целесообразно выбрать период Λ так, чтобы вышеуказанное условие удовлетворялось только для одной гармоники с возможно малым индексом p . Как видно из формулы

$$\cos \theta = n_p = n_{\text{eff}0} + \frac{\lambda}{\Lambda} p, \quad (5)$$

наименьшее возможное значение $p = -1$, поскольку, как правило, $n_{\text{eff}0} > 1$.

Необходимо иметь в виду, что пространственные гармоники являются группой неотделимых волн, и, следовательно, излучение одной гармоники сопровождается излучением всего поля. Возможность частотного сканирования направлением главного максимума ДН явно следует из уравнения (5), а соответствующий график зависимости $\theta = \theta(\lambda)$ представлен на рис. 2.

Экспериментальные измерения частотно-сканирующей антенны на основе ЗДВ осуществлялись с помощью панорамного измерителя коэффициента стоячей волны (КСВ) и ослабления Р2-68. В качестве диэлектрика ЗДВ использовался поликорундовый ($\epsilon = 9,6$, $\text{tg} \delta = 10^{-3}$) стержень длиной $L = 12,5$ см с поперечными размерами $a \times b = 1,2 \times 2,4$ мм, определяющими одномодовый режим распространения волны E_{11} (ось y перпендикулярна плоскости основы) в диапазоне волн 5,5 ... 8 мм. Металлической основой ЗДВ служили алюминиевые пластины, в которых вырезались щели с периодом $\Lambda = 2,5$ мм, длинами $\ell = 0,5$ мм и 1,25 мм.

Регистрация излучения, испускаемого с поверхности ЗДВ, проводилась с помощью рупорной антенны с коэффициентом усиления 20 дБ, установленной на поворотном устройстве. Результаты измерений в случаях $\ell = 0,5$ мм и $\ell = 1,25$ мм представлены на рис.2 соответственно в виде крестов и кружочков.

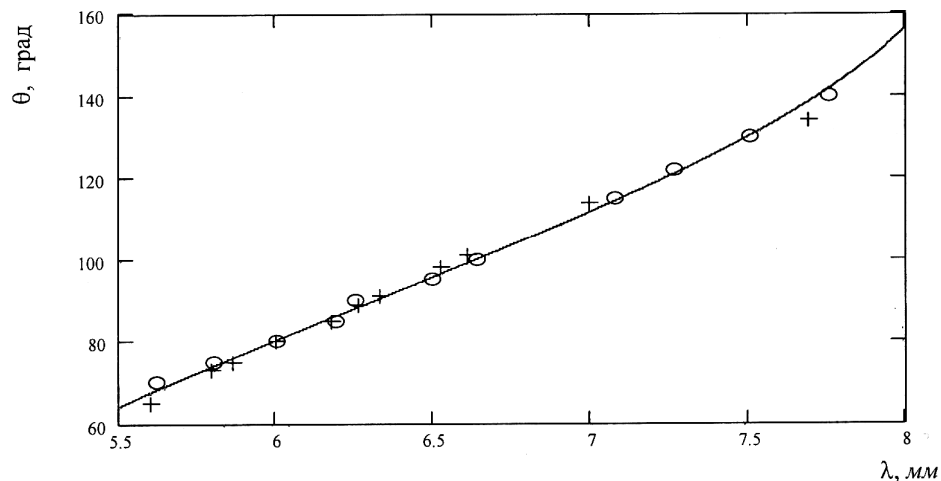


Рис.2. Зависимость угла испускания излучения от длины волны при длинах щелей 0,5 мм (+) и 1,25 мм (o)

Видно, что угловой интервал сканирования составляет 70° и имеет место хорошее согласование между экспериментальными и рассчитанными (сплошная кривая) данными. В расчетах были использованы численные значения $n_{\text{эфф}}$, полученные в результате решения дисперсионного уравнения однородного ЗДВ. Хотя такой подход кажется несправедливым при $\ell = 1,25$ мм (размер возмущенной области уже не является малым), однако в пределах погрешности эксперимента ($\Delta\theta \approx \pm 0,2^\circ$, $\Delta\lambda \approx 0,01$ мм) не было обнаружено расхождение между расчетными и экспериментальными данными.

Использование длинных щелей ($\ell = 1,25$ мм, т.е. $\ell / \lambda = 0,5$) интересно тем, что эффективность излучения (отношение мощности испускаемого излучения к мощности на входе ЗДВ) в этом случае высока. Согласно измерениям, эффективность излучения при $\ell = 1,25$ мм на 5 дБ превосходит случай, когда $\ell = 0,5$ мм, и составляет ≈ 10 дБ. Последнее означает, что около 90 % мощности на входе ЗДВ излучается в свободное пространство, если не принимать в расчет джоулевские потери и рассогласование на входе ($K_{\text{СВ}} < 1,2$). Диаграмма направленности антенны имела веерообразный вид; угловая ширина главного максимума (на уровне 3 дБ) составляла примерно 2° , что хорошо согласуется с теоретической оценкой.

В заключение отметим, что при замене в периодическом ЗДВ линейного диэлектрика на нелинейный можно получить генерацию излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн посредством генерации разностной частоты (ГРЧ) двух частотно-расстроенных лазеров. В предлагаемой конструкции можно ожидать достаточно высокоэффективную ГРЧ, поскольку генерируемая волна испускается с поверхности нелинейного кристалла, и, следовательно, она практически не испытывает материального поглощения в нелинейной среде [6].

Таким образом, на основе ЗДВ с периодическими неоднородностями можно создать антенну с частотным управлением направления основного излучения. Предложена простая теоретическая модель, хорошо объясняющая экспериментальные данные. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о перспективности разработанной антенны в задачах радиолокации и построения изображений в ММДВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Marino R.A.** A Novel Tapered Slot PCS Antenna Array and Model //Microwave Journal.- 1999.- V. 42, N1. - P. 90-100.
2. **Klohn K.L., Horn R.E., Jacobe H., Freibergs E.** Silicon Waveguide Frequency Scanning Linear Array Antenna //IEEE Trans. Microwave Theory Tech.-1978.-V.26,N10. -P. 764-773.
3. **Ishii T. K.** //Handbook of Microwave Technology. -1995. - V. 1, Academic press.
4. **Solbach K., Wolff I.** The Electromagnetic Field and the Phase Constants of Dielectric Image Lines //IEEE Trans. Microwave Theory Tech.- 1978. -V. 26, N4. -P. 266-274.
5. **Peng S.T., Tamir T., Bertoni H. L.** Theory of Periodic Dielectric Waveguides //IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. -1975. - V. 26. -P. 123-133.
6. **Avetisyan Yu., Hakhoumian A., Melikyan H., Tatevosyan V., Ito H., Sasaki Y.** A New Scheme of THz-Wave Difference-Frequency Generation In Highly-Absorbing Cubic Nonlinear Crystal //Tech. Dig. CLEO. - 2005 (to be published).

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 10.10.2004.

**ՅՈՒ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա.Ա. ՀԱԽՈՒՄՅԱՆ, Վ.Ռ. ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ,
Հ.Կ. ՄԵԼԻԿՅԱՆ**

**ՀԱՃԱԽԱՑԻՆ ՃՈՃՔՈՎ ԱԼԵԱՐՉԱԿ՝ ՊԱՐԲԵՐԱԿԱՆ ՃԵՂՔԵՐՈՎ ՀԱՅԵԼԱՑԻՆ
ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿ ԱԼԻՔՍԱՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ**

Նախագծվել է նոր՝ ճառագայթման ուղղվածության հաճախային դեկավարմամբ ալեարձակ՝ պարբերական անհամասեռություններով հայելային դիլեկտրիկ ալիքատարի կիրառմամբ: Հաճախությունների 36...54 ԳՀց տիրույթում իրականացվել է ուղղորդվածության դիագրամի գլխավոր թերթիկի ճոճք 70°- ի սահմաններում, ընդ որում՝ թերթիկի անկյունային լայնությունը E- հարթությունում չի գերազանցել 2°: Փորձարարական տվյալները համընկնում են տեսական հաշվարկներին:

**Yu.H. AVETISYAN, A.A. HAKHOUMIAN, V.R. TADEVOSYAN,
H.K. MELIKYAN**

**FREQUENCY SCANNING ANTENNA BASED ON DIELECTRIC IMAGE WAVEGUIDE
WITH PERIODICAL SLOTS**

A new frequency scanning antenna based on dielectric image waveguide with periodical slots is suggested. In the frequency range 36 ... 54 GHz the angle of scanning within 70° has been realized, and the angular width of the main lobe did not exceed 2° in the E - plane. Experimental data are in good agreement with calculations.

В.Г. АВETИСЯН

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКИХ МНГОВОЛНОВЫХ ТРАКТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ

Обсуждаются методы измерений характеристик коротких многоволновых передающих линий с помощью измерительной линии.

Ключевые слова: методы измерений, измерительная линия, многоволновые линии передачи.

К основным достоинствам методов измерения характеристик коротких трактов с помощью измерительной линии относятся широкая область практической применимости, простота и надежность [1,2]. В настоящей работе данные методы измерений рассматриваются применительно к определению характеристик многоволновой линии передачи от стационарной радиоаппаратуры к подвижному зонду при антенных измерениях по ближнему полю. В [3] предложено устройство с такой линией передачи, которая построена на подвижных относительно друг друга сверхразмерных волноводных сочленениях и в процессе измерений сохраняет неизменной свою полную геометрическую длину. В случае измерений по ближнему полю антенн исключительно важной является нестабильность передаточных характеристик линии передачи по фазе $-\Delta\xi_n$ и по мощности $-\Delta\eta_n$. Однако вначале необходимо знать, насколько правильно спроектирована эта линия, поскольку она имеет квазиоптический характер с возможностью распространения в ней, кроме основной возбуждаемой моды, также и паразитных мод, возбуждаемых на нерегулярностях такой линии передачи [4]. Процессы преобразований основной рабочей моды в паразитные и, наоборот, в многоволновой линии передачи могут существенно влиять на ее передаточные характеристики [5].

Критериями оценки соответствия проектируемой линии передачи цели ее назначения, помимо теоретических предпосылок, является также фактор степени нерегулярности предлагаемой линии, который обуславливает как степень наличия возбуждаемых паразитных мод, так и степень взаимодействия их между собой и с основной рабочей модой.

В настоящей работе излагаются методы измерений, позволяющие сначала качественно оценить вышеприведенный фактор, а затем количественно - нестабильность передаточных характеристик $\Delta\xi_n$ и $\Delta\eta_n$ многоволновой линии передачи.

Качественная оценка базируется на измерении картины стоячих волн в месте расположения неподвижного зонда измерительной линии (ИЛ) при перемещении короткозамыкателя (КЗ), установленного на конце исследуемой

линии передачи. Этот метод измерения широко применяется при исследовании одномодовых линий [6]. Известно [4], что вблизи плоскости Q сосредоточения нерегулярности в одномодовой линии поле содержит компоненты также в виде высших реактивных полей волновода, экспоненциально затухающих с расстоянием, а в области нерегулярности формируются отраженная и проходящая волны рабочей моды. Величина отраженной волны зависит от коэффициента отражения $\dot{\Gamma} = |\dot{\Gamma}| e^{j\varphi}$, а величина прошедшей волны - от коэффициента прохождения $\dot{C} = |\dot{C}| e^{j\psi}$. На рис. 1 изображены расположения элементов измерительного стенда при исследовании одномодовой линии для двух последовательных положений КЗ, отличающихся на величину Δl .

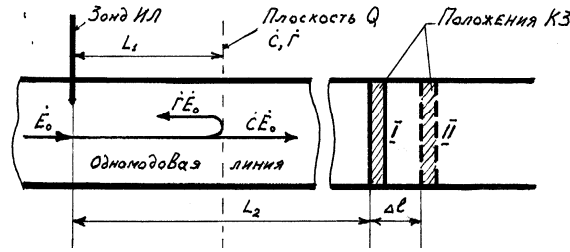


Рис. 1

Без учета омических потерь и при условии идеального отражения на КЗ результирующее поле $\dot{E}$ в плоскости зонда ИЛ с учетом членов малости первого порядка ($|\dot{\Gamma}| \ll 1, |\dot{C}| \leq 1$), пренебрегая многократными отражениями, определится при втором положении КЗ выражениями

$$\dot{E} = \dot{E}_0 e^{j\omega t} \left\{ 1 + |\dot{C}| e^{j[2\beta_0(L_2 + \Delta l) + \psi + \pi]} + |\dot{\Gamma}| e^{j[2\beta_0 L_1 + \varphi]} \right\}, \quad (1)$$

$$\dot{E}(\Delta l) = \dot{E}_0 e^{j\omega t} \left\{ 1 + |\dot{C}| e^{j(2\beta_0 \Delta l + \varepsilon)} + |\dot{\Gamma}| e^{j\theta} \right\}, \quad (2)$$

где $\beta_0 = 2\pi/\Lambda_{\text{ВО}}$; $\Lambda_{\text{ВО}}$ - длина волны в одномодовом волноводе; $\theta = 2\beta_0 L_1 + \varphi$; $\varepsilon = 2\beta_0 L_2 + \psi + \pi$ - величины постоянные при данной неоднородности; фаза величиной в π возникает при отражении от КЗ. Сопоставим каждому члену в фигурных скобках выражения (2) векторы следующим образом:

$$\overrightarrow{OO_1} = 1; \quad \overrightarrow{OO_2} = |\dot{\Gamma}| e^{j\theta}; \quad \overrightarrow{O_3O_4} = |\dot{C}| e^{j(2\beta_0 \Delta l + \varepsilon)}. \quad (3)$$

$e^{j\omega t}$ из (2) и обозначая $\dot{E}^H(\Delta l) = \dot{E}(\Delta l)/\dot{E}_0$, имеем

$$\vec{\dot{E}}^H(\Delta l) = \vec{OO_1} + \vec{OO_2} + \vec{O_3O_4}. \quad (4)$$

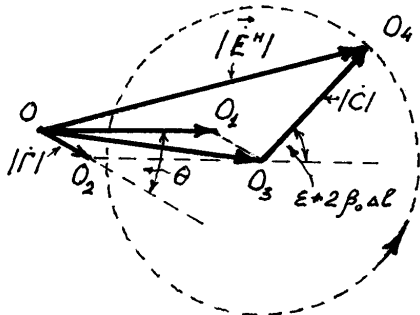


Рис. 2

На рис. 2 представлена соответствующая известная векторная диаграмма, из которой следует, что вектор $\overrightarrow{O_3O_4}$, имеющий модуль $|\dot{C}| \leq 1$, с изменением Δl вращается вокруг точки O_3 .

При этом один оборот совершается при изменении расстояния Δl на величину $\Lambda_{\text{в}0}/2$, поскольку при этом $2\beta_0\Delta l = 2\pi$. Максимумы и минимумы поля $|\dot{E}^{\text{H}}|$ в плоскости зонда следуют

через последовательные перемещения КЗ, равные $\Lambda_{B0}/4$, и их уровни будут неизменны. Учет омических потерь в (1), (2) приводит лишь к увеличению уровней минимумов поля и к уменьшению максимумов. При $\Delta l \ll L_2$ не сказывается затухание, введенное этим отрезком, и уровни максимумов и минимумов практически будут постоянными.

Рассмотрим измерение этого типа, когда зонд опять находится в одномодовом волноводе ИЛ, после которого следует возбудитель (В) основной рабочей моды, поступающей в многоволновую линию передачи (МЛП) с КЗ на конце, как изображено на рис. 3, где Г - генератор, АТТ - аттенюатор, ИП - индикатор перемещений, З - зонд ИЛ.

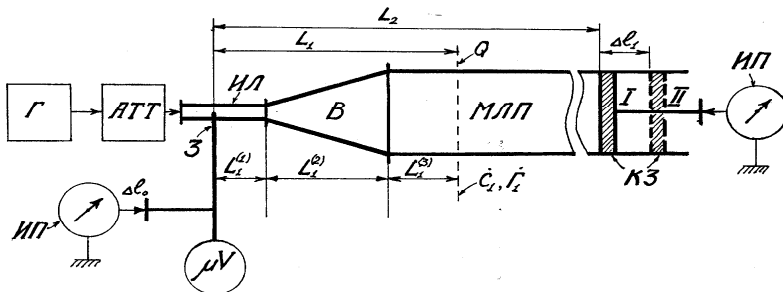


Рис. 3

Предположим, соотношение омических потерь и потерь преобразования основной волны в паразитные таково, что отсутствуют явления резонанса для паразитных мод, возбуждаемых на нерегулярности в МЛП. Причем возникающие на этой нерегулярности паразитные моды идут как к КЗ, так и в сторону ИЛ. Кроме этого, от этой нерегулярности возникает отраженная волна самой рабочей основной моды. С этой волной взаимодействуют как идущие к ИЛ паразитные моды, так и паразитные моды, которые, взаимодействуя с прошедшей через нерегулярность основной волной, отражаются вместе с ней на КЗ и идут обратно к ИЛ. Количественно оценить все эти взаимодействия хотя бы при заданной единственной нерегулярности не представляется возможным. Однако для качественного рассмотрения сути явлений в плоскости зонда поле в этой же плоскости, с учетом многомодовости МЛП, можно описать следующим образом.

Введем комплексные величины, имеющие следующий смысл в месте расположения зонда:

- $\dot{k}_1 = |\dot{k}_1| e^{j\alpha_1}$ - коэффициент, учитывающий преобразование в паразитные моды части основной моды, прошедшей через нерегулярность и далее отраженной КЗ обратно;
- $\dot{k}_2 = |\dot{k}_2| e^{j\alpha_2}$ - коэффициент, учитывающий преобразование в паразитные моды части основной моды, отраженной от нерегулярности в сторону ИЛ;
- $\dot{k}_3 = |\dot{k}_3| e^{j\alpha_3}$ - коэффициент, учитывающий долю основной моды в сечении зонда, которая образовалась в результате обратного преобразования паразитных волн в основную моду в МЛП и проникла в одномодовый волновод ИЛ.

Запишем поле в сечении неподвижного зонда для случая с МЛП в виде

$$\dot{E}_1(\Delta l) = \dot{E}_0 e^{j\omega t} \{ 1 + |\dot{k}_1| \times |\dot{C}_1| e^{j(2\beta_1 \Delta l_1 + \epsilon_1)} + |\dot{k}_2| \times |\dot{\Gamma}_1| e^{j\theta_1} + |\dot{k}_3| e^{j\alpha_3} \}, \quad (5)$$

где $\beta_1 = 2\pi/\Delta_{B1}$; Δ_{B1} - длина волны в многомодовом волноводе, в котором перемещается КЗ; $\dot{C}_1 = |\dot{C}_1| e^{j\psi_1}$ и $\dot{\Gamma}_1 = |\dot{\Gamma}_1| e^{j\varphi_1}$ - соответственно коэффициенты прохождения и отражения основной рабочей моды в плоскости Q сосредоточения нерегулярности в МЛП; $\theta_1 = 2\beta_0 L_1^{(1)} + \gamma + 2\beta_1 L_1^{(3)} + \varphi_1 + \alpha_2$, а величина γ представляет двойной фазовый набег рабочей моды на отрезке $L_1^{(2)}$, на котором постоянная распространения меняется от величины β_0 до β_1 ; $\epsilon_1 = 2\beta_0 L_1^{(1)} + \gamma + 2\beta_1 L_1^{(3)} + 2\beta_1(L_2 - L_1) + \psi_1 + \pi + \alpha_1$; Δl_1 - перемещение КЗ в МЛП.

При малых потерях рабочей моды на преобразование в паразитные моды в такой записи выражения (5) из физических соображений следует полагать, что $|\dot{k}_1| \leq 1$, $|\dot{k}_2| \leq 1$ и $|\dot{k}_3| \ll 1$. В зависимости от величины Δl_1 меняются условия взаимодействия между всеми волнами, которые есть в

исследуемой многоволновой электродинамической системе. Поэтому можно также предположить, что модули и фазы коэффициентов $\dot{k}_1, \dot{k}_2, \dot{k}_3$, зависящие также от геометрии и электрических свойств многоволновой системы, будут флуктуировать относительно своих средних величин в зависимости от значения Δl_1 . Причем величина флуктуаций тем меньше, чем меньше возмущения, вызванные нерегулярностью. Тогда, очевидно, что ε_1 и θ_1 будут также флуктуировать в зависимости от Δl_1 .

Аналогично случаю одномодовой системы, членам в фигурных скобках выражения (5) сопоставим векторы следующим образом:

$$\overrightarrow{OO_1} = 1 + |\dot{k}_2| \times |\dot{\Gamma}_1| e^{j\theta_1} + |\dot{k}_3| e^{ja_3}; \quad \overrightarrow{O_1O_2} = |\dot{k}_1| \times |\dot{C}_1| e^{j(2\beta_1\Delta l_1 + \varepsilon_1)}. \quad (6)$$

Если обозначить $\dot{E}_1^H(\Delta l) = \dot{E}_1(\Delta l_1)/\dot{E}_0$, то будем иметь

$$\overrightarrow{\dot{E}_1^H(\Delta l_1)} = \overrightarrow{OO_1} + \overrightarrow{O_1O_2} = \overrightarrow{OO_2}. \quad (7)$$

На рис. 4 показана векторная диаграмма $\dot{E}_1^H(\Delta l_1)$ для этого случая при двух различных положениях КЗ - Δl_1 и $\Delta l'_1$. Вектор $\overrightarrow{OO_1}$ при изменении Δl_1 из-за флуктуаций модулей и фаз величин $\dot{k}_2$ и $\dot{k}_3$ будет флуктуировать как по модулю, так и по фазе (точки O_1 и O'_1) относительно единичного вектора. Вектор же $\overrightarrow{O_1O_2}$ при изменении Δl_1 из-за флуктуаций модуля величины $\dot{k}_1$ будет флуктуировать по модулю, вращаясь вокруг точки O_1 неравномерно из-за флуктуации фазы величины $\dot{k}_1$, но повторяя свое направление, в среднем, через последовательные перемещения КЗ, равные $\Lambda_{B1}/2$.

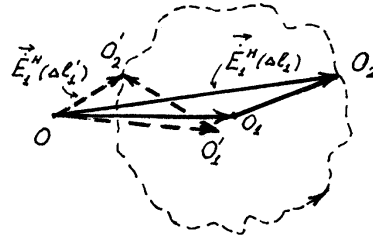


Рис. 4

В результате суммарное поле, характеризуемое вектором $\overrightarrow{OO_2}$, в отличие от предыдущего случая одномодовой системы, при монотонном изменении Δl_1 будет иметь максимумы и минимумы уже через отрезки перемещений КЗ, приблизительно равные $\Lambda_{B1}/4$. Причем уровни максимумов и минимумов будут изменяться на картине стоячих волн, регистрируемых неподвижным зондом одномодовой ИЛ, а на скатах кривой картины стоячих волн будут всплески. Величина и количество всплесков, а также величина изменения относительных уровней максимумов и, особенно, минимумов характеризуют степень наличия паразитных высших мод в МЛП. Чем менее нерегулярна МЛП, тем менее будут выражены указанные факторы. Тем самым определяется качественно степень наличия паразитных мод, а значит, и степень нерегулярности исследуемой МЛП.

Приведенные выше критерии качественной оценки нерегулярности МЛП подтверждаются экспериментальными данными. В качестве исследуемой многомодовой системы использовался телескопический фазовращатель с подвижным оконечным закороченным сверхразмерным волноводом с внутренним сечением $56(32 \text{ мм}^2)$. В него входило рупорное окончание (сечением $55,2(31,2 \text{ мм}^2)$) неподвижного волновода фазовращателя с входным фланцем внутреннего сечения $48(24 \text{ мм}^2)$, соединенным с выходным фланцем пирамидального возбуждителя рабочей волны моды H_{10} . Рупорное окончание неподвижного волновода фазовращателя было отформовано впрессовкой соответствующей оправы в отоженный конец этого волновода. Угол раскрыва рупора, так же как и пирамидального возбуждителя, составлял значение $2\omega_0 = 10^\circ$. Входной фланец возбуждителя с внутренним сечением $7,2(3,4 \text{ мм}^2)$ был соединен с выходным фланцем ИЛ типа Р1–12 диапазона $\lambda \approx 8 \text{ мм}$. Длина пирамидального возбуждителя равна 300 мм . Он был изготовлен из соответствующего раскроя листовой латуни толщиной 2 мм с последующей пайкой стыка на одном из его ребер.

В соответствии с рис. 3 применялись: генератор Г типа Г4 - 156, поляризационный аттенюатор АТТ типа ДЗ - 36А, микровольтметр μV типа В6 - 9, индикаторы перемещений ИП часового типа с ценой деления $0,01 \text{ мм}$. Частота измерений $f = 33 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 9,09 \text{ мм}$, параметр квазиоптического приближения $ka = 2\pi a/\lambda \approx 33$). На рис. 5 представлены измеренные картины стоячих волн для двух случаев измерений с телескопическим фазовращателем: без фильтра типов волн и с фильтром. Фильтр был изготовлен по подобию фильтра [7] с пятью слюдяными пластинами, напыленными нихромом. Плоскость пластины параллельна широкой стенке волновода, т.е. перпендикулярна вектору $\vec{E}$ основной моды H_{10} . Фильтр был установлен в неподвижном волноводе фазовращателя у входа его рупорного окончания. Заметим, что такой фильтр обеспечивает эффективное подавление высших мод H_{mn}, E_{mn} , но практически не действует на моды H_{m0} ($m = 1, 2, \dots$). Сравнение измеренных картин стоячих волн подтверждает

вышеизложенные соображения. При наличии фильтра, когда паразитных мод меньше, наблюдается меньший перепад уровней минимумов, меньшее количество всплесков и их меньшие уровни. Повышение уровня минимумов стоячих волн при наличии фильтра обусловлено вносимыми им потерями, как и следовало ожидать.

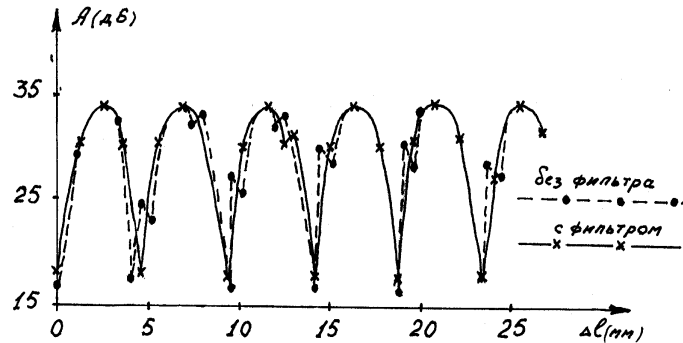


Рис. 5

Таким образом, изложенный выше метод измерения картины стоячих волн позволяет качественно оценить, насколько правильно спроектирована МЛП.

Следующий метод измерения позволяет количественно определить нестабильность $\Delta\xi_n$ фазовой передаточной характеристики МЛП. Стенд измерений такой же, как на рис. 3, а метод базируется на измерении смещения минимума стоячих волн в ИЛ при перемещении КЗ в оконечном волноводе МЛП, либо перемещении оконечного короткозамкнутого волновода исследуемой МЛП.

Из техники СВЧ измерений для случая исследования одномодовой линии передачи известно [6], что при перемещении КЗ в одномодовой линии на величину Δl минимум стоячей волны ИЛ сместится на ту же величину $\Delta l_0 = \Delta l$ при отсутствии отражений ($\dot{\Gamma} = 0$) в линии. Поскольку линия однородна, то созданному перемещением КЗ дополнительному фазовому набегу $\Delta\xi = 2\beta_0\Delta l = 4\pi\Delta l/\Lambda_{B0}$ будет соответствовать эквивалентно – сопоставляемый фазовый набег, обусловленный смещением зонда ИЛ на величину Δl_0 и равный $\Delta\xi_0 = 2\beta_0\Delta l_0 = 4\pi\Delta l_0/\Lambda_{B0}$. При наличии отражения в линии $\Delta l_0 \neq \Delta l$ и $\Delta\xi_0 \neq \Delta\xi$, т.е. возникает расхождение в фазовых набегах [6].

Рассмотрим измерение такого рода применительно к МЛП. Предположим, схема измерения удовлетворяет идеальным условиям, т.е. имеет место полное согласование и отсутствие преобразования мод. Тогда при перемещении короткозамкнутого оконечного волновода МЛП или находящегося в нем КЗ на величину Δl_{li} соответствующее смещение Δl_{oi} минимума стоячей волны в ИЛ не равно перемещению КЗ, т.е. $\Delta l_{li} \neq \Delta l_{oi}$, из-за

отличия постоянных распространения β_0 и β_1 , соответственно, в одномодовом волноводе ИЛ и сверхразмерном волноводе МЛП. Однако из физических соображений ясно, что сопоставляемые смещения Δl_{li} и Δl_{oi} фазовые набеги, соответственно $\Delta \xi_{li}$ и $\Delta \xi_{oi}$, должны быть равны, т.е.

$$\Delta \xi_{li} = 2\beta_1 \Delta l_{li} = 4\pi \Delta l_{li} / \Lambda_{B1} = \Delta \xi_{oi} = 2\beta_0 \Delta l_{oi} = 4\pi \Delta l_{oi} / \Lambda_{B0}. \quad (8)$$

При реальных условиях, т.е. при наличии нерегулярностей в МЛП и процессов возбуждения высших мод и преобразования волн друг в друга, условие (8) нарушается. При идеальных условиях смещения Δl_{oi} минимума стоячей волны в ИЛ в зависимости от смещений Δl_{li} КЗ в МЛП получаются из (8) и равны $\Delta l_{oi} = \Delta l_{li} \Lambda_{B0} / \Lambda_{B1}$. При реальных условиях измеренные смещения l_{oi}^u минимума стоячей волны в ИЛ расходятся на величину δl_i от Δl_{oi} , что и определяет расхождение $\delta \xi_i$ в сопоставимых им фазовых набегах $\Delta \xi_{oi}^u$ и $\Delta \xi_{oi}$, т.е.

$$\delta \xi_i = \Delta \xi_{oi}^u - \Delta \xi_{oi} = 2\beta_0 \delta l_i = 2\beta_0 (\Delta l_{oi}^u - \Delta l_{oi}) = \frac{4\pi}{\Lambda_{B0}} \left(\Delta l_{oi}^u - \Delta l_{li} \frac{\Lambda_{B0}}{\Lambda_{B1}} \right). \quad (9)$$

Нестабильность $\Delta \xi_H$ фазовой передаточной характеристики исследуемого стенда с МЛП сводится к определению размаха $\Delta \xi_p$ величины $\delta \xi_i$. Причем

$$\Delta \xi_H = \pm \frac{1}{2} |\Delta \xi_p| = \pm \frac{1}{2} |\delta \xi_i^{\max} - \delta \xi_i^{\min}|. \quad (10)$$

Измерение нестабильности $\Delta \eta_H$ передаточной характеристики исследуемого стенда с МЛП можно выполнить по методу, изложенному в [5]. При последовательных перемещениях Δl_{li} определяются уровни $A_i^{\max}(\text{дБ})$ и $A_i^{\min}(\text{дБ})$, соответственно, максимумов и минимумов стоячей волны в ИЛ. По ним вычисляются значения коэффициента K_i стоячей волны в ИЛ по соотношению

$$K_i = 10^{\frac{A_i^{\max} - A_i^{\min}}{20}}. \quad (11)$$

Затем вычисляются потери η_i в МЛП посредством выражения

$$\eta_i = 10 \lg \frac{K_i - 1}{K_i + 1}. \quad (12)$$

В значение η_i входят также потери на преобразование. Искомая величина $\Delta\eta_H$ определяется размахом η_p , определяемым, в свою очередь, из значений η_i для различных положений Δl_{ij} КЗ:

$$\Delta\eta_H = \pm \frac{1}{2} \Delta |\eta_p| = \pm \frac{1}{2} |\eta_i^{\max} - \eta_i^{\min}|. \quad (13)$$

Приведем замечания относительно указанных выше методов измерений:

- практическим верхним пределом измеряемых потерь η_i является 10...12 дБ [5];
- при длине МЛП порядка 500λ уход фазы волны, при двойном пробеге ею МЛП, в месте расположения зонда составит 1° при нестабильности генератора по частоте $0,3 \cdot 10^{-5}$;
- ухудшение нестабильности приводит к тому, что значения K_i оказываются меньше истинных [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стариков В.Д.** Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий. - М.: Сов.радио, 1972. - 202 с.
2. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / Под ред. **Р.А. Валитова и Б.И. Макаренко**. - М.: Связь, 1984. - 295 с.
3. Патент ¹ 2017164 РФ, МКИ G01R 29/08. Устройство для измерения распределения поля в раскрыве антенны / **В.Г. Аветисян** (РА). - Заявка ¹ 4952810, приоритет изобретения 30.04.91. Опубл. 30.07.94. Бюл. ¹ 14. - 7 с.
4. **Никольский В.В.** Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: Наука, 1973. - 607 с.
5. **Ваганов Р.Б., Матвеев Р.Ф., Мериакри В.В.** Многоволновые волноводы со случайными нерегулярностями. - М.: Сов. радио, 1972. - 231 с.
6. **Типпер Ф.** Техника измерений на сверхвысоких частотах. - М.: ГИФМЛ, 1963. - 367 с.
7. **Anderson T.N.** State of the waveguide art // Microwave Journal. - December 1982. - P. 22-48.

ЗАО "РАО МАРС". Материал поступил в редакцию 26. 05. 2004.

Վ.Հ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ՀԱՓԻՉ ԳԾԻ ՄԻՋՈՑՈՎ ԲԱԶՄԱԼԻՔ ԿԱՐՃ ՏՐԱՎՏՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՀԱՓՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ

Քննարկվում են չափիչ գծի միջոցով չափման մեթոդներ, որոնք կիրառվում են բազմալիք կարճ փոխանցման գծերի բնութագրերի որոշման համար:

V.H. AVETISSYAN MEASUREMENT TECHNIQUES OF OVERMODED SHORT TRACT CHARACTERISTICS BY LECHER LINE

Measurement techniques with the help of Lecher line for determination of characteristics of overmoded short transmission lines are discussed.

А.А. ТЕРЗЯН, Г.С. СУКИАСЯН, А.Е. ПАРОНИКЯН

О РАСЧЕТЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Предложен и реализован подход к автоматическому построению сетки дискретизации для решения краевых задач методом конечных элементов. Данный подход основан на последовательной композиции (или декомпозиции) сеточных узлов и элементов в ходе решения краевой задачи в зависимости от поведения получающихся невязок в узлах сетки.

Ключевые слова: электромагнитное поле, метод конечных элементов, динамическая декомпозиция элементов дискретизации.

1. Введение. Исследование нелинейных и неоднородных магнитных полей со сложной геометрией связано с огромным объемом вычислений. С одной стороны, с увеличением числа элементов дискретизации возрастает точность приближения к непрерывной области исследования и, следовательно, точность решения краевой задачи, с другой - повышается порядок решаемой системы уравнений, что повышает трудоемкость вычислений.

Вместе с тем принятое на практике “ручное” построение дискретизационной сетки, основанное на предыдущем опыте и инженерной интуиции, ставит в определенной мере результат решения краевой задачи в зависимость от способности исследователя предугадать оптимальную для данной задачи сетку дискретизации. Таким образом, при “ручном” построении сетки дискретизации как результат решения, так и время решения задачи в определенной степени ставятся в зависимость от индивидуальных качеств исследователя.

Кроме того, чрезмерное возрастание количества сеточных узлов и усложнение геометрии исследуемой области делает затруднительным субъективное построение оптимальной сетки. При этом неудачно выбранная сетка не только может стать причиной замедления сходимости процесса последовательных приближений, но и вовсе привести к расходимости процесса. Все это делает особо актуальной проблему автоматического выбора сеточных узлов и построения оптимальной сетки.

В настоящей работе предложен подход к автоматическому построению сетки дискретизации для решения краевых задач методом конечных элементов, основанный на последовательной композиции (или декомпозиции) сеточных узлов и элементов в ходе решения краевой задачи в зависимости от поведения получающихся невязок. Метод апробирован реализацией

компьютерной программы автоматического построения оптимальной сетки для расчета плоских магнитных полей при помощи треугольных конечных элементов.

2. Математическая формулировка задачи расчета магнитного поля. Постоянное магнитное поле, созданное электрическим током, подчиняется уравнениям Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \delta, \quad \mathbf{H} = \nu \mathbf{B}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{H}$ -- напряженность магнитного поля; δ -- плотность тока; $\mathbf{B}$ – магнитная индукция; ν – величина, обратная магнитной проницаемости.

Определим векторный магнитный потенциал $\mathbf{A}$, который характеризуется следующими уравнениями:

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad \operatorname{div} \mathbf{A} = 0.$$

Тогда (1) принимает вид

$$\operatorname{rot}(\nu \operatorname{rot} \mathbf{A}) = \delta, \quad \operatorname{div} \mathbf{A} = 0. \quad (2)$$

К дифференциальному уравнению (2) необходимо добавить краевое условие. Обычно это условие берется в виде задачи Дирихле – края исследуемой области берутся достаточно далеко от токопроводящих подобластей, так что величину потенциала на краях можно принять равной нулю.

3. Метод конечных элементов. Краевые задачи со сложной геометрией обычно решаются методом конечных элементов. Суть этого метода заключается в том, что исследуемая область разделяется на подобласти (элементы) и внутри каждого элемента краевая задача заменяется вариационной, то есть дифференциальное уравнение с частными производными заменяется задачей минимизации некоторого функционала. В нашем случае дифференциальное уравнение (2) заменяется задачей минимизации энергетического функционала:

$$F(\mathbf{A}) = \int (\int \mathbf{H} d\mathbf{B}) d\omega - \int \delta \mathbf{A} d\omega,$$

где $d\omega$ – элемент объема.

Для удовлетворения краевого условия используется метод Ритца – искомый потенциал внутри конечных элементов аппроксимируется системой линейно независимых базисных функций, одна из которых удовлетворяет краевому условию, а остальные обращаются в нуль на краю. В качестве базисных можно взять функции интерполяции a_i , которые в i -ом узле

принимают значение 1, а в остальных – 0. В результате для каждого некраевого узла j получается алгебраическое уравнение

$$\sum_e \left(v_e \sum_{i=1}^L A_i \beta_{ij}^e - \frac{\delta \Delta}{3} \right) = 0, \quad j=1,2,\dots,N, \quad (3)$$

где A_i - значение потенциала A в узле i ; v_e - значение v внутри элемента e ; δ_e - значение δ внутри элемента e ; β_{ij} - коэффициент взаимодействия вершин i и j ; N - число некраевых узлов.

В (3) внешнее суммирование осуществляется по всем элементам e , содержащим узел j , а внутреннее суммирование – по всем узлам i , содержащимся в элементе e (L - число таких узлов).

В случае сетки из плоских треугольных элементов коэффициент β_{ij} по вершинам i, j, m треугольника e имеет следующий вид (здесь $L=3$):

$$\begin{cases} \beta_{ii}^e = \frac{1}{4\Delta} [(y_j - y_m)^2 + (x_j - x_m)^2], \\ \beta_{ij}^e = \frac{1}{4\Delta} [(y_j - y_m)(y_m - y_i) + (x_j - x_m)(x_m - x_i)], \end{cases} \quad (4)$$

где (x_i, y_i) - декартовы координаты узла i ; Δ - площадь треугольника:

$$\Delta_n = \frac{(x_i - x_m)(y_j - y_m) - (y_i - y_m)(x_j - x_m)}{2}.$$

Заметим, что для каждого узла j в (3) 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.

4. Автоматическое построение сетки. Как построить оптимальную сетку, если меняется набор узлов дискретизации? При автоматическом построении сетки конечных элементов следует учитывать два условия:

а) внутри элемента физическая среда должна быть однородной, т.е. границы раздела сред должны быть границами раздела и элементов;

б) вершины элементов должны быть как можно ближе друг к другу, чтобы их участие в (3)-(4) в качестве “соседних узлов” было обоснованным. Математически условие “б” означает, что минимальный внутренний угол в отдельном элементе должен быть как можно больше (но он всегда меньше, чем $(\pi/3)$).

Рассмотрим для наглядности случай сетки из плоских треугольных элементов. Триангуляция проводится в два этапа: вначале строится произвольная треугольная сетка (можно использовать классические мозаики Вороного и Делоне [1]), затем производится коррекция сетки для достижения условий "а" и "б".

Каждое ребро d сетки является стороной двух треугольников, составляющих вместе четырехугольник Q . Одна из диагоналей этого четырехугольника и есть d , обозначим через d' вторую диагональ. Четырехугольник Q делится на два треугольника диагональю d или d' . Выбор разделяющей диагонали производится с учетом условия "а". Если для обеих диагоналей выполняется условие "а", то проверяется условие "б". Перебирая по всем ребрам, получим оптимальную триангуляцию.

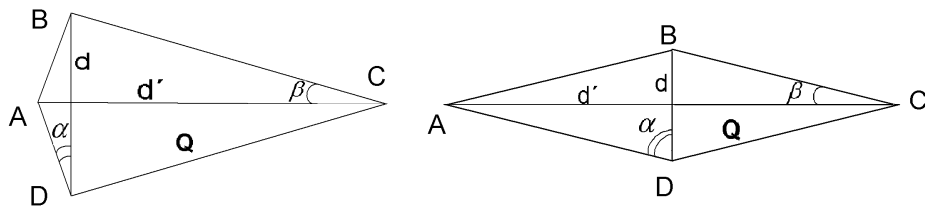


Рис. 1. Коррекция элементов сетки

Заметим, что длина диагонали имеет второстепенное значение. Например, на рис. 1 угол α является минимальным для треугольника ABD, а угол β - минимальным для треугольника ABC. Слева $\alpha < \beta$, а справа $\alpha > \beta$, соответственно деление на треугольники производится слева - при помощи диагонали $d' = AC$, а справа - при помощи диагонали $d = BD$, хотя в обоих случаях имеем $d < d'$.

5. Композиция и декомпозиция сетки. В случае, когда исследуемая область неоднородна и состоит из подобластей с различными физическими и геометрическими свойствами, целесообразно, чтобы совокупность узлов дискретизации имела различную интенсивность (густоту) в разных подобластях. Чтобы добиться оптимального распределения густоты узлов, предлагается совокупность узлов не фиксировать, а по ходу решения задачи добавлять узлы (или же, наоборот, исключать).

В нелинейных полевых задачах основным источником погрешности является предположение, что внутри элемента магнитная проницаемость является постоянной. Поэтому имеет смысл добавлять узлы там, где:

- геометрические размеры элемента велики;
- сильно меняются значения магнитной проницаемости.

Критерием для выбора элемента, где будет добавлен узел, взято произведение

$$K = \max E S,$$

где E – значение невязки – разницы между значениями искомого потенциала в данной точке до итерации и после; S – площадь элемента. Первый множитель способствует тому, что узлы добавляются в местах, где велика невязка. Причем она велика там, где сильно меняются значения магнитной проницаемости. Второй множитель обеспечивает уменьшение геометрических размеров элементов.

После того как элемент для композиции выбран, надо выбрать место, где будет добавлен узел. Если узел добавить внутри элемента, то неминуемо образуются тупоугольные треугольники, что нежелательно (см. условие "б"). Предлагается узел добавлять в середине наибольшей стороны треугольника.

Проблема зазора. Если на рис. 1 сторона AC является границей раздела сред, то, согласно условию "а", деление на треугольники обязательно производится при помощи диагонали $d'=AC$, каким бы ни был угол $\angle C$. Чтобы этот угол в процессе композиции не стал бесконечно малым (такое происходит в узких воздушных зазорах), надо препятствовать появлению новых узлов, чересчур близко подходящих к границе раздела сред (на рис. 1 это узел В). Это достигается добавлением весового коэффициента при вычислении длин сторон, являющихся границей раздела сред.

После каждого изменения множества узлов производится новое автоматическое построение сетки при помощи описанного алгоритма. Таким образом, осуществляется адаптация, перестраивающая сетку к особенностям решаемой задачи.

6. Численный эксперимент. Метод апробирован на задаче определения магнитного поля в области, представленной на рис. 2.

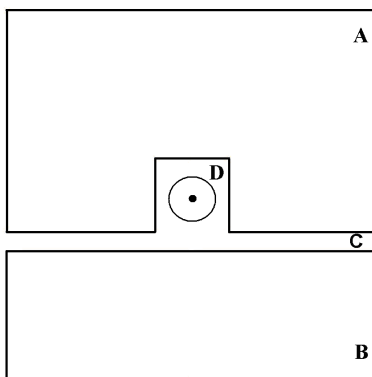


Рис. 2. Исследуемое электромагнитное устройство

На этом рисунке показано электромагнитное устройство с ферромагнитными участками А и В, разделенными воздушным зазором С. Устройство содержит обмотку D, обтекаемую током. Для определения поля в устройстве краевую задачу необходимо решить с нулевыми граничными условиями на бесконечности. Однако, учитывая, что поле вне устройства достаточно быстро затухает, можно ограничиться рассмотрением конечной

области [2] воздушного пространства, окружающего устройство, и принять на границе нулевые значения потенциалов (рис. 3).

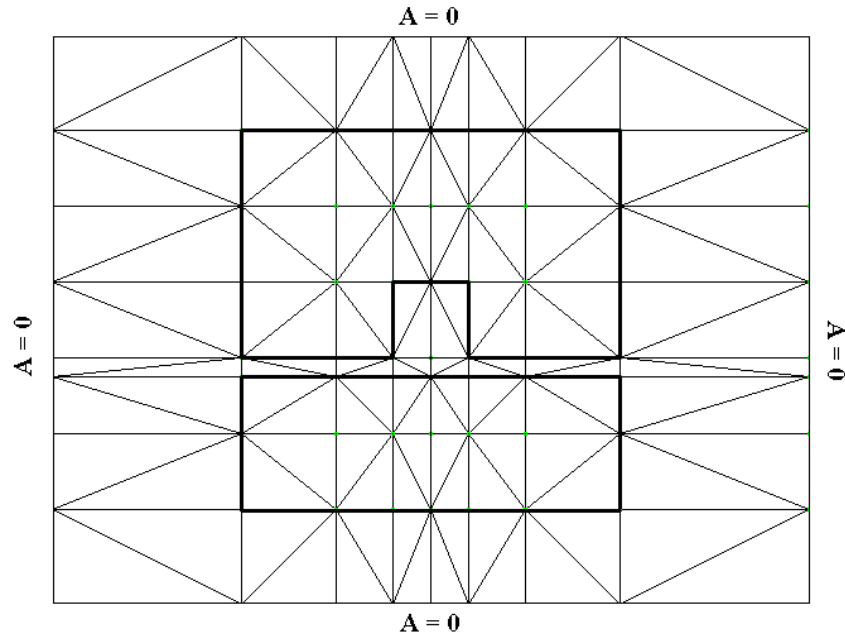


Рис 3. Задание граничных условий и начальной сетки дискретизации исследуемой области

Таким образом, для исследования магнитного поля в устройстве, представленном на рис. 2, формируется область (рис. 3) с начальной, весьма грубой сеткой дискретизации. Хотя начальное разбиение сетки может иметь произвольный характер, тем не менее оно подчинено некоторой логике, исходящей из предварительного представления о распределении магнитного поля. Как видно из рис. 3, сетка имеет большую плотность узлов вблизи токонесущей области, и с приближением к границам исследуемой области размеры конечных элементов возрастают.

С запуском разработанной программы осуществляется адаптация сетки по результатам расчета поля с одновременным определением качества сетки, основанным на анализе формы конечных элементов с целью недопущения образования острых углов (не менее 15...20°) между ребрами конечных элементов. Процесс динамической композиции завершается при достижении условия

$$Sl \leq \Delta$$

(где S – площадь, а ℓ – периметр конечного элемента; Δ -- заданный уровень останова), а итерации продолжаются до достижения заданной точности расчета поля.

На рис. 4 показана конечная сетка дискретизации исследуемой области, полученная в результате динамической композиции. В итоге осуществленной адаптации сетка из 49 начальных внутренних узлов преобразилась в сетку, состоящую из 204 внутренних узлов.

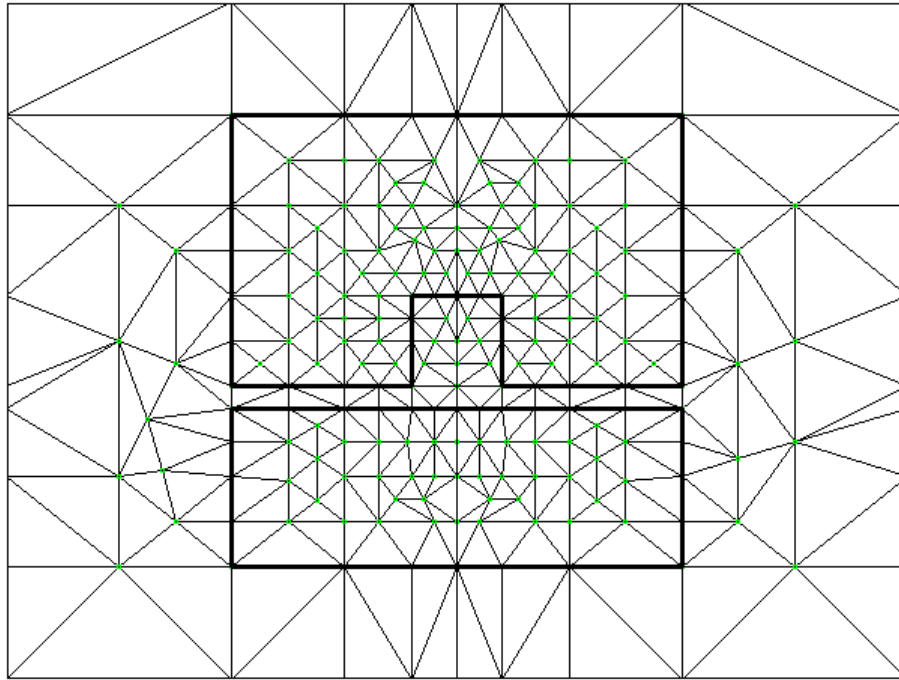


Рис. 4. Конечная сетка дискретизации исследуемой области, полученная в результате динамической композиции

На рис. 5 представлено полученное распределение магнитного поля в исследуемой области.

Для сопоставительного анализа проведены также расчеты магнитного поля с использованием постоянной конечной сетки дискретизации, представленной на рис. 4. Так, если при динамической композиции сетки краевая задача решена за 1377 итераций, то без использования адаптационных процедур та же задача решена за 1667 итераций (при той же точности решения $\varepsilon = 10^{-4}$).

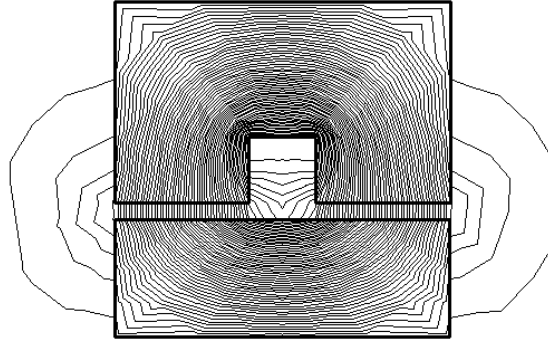


Рис. 5. Полученное распределение магнитного поля

7. Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о эффективности рассмотренных адаптационных процедур при численном решении нелинейных краевых задач электромагнитного поля.

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. **Терзян А. А.** Автоматизированное проектирование электрических машин.- М.: Энергоатомиздат, 1983.- 256 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 19.03.2005.

**Հ.Ա. ԹԵՐԶՅԱՆ, Հ.Ս. ՍՈՒՔԻԱՍՅԱՆ, Ա.Ե. ՊԱՐՈՆԻԿՅԱՆ
ԸՆԴՀԱՆՍԱՎՈՐՄԱՆ ՑԱՆՑԻ ՏԱՐԴԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿ ԿՈՍՊՈԶԻՑԻԱՅՈՎ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐԴԵՐԻ
ՄԵԹՈԴՈՎ ՄԱԳՆԻՏԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԱՍԻՆ**

Առաջարկվել և իրականացվել է ընդհատավորման ցանցի ավտոմատ կառուցման մոտեցում վերջավոր տարրերի մեթոդով եզրային խնդիրների լուծման համար: Այն հիմնված է ցանցի հանգույցների և տարրերի հաջորդական կոմպոզիցիայի վրա եզրային խնդիրների լուծման ընթացքում՝ կախված ցանցի հանգույցներում ստացված անհամապատասխանությունների վարքից:

**H.A. TERZIAN, H.S. SUKIASYAN, A.E. PARONIKYAN
ON CALCULATION OF MAGNETIC FIELDS BY FINITE-ELEMENT METHOD WITH DYNAMIC
COMPOSITION OF DISCRETIZATION ELEMENTS**

An approach to automatic discretization mesh construction for boundary-value problem solving by the finite-element method is proposed. It is based on consequent composition (or decomposition) of mesh nodes while solving a boundary-value problem in terms of obtained residual behavior in mesh nodes.

С.О. СИМОНЯН, Л.А. БАДАЛЯН

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕЙЛОРОВСКИЙ АНАЛОГ МЕТОДА ГРЕВИЛЛЯ ДЛЯ
НЕАВТОНОМНЫХ МАТРИЦ**

Предложен простой метод определения неавтономных псевдообратных матриц. Рассмотрен модельный пример.

Ключевые слова: дифференциально-тейлоровские преобразования, неавтономная матрица, псевдообратная матрица.

Введение. Псевдообратные матрицы используются в многочисленных теоретических и практических исследованиях, в частности, при решении задач оптимального управления [1], некорректных задач [2], матричных уравнений [3], сингулярном разложении [4] и др. Псевдообратные матрицы совместно с дифференциальными преобразованиями были успешно применены также в задачах расщепления линейных динамических систем [5], при решении линейных многоточечных краевых задач [6], функциональных матричных уравнений [7], задач математического программирования [8], линейных неавтономных конечных задач [9], при нахождении корней алгебраических многочленов с переменными коэффициентами [10] и др.

Для определения псевдообратных матриц $A_{n \times m}^+$ соответствующих автономных матриц $A_{m \times n}$ существует множество методов, в числе которых метод Гревилля [3]. Пусть a_q - q -й столбец ($q = \overline{1, n}$) матрицы A , а A_q - подматрица матрицы A , состоящая из первых q столбцов матрицы A , т.е. $A_q = a_1, \dots, a_q$, $A_n = A$, $q = \overline{1, n}$. Кроме того, допустим, что b_q , $q = \overline{1, n}$ - последняя строка матрицы A_q^+ , $q = \overline{1, n}$. Тогда в соответствии с этим методом для построения псевдообратной матрицы $A_{n \times m}^+$ выполняется следующая последовательность вычислительных операций:

Шаг 1. Определяется вектор-строка с размерами $1 \times m$ при $q = 1$:

$$A_1^+ = a_1^+ = \frac{a_1^*}{a_1^* \cdot a_1}, \quad (1)$$

$\begin{matrix} 1 \times m & 1 \times m & \frac{1 \times m}{1 \times m \cdot 1 \times m} \end{matrix}$

где $*$ - знак комплексно-сопряженного вектора с размерами $1 \times m$ (при действительных матрицах A знак $*$ заменяется на знак транспонирования) при векторе a_1 с размерами $m \times 1$. При $A_1 = a_1 = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}_{m \times 1}$ принимается, что

$$A_1^+ = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}_{1 \times m}. \quad (2)$$

Шаг 2. Определяются векторы

$$d_q = A_{q-1}^+ \cdot a_q, \quad q = \overline{2, n}. \quad (3)$$

Шаг 3. Определяются векторы

$$c_q = a_q - A_{q-1} \cdot d_q, \quad q = \overline{2, n}. \quad (4)$$

Шаг 4. Если $c_q \neq \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}_{m \times 1}$, то

$$b_q = c_q^+ = \begin{pmatrix} a_q - A_{q-1} \cdot d_q \end{pmatrix}_{m \times 1}^+, \quad q = \overline{2, n};$$

если $c_q = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}_{m \times 1}$, то

$$b_q = \left(1 + d_q^* \cdot d_q \right)_{1 \times (q-1)}^{-1} \cdot d_q^* \cdot A_{q-1}^+, \quad q = \overline{2, n}. \quad (5)$$

Шаг 5. Определяются матрицы

$$B_q = A_{q-1}^+ - d_q \cdot b_q, \quad q = \overline{2, n}. \quad (6)$$

Шаг 6. Определяются матрицы

$$A_{q \times m}^+ = \begin{pmatrix} B_q \\ \text{---} \\ b_q \end{pmatrix}_{(q-1) \times m}, \quad q = \overline{2, n}, \quad (7)$$

откуда при $q = n$ получается псевдообратная матрица

$$A_n^+ = A^+ = A^+. \quad (8)$$

Теперь допустим, что $A = A(t)$, иными словами, имеем неавтономную матрицу. При этом метод Гревилля содержит следующую, аналогичную (1)-(8), последовательность вычислительных операций:

Шаг 1. Определяется вектор-строка с размерами $1 \times m$:

$$A_1^+(t) = a_1^+(t) = \frac{a_1^*(t)}{a_1^*(t) \cdot a_1(t)}. \quad (9)$$

Шаг 2. Определяются векторы:

$$d_q(t) = A_{q-1}^+(t) \cdot a_q(t), \quad q = \overline{2, n}. \quad (10)$$

Шаг 3. Определяются векторы:

$$c_q(t) = a_q(t) - A_{q-1}(t) \cdot d_q(t), \quad q = \overline{2, n}. \quad (11)$$

Шаг 4. Если $c_q(t) \neq 0$, то

$$b_q(t) = c_q^+(t) = (a_q(t) - A_{q-1}(t) \cdot d_q(t))^+, \quad q = \overline{2, n}; \quad (12)$$

если $c_q(t) = 0$, то

$$b_q(t) = (1 + d_q^*(t) \cdot d_q(t))^{-1} \cdot d_q^*(t) \cdot A_{q-1}^+(t), \quad q = \overline{2, n}. \quad (13)$$

Шаг 5. Определяются матрицы:

$$B_q(t) = A_{q-1}^+(t) - d_q(t) \cdot b_q(t), \quad q = \overline{2, n}. \quad (14)$$

Шаг 6. Определяются матрицы:

$$A_{q \times m}^+ = \begin{pmatrix} B_q(t) \\ \dots \\ b_q(t) \end{pmatrix}, \quad q = \overline{2, n}, \quad (15)$$

откуда при $q = n$ получается псевдообратная матрица

$$A_n^+(t) = A^+(t). \quad (16)$$

Выполнение операций (9)-(16), естественно, имеет смысл при матрицах $A(t)$ с малыми размерами. При сравнительно больших размерах матриц $A(t)$, очевидно, использование этих соотношений становится практически невозможным из-за громоздкости используемых соотношений. Поэтому, вероятно, единственным, существующим в настоящее время подходом для определения $A^+(t)$ является метод замороженных коэффициентов [4], при котором рассматривается некоторое множество изолированных точек времени t_k на некотором временном интервале $[t_0, T]$, в которых определяются соответствующие числовые матрицы $A^+(t_k)$, а затем и неавтономная матрица $A^+(t)$ с применением некоторого метода теории аппроксимации.

Однако при этом, при кажущейся простоте реализации последнего этапа вычислений, на практике сталкиваются с необходимостью решения так называемой проблемы ветвления [4]. Это обстоятельство фактически сводит решение задачи к использованию метода полного перебора всевозможных вариантов, что обычно требует много машинного времени и вычислительных усилий.

Для решения рассматриваемой задачи в настоящей работе предлагается эффективный, обладающий простотой реализации, вычислительный метод, основанный на дифференциально-тейлоровских (ДТ-) преобразованиях [11]:

$$X(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{\partial^K x(t)}{\partial t^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad ; \quad x(t) = \sum_{K=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_v}{H} \right)^K \cdot X(K), \quad (17)$$

где $X(K)$ - изображение (дискрета) оригинала $x(t)$ - функция целочисленного аргумента $K = \overline{0, \infty}$; H - некоторая постоянная; t_v - центр аппроксимации. При $t_v = 0$ ДТ-преобразования вырождаются в дифференциально-маклореновские (ДМ-) преобразования. В соответствии с [11] здесь могут быть использованы и другие дифференциальные преобразования, так как все они отличаются друг от друга лишь только операцией восстановления оригиналов $x(t)$.

Математический аппарат. Допустим, что все элементы матрицы $A(t)$ обладают непрерывными частными производными бесконечного порядка по переменной t в центре аппроксимации t_v . Представим дифференциальные преобразования соотношений (9)-(16) в соответствии с (17). Имеем:

Шаг 1. Вычислить

$$A_1^+(K) = a_1^+(K) = \frac{a_1^*(K) - \sum_{l_1=1}^K a_1^+(K-l_1) \cdot \sum_{l_2=0}^{l_1} a_1^*(l_1-l_2) \cdot a_1(l_2)}{a_1^*(0) \cdot a_1(0)}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad (18)$$

(естественно, при $a_1(0) = a_1^*(0) = 0$ необходимо принять $A_1^+(0) = a_1^+(0) = (0)$).

Шаг 2. Вычислить

$$d_q(K) = \sum_{l=0}^K A_{q-1}^+(K-l) \cdot a_q(l), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}. \quad (19)$$

Шаг 3. Вычислить

$$c_q(K) = a_q(K) - \sum_{l=0}^K A_{q-1}(K-l) \cdot d_q(l), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}. \quad (20)$$

Шаг 4. Если $c_q(K) \neq 0$, то вычислить

$$b_q(K) = c_q^+(K) = \left(a_q(K) - \sum_{l=0}^K A_{q-1}(K-l) \cdot d_q(l) \right)^+, \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}; \quad (21)$$

если $c_q(K) = 0$, то вычислить

$$b_q(K) = \sum_{l_1=0}^K G_q(K-l_1) \sum_{l_2=0}^{l_1} d_q^*(l_1-l_2) \cdot A_{q-1}^+(l_2), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}, \quad (22)$$

причем

$$G_q(K) = \frac{\mathcal{B}(K) - \sum_{l=1}^K G_q(K-l) \cdot F(l)}{F(0)}, \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}, \quad (23)$$

$$F_q(K) = \mathcal{B}(K) + \sum_{l=0}^K d_q^*(K-l) \cdot d_q(l), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}, \quad (24)$$

где тейлоровская единица

$$\mathcal{B}(K) = \begin{cases} 1, & \text{если } K = 0, \\ 0, & \text{если } K = \overline{1, \infty}. \end{cases} \quad (25)$$

Шаг 5. Вычислить

$$B_q(K) = A_{q-1}^+(K) - \sum_{l=0}^K d_q(K-l) \cdot b_q(l), \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}. \quad (26)$$

Шаг 6. Вычислить

$$A_q^+(K) = \begin{pmatrix} B_q(K) \\ \dots \\ b_q(K) \end{pmatrix}, \quad K = \overline{0, \infty}, \quad q = \overline{2, n}. \quad (27)$$

Таким образом, используя соотношения (18)-(27), можно вычислить матричные дискреты $A_n^+(0), A_n^+(1), \dots, A_n^+(K)$, а затем и псевдообратную матрицу $A^+(t)$ в соответствии с обратными дифференциальными преобразованиями.

Пример. Пусть задана матрица

$$A(t) = \begin{bmatrix} (-t^3 + 9 \cdot t^2)(t^3 - 9) & \\ 0 & (t^2 - 4) \\ 0 & (t^2 - 4) \end{bmatrix},$$

для которой $m=3 > n=2$. Следовательно, аналитическое решение псевдообратной матрицы будет иметь вид [3]

$$A^+(t) = [A^T(t) \cdot A(t)]^{-1} \cdot A^T(t).$$

Не вдаваясь в подробности, представим промежуточные результаты:

$$A^T(t) \cdot A(t) = \begin{bmatrix} t^4 \cdot (t-9)^2 & -t^2 \cdot (t-9) \cdot (t^3-9) \\ -t^2 \cdot (t-9) \cdot (t^3-9) & (t^3-9)^2 + 2 \cdot (t^2-4)^2 \end{bmatrix},$$

$$[A^T(t) \cdot A(t)]^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (t^3-9)^2 + 2 \cdot (t^2-4)^2 & t^2 \cdot (t-9) \cdot (t^3-9) \\ t^2 \cdot (t-9) \cdot (t^3-9) & t^4 \cdot (t-9)^2 \end{bmatrix},$$

где

$$\Delta = 2 \cdot t^4 \cdot (t^2-4)^2 \cdot (t-9)^2,$$

или

$$[A^T(t) \cdot A(t)]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{(t^3-9)^2 + 2 \cdot (t^2-4)^2}{2 \cdot t^4 \cdot (t^2-4)^2 \cdot (t-9)^2} & \frac{t^3-9}{2 \cdot t^2 \cdot (t^2-4)^2 \cdot (t-9)} \\ \frac{t^3-9}{2 \cdot t^2 \cdot (t^2-4)^2 \cdot (t-9)} & \frac{1}{2 \cdot (t^2-4)^2} \end{bmatrix}.$$

Окончательно имеем

$$A^+(t) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{t^2 \cdot (t-9)} \frac{t^3-9}{2 \cdot t^2 \cdot (t^2-4) \cdot (t-9)} \frac{t^3-9}{2 \cdot t^2 \cdot (t^2-4) \cdot (t-9)} \\ 0 & \frac{1}{2 \cdot (t^2-4)} & \frac{1}{2 \cdot (t^2-4)} \end{bmatrix}.$$

Очевидно, линии $t = -2, t = 0, t = 2, t = 9$ являются вертикальными асимптотами, полученными из уравнения $\Delta = 0$. С учетом этих асимптот динамика изменения элементов $a_{ij}^{(+)}(t)$, $i = \overline{1,2}, j = \overline{1,3}$ псевдообратной матрицы $A^+(t)$ представлена на рис.1-3 (сплошные линии; заметим, что элемент $a_{21}^{(+)}(t) = 0$, ввиду чего соответствующий рисунок ниже не представлен). Там же представлены временные характеристики при применении ДТ-аналога метода Гревилля (точечные линии). Очевидно хорошее совпадение кривых в преобладающем большинстве случаев. К сожалению, ошибки увеличиваются в близких к асимптотам точках, а также при $t \rightarrow \pm\infty$, что и следовало ожидать. В табл.1-5 представлены сравнительные численные оценки на подынтервалах времени $(-\infty, -2)$, $(-2, 0)$, $(0, 2)$, $(2, 9)$ и $(9, +\infty)$.

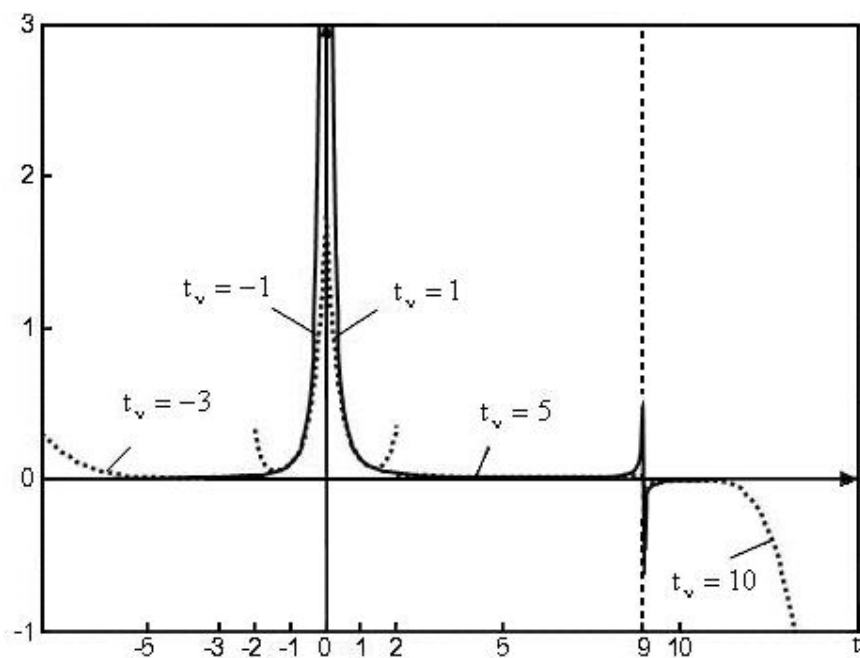


Рис.1. Динамика изменения элемента $a_{11}^{(+)}(t)$

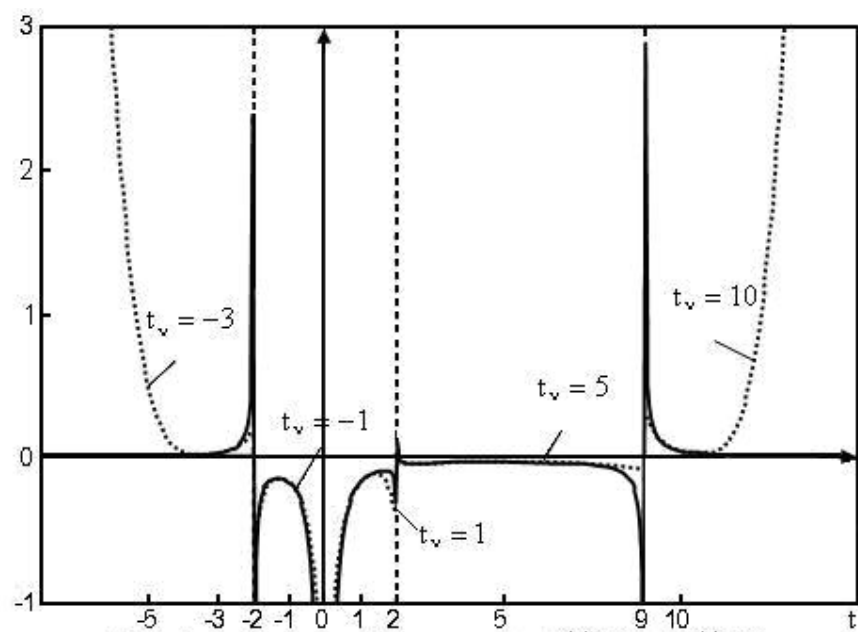


Рис.2. Динамика изменения элементов $a_{12}^{(+)}(t) \equiv a_{13}^{(+)}(t)$

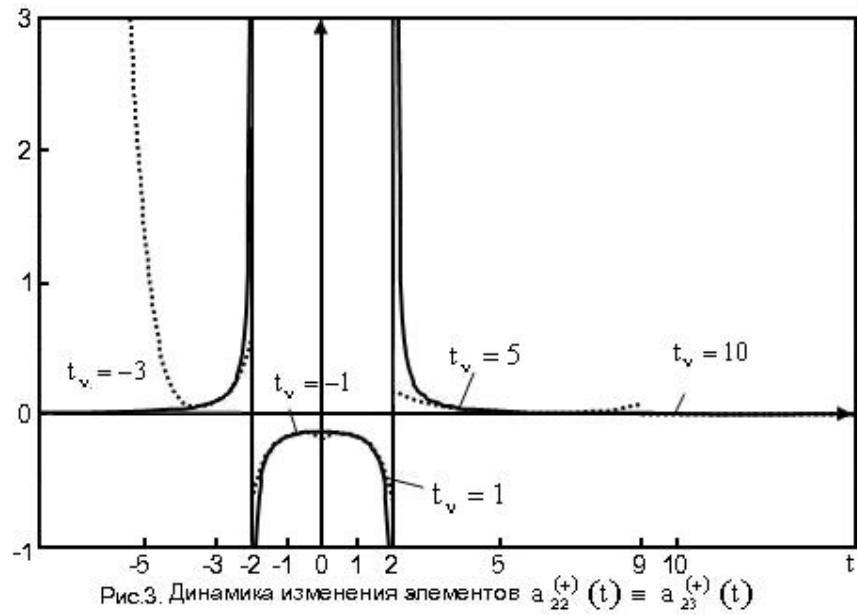


Таблица 1

Сравнительные оценки при $t \in (-\infty, -2)$, $t_v = -3$

t_k	$A_{\text{аналит.}}^{+}(t_k)$			$A_{\Delta\Pi}^{+}(t_k)$		
-4,5	0,0037	0,0113	0,0113	0,0050	0,1564	0,1564
	-0,0000	0,0308	0,0308	0	0,4104	0,4104
-4	0,0048	0,0146	0,0146	0,0050	0,0385	0,0385
	0	0,0417	0,0417	0	0,1042	0,1042
-3,5	0,0065	0,0205	0,0205	0,0065	0,0215	0,0215
	0	0,0606	0,0606	0	0,0632	0,0632
-3	0,0093	0,0333	0,0333	0,0093	0,0333	0,0333
	0	0,1000	0,1000	0	0,1000	0,1000
-2,5	0,0139	0,0761	0,0761	0,0139	0,0731	0,0731
	0	0,2222	0,2222	0	0,2144	0,2144
-2	0,0198	0	0	0,0223	0,2113	0,2113
	-0,0076	0	0	0	0,5938	0,5938

Таблица 2

Сравнительные оценки при $t \in (-2, 0)$, $t_v = -1$

t_k	$A_{\text{аналит.}}^+(t_k)$			$A_{\Delta\Pi}^+(t_k)$		
-2	0,0198	0	0	0,3221	-0,6090	-0,6090
	-0,0076	0	0	0	-0,6564	-0,6564
-1,6	0,0369	-0,1676	-0,1676	0,0666	-0,1917	-0,1917
	0	-0,3472	-0,3472	0	-0,3229	-0,3229
-1,2	0,0681	-0,1427	-0,1427	0,0683	-0,1428	-0,1428
	0	-0,1953	-0,1953	0	-0,1953	-0,1953
-0,8	0,1594	-0,2257	-0,2257	0,1592	-0,2254	-0,2254
	0	-0,1488	-0,1488	0	-0,1488	-0,1488
-0,4	0,6649	-0,7847	-0,7847	0,5053	-0,6075	-0,6075
	0	-0,1302	-0,1302	0	-0,1363	-0,1363
0	0	0	0	1,6063	-1,8625	-1,8625
	-0,0796	-0,0354	-0,0354	0	-0,1872	-0,1872

Таблица 3

Сравнительные оценки при $t \in (0, 2)$, $t_v = 1$

t_k	$A_{\text{аналит.}}^+(t_k)$			$A_{\Delta\Pi}^+(t_k)$		
0	0	0	0	1,7298	-1,9794	-1,9794
	-0,0796	-0,0354	-0,0354	0	-0,1872	-0,1872
0,4	0,7267	-0,8456	-0,8456	0,5623	-0,6609	-0,6609
	0	-0,1302	-0,1302	0	-0,1363	-0,1363
0,8	0,1905	-0,2407	-0,2407	0,1903	-0,2404	-0,2404
	0	-0,1488	-0,1488	0	-0,1488	-0,1488
1,2	0,0890	-0,1265	-0,1265	0,0892	-0,1266	-0,1266
	0	-0,1953	-0,1953	0	-0,1953	-0,1953
1,6	0,0528	-0,0899	-0,0899	0,0838	-0,1239	-0,1239
	0	-0,3472	-0,3472	0	-0,3229	-0,3229
2	0,0357	0	0	0,3474	-0,4316	-0,4316
	-0,0013	0		0	-0,6564	-0,6564
0						

Таблица 4

Сравнительные оценки при $t \in (2,9)$, $t_v = 5$

t_k	$A_{\text{аналит.}}^+(t_k)$			$A_{\Delta\Pi}^+(t_k)$		
2	0,0357	0	0	0,0292	-0,0450	-0,0450
	-0,0013	0	0	0	0,1775	0,1775
3	0,0185	-0,0333	-0,0333	0,0180	-0,0336	-0,0336
	0	0,1000	0,1000	0	0,0836	0,0836
4	0,0125	-0,0286	-0,0286	0,0125	-0,0287	-0,0287
	0	0,0417	0,0417	0	0,0414	0,0414
6	0,0093	-0,0299	-0,0299	0,0093	-0,0299	-0,0299
	0	0,0156	0,0156	0	0,0158	0,0158
7	0,0102	-0,0379	-0,0379	0,0102	-0,0371	-0,0371
	0	0,0111	0,0111	0	0,0144	0,0144
8	0,0156	-0,0655	-0,0655	0,0140	-0,0526	-0,0526
	0	0,0083	0,0083	0	0,0290	0,0290
9	0	0	0	0,0231	-0,0821	-0,0821
	0,0014	0,0001	0,0001	0	0,0811	0,0811

Таблица 5

Сравнительные оценки при $t \in (9,+\infty)$, $t_v = 10$

t_k	$A_{\text{аналит.}}^+(t_k)$			$A_{\Delta\Pi}^+(t_k)$		
9	0	0	0	-0,0590	0,2818	0,2818
	0,0014	0,0001	0,0001	0	0,0065	0,0065
9,5	-0,0222	0,1090	0,1090	-0,0214	0,1054	0,1054
	0	0,0058	0,0058	0	0,0058	0,0058
10	-0,0100	0,0516	0,0516	-0,0100	0,0516	0,0516
	0	0,0052	0,0052	0	0,0052	0,0052
10,5	-0,0060	0,0327	0,0327	-0,0063	0,0339	0,0339
	0	0,0047	0,0047	0	0,0047	0,0047
11	-0,0041	0,0233	0,0233	-0,0103	0,0522	0,0522
	0	0,0043	0,0043	0	0,0043	0,0043

Наконец, представим результаты фрагмента вычислений методом Гревилля для подынтервала $(0,2)$ при центре аппроксимации $t_v = 1$, $H = 1$ и количестве дискрет $K = \overline{0,4}$. Имеем

$$K = 0, \quad A(0) = \left[\begin{array}{cc} -t^3 + 9 \cdot t^2 & t^3 - 9 \\ 0 & t^2 - 4 \\ 0 & t^2 - 4 \end{array} \right]_{|_{t_v=1}} = \left[\begin{array}{cc} 8 & -8 \\ 0 & -3 \\ 0 & -3 \end{array} \right];$$

$$K = 1, \quad A(1) = \frac{1}{1!} \cdot \left[\begin{array}{cc} -3 \cdot t^2 + 18 \cdot t & 3 \cdot t^2 \\ 0 & 2 \cdot t \\ 0 & 2 \cdot t \end{array} \right]_{|_{t_v=1}} = \left[\begin{array}{cc} 15 & 3 \\ 0 & 2 \\ 0 & 2 \end{array} \right];$$

$$K = 2, \quad A(2) = \frac{1}{2!} \cdot \left[\begin{array}{cc} -6 \cdot t + 18 & 6 \cdot t \\ 0 & 2 \\ 0 & 2 \end{array} \right]_{|_{t_v=1}} = \left[\begin{array}{cc} 6 & 3 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{array} \right];$$

$$K = 3, \quad A(3) = \frac{1}{3!} \cdot \left[\begin{array}{cc} -6 & 6 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right]_{|_{t_v=1}} = \left[\begin{array}{cc} -1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right];$$

$$K = 4, \quad A(4) = \frac{1}{4!} \cdot \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right]_{|_{t_v=1}}.$$

Далее получим:

Шаг 1.

$$K = 0, \quad A_1^+(0) = a_1^+(0) = (0,125000 \ 0 \ 0);$$

$$K = 1, \quad A_1^+(1) = a_1^+(1) = (-0,234375 \ 0 \ 0);$$

$$K = 2, \quad A_1^+(2) = a_1^+(2) = (0,345703 \ 0 \ 0);$$

$$K = 3, \quad A_1^+(3) = a_1^+(3) = (-0,456787 \ 0 \ 0);$$

$$K = 4, \quad A_1^+(4) = a_1^+(4) = (0,567902 \ 0 \ 0).$$

Шар 2.

$$K = 0, \quad d_2(0) = -1,000000;$$

$$K = 1, \quad d_2(1) = 2,250000;$$

$$K = 2, \quad d_2(2) = -3,93750;$$

$$K = 3, \quad d_2(3) = 4,113280;$$

$$K = 4, \quad d_2(4) = -5,110840.$$

Шар 3.

$$K = 0, \quad c_2(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ -3 \\ -3 \end{pmatrix}; \quad K = 1, \quad c_2(1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix};$$

$$K = 2, \quad c_2(2) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad K = 3, \quad c_2(3) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$K = 4, \quad c_2(4) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Шар 4.

$$K = 0, \quad b_2(0) = (0 \quad -0,66667 \quad -0,166667);$$

$$K = 1, \quad b_2(1) = (0 \quad -0,111111 \quad -0,111111);$$

$$K = 2, \quad b_2(2) = (0 \quad -0,129630 \quad -0,129630);$$

$$K = 3, \quad b_2(3) = (0 \quad -0,123457 \quad -0,123457);$$

$$K = 4, \quad b_2(4) = (0 \quad -0,125514 \quad -0,125514).$$

Шар 5.

$$K = 0, \quad B_2(0) = (0,125000 \quad -0,166667 \quad -0,166667);$$

$$K = 1, \quad B_2(1) = (-0,234375 \quad 0,263889 \quad 0,263889);$$

$$K = 2, \quad B_2(2) = (0,345703 \quad -0,395255 \quad -0,395255);$$

$$K = 3, \quad B_2(3) = (-0,456787 \quad 0,510007 \quad 0,510007);$$

$$K = 4, \quad B_2(4) = (0,567902 \quad -0,643554 \quad -0,643554).$$

Шаг 6.

$$\begin{aligned}
 K = 0, \quad A_2^+(0) &= \begin{bmatrix} 0,125000 & -0,166667 & -0,166667 \\ 0 & -0,166667 & -0,166667 \end{bmatrix}; \\
 K = 1, \quad A_2^+(1) &= \begin{bmatrix} -0,234375 & 0,263889 & 0,263889 \\ 0 & -0,111111 & -0,111111 \end{bmatrix}; \\
 K = 2, \quad A_2^+(2) &= \begin{bmatrix} 0,345703 & -0,395255 & -0,395255 \\ 0 & -0,123457 & -0,123457 \end{bmatrix}; \\
 K = 3, \quad A_2^+(3) &= \begin{bmatrix} -0,456787 & 0,510007 & 0,510007 \\ 0 & -0,123457 & -0,123457 \end{bmatrix}; \\
 K = 4, \quad A_2^+(4) &= \begin{bmatrix} 0,567902 & -0,643554 & -0,643554 \\ 0 & -0,125514 & -0,125514 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Окончательно имеем

$$a_{11}^{(+)}(t) = 0,125000 - 0,234375(t-1) + 0,345703(t-1)^2 - 0,456787(t-1)^3 + 0,567901(t-1)^4,$$

$$a_{12}^{(+)}(t) \equiv a_{13}^{(+)}(t) = -0,166666 + 0,263888(t-1) - 0,395254(t-1)^2 + 0,510006(t-1)^3 - 0,643553(t-1)^4,$$

$$a_{21}^{(+)}(t) = 0,$$

$$a_{22}^{(+)}(t) \equiv a_{23}^{(+)}(t) = -0,166666 - 0,111111(t-1) - 0,129629(t-1)^2 - 0,23456(t-1)^3 - 0,125514(t-1)^4.$$

Нетрудно убедиться также, что точно к таким же результатам приходим при разложении элементов $a_{ij}^{(+)}(t)$, $i = \overline{1,2}$, $j = \overline{1,3}$ матрицы $A^{(+)}(t)$, полученной аналитическим путем, в соответствующие ряды Тейлора вокруг точки $t_v = 1$, что явно подтверждает простоту и эффективность предложенного ДТ-аналога.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брайсон А., Хо Ю-Ши.** Прикладная теория оптимального управления.-М.: Мир, 1972.-544 с.
2. **Беклемишев Д.В.** Дополнительные главы линейной алгебры.-М.: Наука, 1983.- 336с.
3. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц.-М.: Наука, 1967.-575 с.
4. **Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р.** Математическая теория конструирования систем управления.-М.: Высшая школа, 1998.-574 с.
5. **Симонян С. О.** К упрощению вычислительных процедур расщепления линейных динамических систем на основе дифференциально-тейлоровских преобразований //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2000.-Т.53, N3.-С. 189-193.
6. **Симонян С. О., Аветисян А. Г.** Прямой метод решения линейных многоточечных краевых задач //Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. -2002. -Т.55, N1- С. 95-103.
7. **Симонян С. О., Аветисян А. Г., Варданян Г. А.** К решению функциональных матричных уравнений операторным методом дифференциальных преобразований //Моделирование, оптимизация, управление: Сб. научн. тр. ГИУА.-2003.-Вып. 6, N2. - С.8 -15.
8. **Симонян С.О., Аветисян А.Г., Кюрегян А.Л.** Дифференциально-падеевская локальная модель непрерывных задач математического программирования // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2001.-Т.54, N1.- С. 95-103.
9. **Simonyan S. O., Avetisyan A. G.** The Method of Linear Non-Autonomus Finite Equation Set Solution on the Basis of Differential Taylor Transforms //Engineering Simulation. – 1998. - Vol. 15.- P. 407-421.
10. **Симонян С.О., Аветисян А.Г., Меликян А.В.** Дифференциально-тейлоровский аналог метода Жирара-Виета // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2004.-Т.57, N3. - С. 480-494.
11. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные спектры и модели.-Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.01.2005.

Ս. Շ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Լ.Ա. ԲԱԴԱԼՅԱՆ

**ԳՐԵՎԻԼԼԻ ՄԵԹՈԴԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ-ԹԵՅԼՈՐՅԱՆ ՆՄԱՆԱԿԵՐՊԸ ՈՉ ԱՎՏՈՆՈՍ
ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ**

Առաջարկված է ոչ ավտոնոմ կեղծ հակադարձ մատրիցների որոշման պարզ եղանակ: Դիտարկված է մոդելային օրինակ:

S.H. SIMONYAN, L.A. BADALYAN

**DIFFERENTIAL-TAYLOR ANALOGUE OF GREVILL METHOD FOR
NONAUTONOMOUS MATRICES**

A simple method for the determination of non-autonomous pseudoinverse matrices is suggested. A model example is considered.

К.А. СОГОМОНЯН, К.А. ТУМАНЯН, ДЖ.Н. ДАЛЛАКЯН,
Н.Л. КАЗАРЯН

ПРОЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ m – ПОВЕРХНОСТЕЙ МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВ

Доказывается взаимосвязь между размерностью и порядком алгебраической гладкой m -поверхности пространства R^n . Предлагается конструктивный алгоритм формообразования гладких m -поверхностей, который включает в себя простейшие линейные операции проецирования, сечения и точечных проективных преобразований пространств.

Ключевые слова: гладкая поверхность, проективное преобразование, проецирование, сечение, собственное пространство, размерность, порядок.

Алгебраическая m -поверхность X с геометрической точки зрения представляет собой непрерывное множество точек размерности m ($\dim X = m$), расположенное в некотором пространстве R^n ($n > m$). Она является нелинейной геометрической формой и характеризуется своим порядком, который с геометрической точки зрения определяется наибольшим числом точек пересечения ее с произвольной $(n-m)$ -плоскостью пространства R^n . Т.е., если предположить, что порядок поверхности X равен k ($\deg X = k$), то это означает, что в R^n эта поверхность с произвольной $(n-m)$ -плоскостью пересекается не более, чем в k точках.

Если поверхность X рассматривается в R^n и $\dim X = m$; $\deg X = k$, то эту форму обозначим: $X_{m,k}$.

Рассмотрим самый общий случай поверхности $X_{m,k}$. Для этой формы, очевидно, существует пространство минимальной размерности ($R^{n_{\min}}$), которое вмещает все точки поверхности. Это пространство назовем собственным пространством данной поверхности. Для определения размерности ($n_{\min}$) этого пространства используем тот факт, что группа k точек пересечения $(n_{\min}-m)$ -плоскости с $X_{m,k}$ однозначно определяет эту плоскость, т.е. образует ее симплекс. С другой стороны, известно, что симплексом e -плоскости является совокупность $(e+1)$ независимых точек, следовательно, имеем: $n_{\min}-m+1=k$ и $n_{\min}=m+k-1$.

Итак, размерность собственного пространства поверхности $X_{m,k}$ равна $m+k-1$.

Примеры.

1. Для $X_{1,2}$ собственным пространством является R^2 , т.е. кривая второго порядка со всеми своими точками полностью вмещается в одной 2-плоскости (R^2).

2. Для $X_{2,2}$ собственным является R^3 , т.е. 2-поверхность второго порядка со всеми своими точками полностью вмещается в одной 3-плоскости (в одном трехмерном пространстве).

3. Для $X_{2,3}$ собственным является P^4 , т.е. 2-поверхность третьего порядка в общем случае вмещается в одной 4-плоскости (в четырехмерном пространстве). Это не означает, что не существуют 2-поверхности третьего порядка, которые вмещаются в трехмерном пространстве. Такие $X_{2,3}$ существуют, но они являются частными видами этой формы.

Предложение. Любая поверхность общего вида (вмещающаяся только в своем собственном пространстве) $X^{m+k-1}_{m,k}$ является гладкой формой.

Для доказательства, во-первых, покажем, что любая прямая с поверхностью $X^{m+k-1}_{m,k}$ не может иметь более двух точек пересечения.

Предположим обратное. Пусть некоторая прямая l пересекает эту форму в трех точках. Через эту прямую проведем некоторую $(n_{\min}-m)$ -плоскость (т.е. $(k-1)$ -плоскость). Для ее однозначного задания, кроме этой прямой (она равносильна заданию двух точек), необходимо задать еще совокупность $(k-2)$ независимых точек. Пусть эти точки принадлежат поверхности $X^{m+k-1}_{m,k}$ (очевидно, что они существуют). Тогда получается, что $(k-1)$ -плоскость с $X^{m+k-1}_{m,k}$ будет иметь $k-2+3=k+1$ общих точек, что невозможно, так как мы рассматриваем поверхность порядка k . Итак, любая прямая с поверхностью $X^{m+k-1}_{m,k}$ не имеет более двух точек пересечения. Отсюда следует, что $X^{m+k-1}_{m,k}$ не может иметь особых (кратных) точек, так как в противном случае прямая, проходящая через такие точки, с поверхностью будет иметь более двух точек пересечения, что противоречит доказанному.

Рассмотрим алгоритм образования гладких поверхностей с использованием точечных проективных преобразований пространства P^e .

Пусть в P^e задано проективное преобразование: $\psi : P^e \rightarrow P^e$. В самом общем случае это преобразование оставляет неподвижными $(e+1)$ точек. Соответственные пары точек этого преобразования рассмотрим как пары проекций линейных элементов (L) пространства P^n ($n > e$).

Предположим, что центры проецирования S_1 и S_2 (линейные элементы) принадлежат пространству P^n (рис.). Множество элементов $\{L_i\}(P^n)$, соответствующих всевозможным парам точек $\{L^1_i, L^2_i\}$, где $L^2_i = \psi(L^1_i)$, образует некоторую гладкую поверхность X в пространстве $P^n(X = \{L_i\})$.

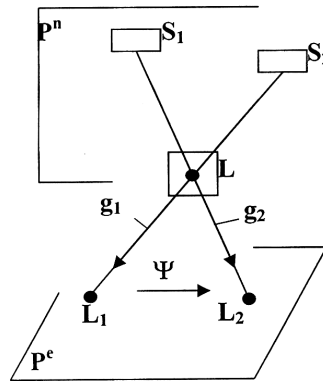


Рис.

Имея в виду, что проецирующие элементы g_1 и g_2 должны пересекать пространство P^e по точкам (L_1 и L_2), размерности этих элементов будут

$$\dim g_1 = \dim g_2 = n - e.$$

Размерность центров проецирования S_1 и S_2 будет на единицу меньше:

$$\dim S_1 = \dim S_2 = n - e - 1. \quad (1)$$

Вычислим размерность искомой поверхности $X = \{L_i\}$. Очевидно, что линейный элемент L_1 этой поверхности образуется в результате пересечения проецирующих элементов g_1 и g_2 в P^n . Следовательно,

$$\dim L = \dim(g_1(g_2)) = 2(n - e) - n = n - 2e. \quad (2)$$

Множество $\{L_i\}$ эквивалентно множеству $\{L_1 L_2\}$. Так как в P^e проективно-соответственные пары точек образуют e -мерное множество, то очевидно, что $\dim\{L_i\} = e$.

Но так как поверхность X состоит из множества $\{L_i\}$, каждый элемент которого имеет размерность $\dim L$, то имеем

$$\dim X = \dim\{L_i\} + \dim L = e + n - 2e = n - e. \quad (3)$$

Установим порядок искомой поверхности X . В P^n поверхность X пересекается с e -плоскостью G по точкам. Количество точек пересечения определяет порядок поверхности X . Соответственные пары проецирующих элементов (g_1 и g_2) пересекают e -плоскость G по парам точек, которые будут соответственными в некотором проективном преобразовании $\varphi: G \rightarrow G$. Очевидно, что неподвижные точки этого преобразования и будут точками пересечения поверхности X с e -плоскостью G . Но так как $\varphi: G \rightarrow G$ в общем случае имеет не более $(e + 1)$ неподвижных точек, значит, $\deg X = e + 1$.

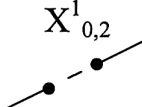
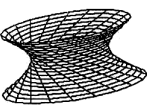
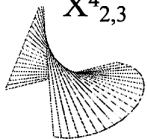
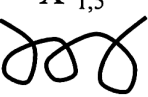
Таким образом, мы доказали следующее предложение.

На основе точечного проективного преобразования $\psi: P^e \rightarrow P^e$ в P^n образуется поверхность

$$X_{n-e, e+1}^n (\dim X = n - e, \deg X = e + 1). \quad (4)$$

В зависимости от e и n образуются различные гладкие поверхности. Некоторые результаты приведены в таблице.

Таблица

$\frac{e}{n}$	1	2	3	4	5
1	$X^1_{0,2}$ 	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
2	$X^2_{1,2}$ 	$X^2_{0,3}$ 	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$
3	$X^3_{2,2}$ 	$X^3_{1,3}$ 	$X^3_{0,4}$ 	$\emptyset$	$\emptyset$
4	$X^4_{3,2}$ 	$X^4_{2,3}$ 	$X^4_{1,4}$ 	$X^4_{0,5}$ 	$\emptyset$
5	$X^5_{4,2}$	$X^5_{3,3}$	$X^5_{2,4}$ 	$X^5_{1,5}$ 	$X^5_{0,6}$ 

Примеры.

1. Если $n = 2$, $e = 2$, получаем $X^2_{0,3}$ (нульмерная кубика в плоскости) – три точки.
2. Если $n = 2$, $e = 1$, получаем $X^2_{1,2}$ (одномерная квадрака в плоскости) – кривая второго порядка, которая получается в результате пересечения двух проективных пучков прямых 2-плоскости.
3. Если $n = 3$, $e = 1$, получаем $X^3_{2,2}$ (2-поверхность второго порядка в P^3) – линейчатая квадрака в трехмерном пространстве.
4. Если $n = 3$, $e = 2$, получаем $X^3_{1,3}$ (одномерная кубика в P^3) – пространственная кривая третьего порядка в трехмерном пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Согомонян К.А.** Линейно-конструктивные методы формообразования (геометрическое моделирование). - Ереван: Айастан, 1990.- 214 с.
2. **Хартсхорн Р.** Алгебраическая геометрия. – М.: Мир, 1981. – 600 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 16.03.2004.

**Կ.Հ. ՍՈԴՈՄՈՆՅԱՆ, Կ.Ա. ԹՈՒՄԱՆՅԱՆ,
Ջ.Ն. ԴԱԼԼԱԿՅԱՆ, Ն.Լ. ԴԱԶԱՐՅԱՆ**

**ԲԱԶՄԱՉԱՓ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ m - ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՑԹՆԵՐԻ ՁԵՎԱԿԱԶՄԱՎՈՐՄԱՆ ՊՐՈՑԵԿՏԻՎ
ԱԼԳՈՐԻԹՄԸ**

Ապացուցվում է P^n տարածության հանրահաշվական ողորկ m -մակերևույթի չափողականության և կարգի միջև եղած կապի բանաձևը: Այս բանաձևի հիման վրա առաջարկվում է ողորկ m -մակերևույթների ձևակազմավորման կոնստրուկտիվ ալգորիթմը, որն ընդգրկում է ամենապարզ և գծային գործողությունները՝ պրոյեկտում, հատում և տարածությունների կետային պրոյեկտիվ ձևափոխություններ:

**K. H. SOGOMONYAN, K. A. TUMANYAN,
G. N. DALLAKYAN, N. L. GHAZARYAN**

**A DESIGN ALGORITHM FOR FORMING MULTIDIMENSION
SPACE m -SURFACES**

Dimensionality and order relationship of algebraic smooth m -surface space P^n is demonstrated. A constructive algorithm for smooth m -surface which includes the simplest linear operation for designing, section and pointwise space rectification of projection is proposed.

О.Н. ГАСПАРЯН, Г.А. АЛЕКСАНИЯ

**АБСОЛЮТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ С НОРМАЛЬНЫМИ ПЕРЕДАТОЧНЫМИ МАТРИЦАМИ
ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ**

На основе метода характеристических передаточных функций рассмотрены многомерные геометрические аналоги известных критериев абсолютной устойчивости положения равновесия нелинейных многосвязных систем автоматического регулирования с нормальными передаточными матрицами линейной части. Показано, что для нормальных многомерных систем полученные геометрические критерии являются достаточными. Приведены численные примеры расчета на языке MATLAB.

Ключевые слова: нормальная многосвязная система, нелинейная система, характеристические передаточные функции, абсолютная устойчивость, критерий Попова.

Введение. Проблема исследования абсолютной устойчивости нелинейных многомерных систем автоматического регулирования (МСАР) относится к наиболее актуальным проблемам современной теории управления. В настоящее время в данной области можно выделить два фундаментальных направления. Первое из них базируется на классической теории устойчивости Ляпунова и представлении уравнений МСАР в пространстве состояний, а второе - частотное направление - основано на основополагающих статьях румынского ученого В.Н. Попова [1], в которых условия абсолютной устойчивости выражены в виде неравенств, связывающих частотные характеристики линейной части системы с секторными ограничениями, накладываемыми на нелинейные характеристики. В дальнейшем частотные критерии абсолютной устойчивости обычных систем регулирования были обобщены на случай МСАР [2,3]. В [4] впервые был применен метод характеристических передаточных функций (ХПФ), предложенный для анализа линейных систем известным английским ученым А.МакФарлейном и его коллегами [5,6]. В [4] получены необходимые геометрические условия абсолютной устойчивости нелинейных квадратных МСАР общего вида, выраженные непосредственно через характеристические годографы линейной части МСАР, и дано обобщение на многомерный случай таких критериев, как внеосевой круговой, параболический и т.д. [7,8]. В настоящей статье результаты работы [4] распространяются на специальный и важный класс нелинейных МСАР с нормальными (в терминологии теории матриц) передаточными матрицами линейной части. Показано, что для таких систем геометрические условия абсолютной устойчивости положения равновесия, полученные в [4], являются не только необходимыми, но и достаточными. Следует указать, что к нормальным МСАР относятся системы с симметричными, антисимметричными, циркулянтными и некоторыми другими

типами взаимосвязей, то есть подавляющее большинство описанных в технической литературе реальных многосвязных систем регулирования [9]. Так, к нормальным принадлежат многие системы гироскопических платформ, системы стабилизации спутников вращением, системы управления самонаводящихся ракет, системы активной коррекции составных зеркал астрономических телескопов и т.д.

Полученные результаты имеют простую геометрическую форму и могут служить основой для создания специализированных графических интерфейсов пользователя, предназначенных для компьютерного проектирования МСАР [10]. Данная область приобретает в последние годы большое значение в прикладной теории управления и является объектом пристального внимания многих крупнейших фирм и компаний, таких как The MathWorks Inc. (создателей известного языка для научно-технических расчетов MATLAB), The Wolfram Research Inc. (язык *Mathematica*), EASY5 Product (дочерняя фирма компании Boeing) и т.д.

В заключение приводится численный иллюстрирующий пример анализа нелинейной циркулянтной МСАР с 16 входами и 16 выходами, рассчитанный при помощи языка MATLAB.

1. Каноническое представление нормальных МСАР на базе метода ХПФ. Достаточные условия абсолютной устойчивости. На рис. 1 показана матричная структурная схема N-мерной (то есть имеющей N входов и N выходов) квадратной МСАР с передаточной матрицей линейной части $W(s)$ и диагональной матрицей нелинейностей $F(x) = \text{diag}\{F_i(x_i)\}$, где все нелинейности удовлетворяют секторным ограничениям (рис. 2):

$$0 \leq \frac{y_i}{x_i} \leq k_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

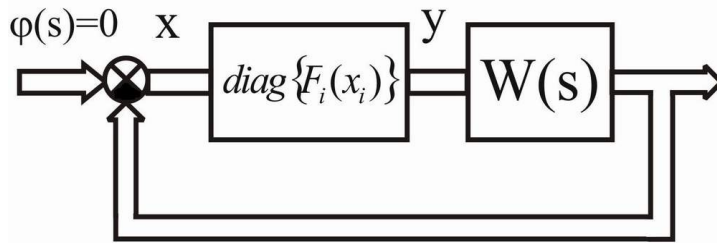


Рис. 1

Как известно [2-4,7], для абсолютной устойчивости положения равновесия $x \equiv 0$ МСАР на рис. 1 достаточно, чтобы существовала диагональная матрица $\text{diag}\{Q_i\}$ с действительными Q_i такая, что для всех частот $\omega \geq 0$ эрмитова матрица

$$\text{Re } P(j\omega) = \frac{1}{2}[P(j\omega) + P^*(j\omega)] \quad (2)$$

являлась бы положительно-определенной, где * - символ сопряжения матриц, а $P(j\omega)$ имеет вид

$$P(j\omega) = [I + j\omega \text{diag}\{Q_i\}]W(j\omega) + \text{diag}\left\{\frac{1}{k_i}\right\}. \quad (3)$$

Здесь I – единичная матрица соответствующей размерности.

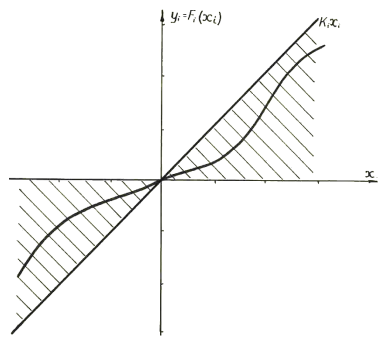


Рис. 2

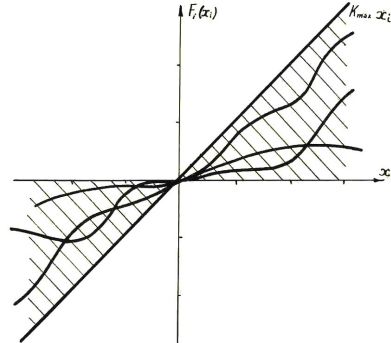


Рис. 3

В соответствии с методом ХПФ передаточная матрица $W(j\omega)$ линейной части МСАР на рис. 1 может быть представлена в следующей канонической форме:

$$W(j\omega) = C(j\omega) \text{diag}\{q_i(j\omega)\} C^{-1}(j\omega), \quad (4)$$

где $C(j\omega)$ – модальная матрица, составленная из нормированных собственных векторов (осей канонического базиса) матрицы $W(j\omega)$, строки обратной матрицы $C^{-1}(j\omega)$ образуют двойственный базис, а $q_i(j\omega)$ – ХПФ линейной части МСАР, которые для простоты примем различными.

В случае МСАР общего вида число обусловленности $\nu(C(j\omega))$ модальной матрицы $C(j\omega)$ всегда больше единицы и характеризует степень неортогональности осей канонического базиса МСАР.

Введем, как и в [4], единый сектор $[0, k_{\max}]$, где $k_{\max} = \max(k_i)$, охватывающий все нелинейные характеристики $F_i(x_i)$ (рис. 3), и заменим в (3) диагональную матрицу $\text{diag}\{Q_i\}$ скалярной QI . Тогда, с учетом (4), матрица (3) приводится к диагональному виду в каноническом базисе линейной части МСАР:

$$P(j\omega) = C(j\omega) \text{diag}\{\gamma_i(j\omega)\} C^{-1}(j\omega), \quad (5)$$

где комплексные собственные значения $\gamma_i(j\omega)$ матрицы $P(j\omega)$ равны

$$\gamma_i(j\omega) = (1 + j\omega Q)q_i(j\omega) + \frac{1}{k_{\max}}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

В [4] показано, что для выполнения условий положительной определенности эрмитовой матрицы $\text{Re} P(j\omega)$ (2) в общем случае необходимо (но недостаточно), чтобы вещественные части собственных значений $\gamma_i(j\omega)$ (6) были положительными при всех частотах $\omega \geq 0$. Дана геометрическая трактовка условий $\text{Re}(\gamma_i(j\omega)) > 0$ на комплексной плоскости модифицированных характеристических годографов линейной части МСАР. Данная трактовка, аналогичная применяемой в классической теории одномерных систем регулирования, позволяет геометрически осуществить выбор “оптимального” значения неизвестного параметра Q в (3) и (6), после чего можно проверить условия положительной определенности эрмитовой матрицы $\text{Re} P(j\omega)$ (1) для всех $\omega \geq 0$ известными алгебраическими методами (в последние годы эта задача легко решается с помощью современных средств вычислительной техники и стандартных пакетов, входящих, например, в MATLAB).

Рассмотрим теперь МСАР с нормальными передаточными матрицами линейной части. Согласно определению [6], МСАР называется нормальной, если передаточная матрица линейной части системы является нормальной, то есть коммутирует со своей сопряженной:

$$W(j\omega)W^*(j\omega) = W^*(j\omega)W(j\omega).$$

Главная геометрическая особенность нормальных матриц заключается в ортогональности осей их канонического базиса и в совпадении двойственного базиса с каноническим. При этом модальная матрица $C(j\omega)$ является унитарной и удовлетворяет соотношению

$$C^{-1}(j\omega) = C^*(j\omega), \quad (7)$$

а ее число обусловленности $\nu(C(j\omega))$ тождественно равно единице.

Подстановка канонического представления (4), с учетом (7), в (3) дает

$$P(j\omega) = C(j\omega)\text{diag}\{\gamma_i(j\omega)\}C^*(j\omega), \quad (8)$$

то есть матрица $P(j\omega)$ в (2) также относится к нормальным матрицам и, как следствие, коммутирует со своей сопряженной.

Наконец, подставив (8) в (1), получим

$$\begin{aligned} \text{Re} P(j\omega) &= \frac{1}{2}[C(j\omega)\text{diag}\{\gamma_i(j\omega)\}C^*(j\omega) + (C(j\omega)\text{diag}\{\gamma_i(j\omega)\}C^*(j\omega))^*] = \\ &= C(j\omega)\text{diag}\{\text{Re}(\gamma_i(j\omega))\}C^*(j\omega), \end{aligned} \quad (9)$$

откуда видно, что эрмитова матрица $\text{Re} P(j\omega)$ (2) приводится к диагональному виду в том же ортогональном каноническом базисе, что и матрицы $W(j\omega)$ и $P(j\omega)$, а ее вещественные собственные значения $\mu_i(\omega)$ тождественно равны действительным частям соответствующих собственных значений $\gamma_i(j\omega)$ самой матрицы $P(j\omega)$ (8). Следовательно, необходимые и достаточные условия положительной определенности матрицы $\text{Re} P(j\omega)$, заключающиеся в

положительности всех ее собственных значений $\mu_i(\omega)$ при $\omega \geq 0$, для случая МСАР с нормальной линейной частью принимают, с учетом (6), (8), (9), вид

$$\operatorname{Re} \left\{ (1 + j\omega Q) q_i(j\omega) + \frac{1}{k_{\max}} \right\} > 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

и выражаются непосредственно через характеристические годографы $q_i(j\omega)$ линейной части МСАР. Отсюда приходим к исключительно важному выводу, что для абсолютной устойчивости положения равновесия МСАР с нормальной передаточной матрицей линейной части достаточно, чтобы существовал такой вещественный скаляр Q , при котором для всех $\omega \geq 0$ выполнялись бы неравенства (10).

Если характеристики нелинейностей $F_i(x_i)$ лежат в секторе $[r_{\min}, k_{\max}]$, то для абсолютной устойчивости нормальной МСАР достаточно, чтобы при некотором вещественном Q удовлетворялись условия:

$$\operatorname{Re} \left\{ (1 + j\omega Q) \frac{q_i(j\omega)}{1 + r_{\min} q_i(j\omega)} + \frac{1}{k_{\max} - r_{\min}} \right\} > 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

или, при наличии нестационарных нелинейностей, а также нелинейностей как с активным, так и пассивным гистерезисом, условия

$$\operatorname{Re} \{ [1 + k_{\max} q_i(j\omega)] [1 + r_{\min} q_i^*(j\omega)] \} > 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (12)$$

Условия (11), (12) нетрудно получить, используя известное эквивалентное структурное преобразование исходной МСАР, показанное на рис. 4 [4].

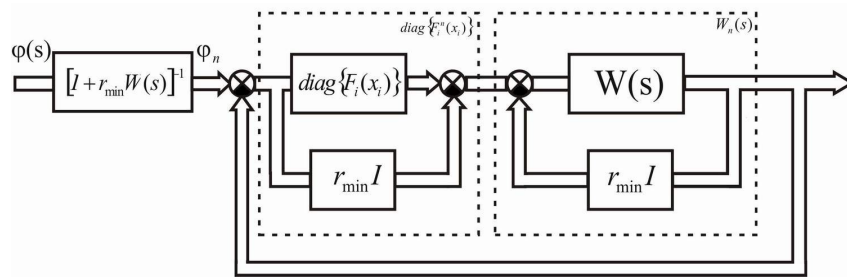


Рис. 4

Все приведенные результаты полностью справедливы и для специального класса однотипных нормальных МСАР [6], а именно, МСАР с идентичными передаточными функциями сепаратных каналов и жесткими взаимными связями, характеризуемыми некоторой числовой матрицей. Для однотипных МСАР передаточная матрица линейной части $W(s)$ может быть представлена в виде

$$W(s) = w(s)R, \quad (13)$$

где $w(s)$ – скалярная передаточная функция сепаратных каналов; R – $N \times N$ числовая матрица взаимосвязей. Причем условие нормальности таких МСАР зависит только от матрицы R и имеет простой вид

$$RR^T = R^T R,$$

где T – символ транспонирования матриц.

Таким образом, для абсолютной устойчивости положения равновесия МСАР с нормальной линейной частью достаточно, чтобы обычные частотные критерии абсолютной устойчивости систем с одним входом и выходом, такие как критерий Попова, внеосевой круговой, параболический и другие критерии, выполнялись для каждой из N одномерных характеристических систем с передаточными функциями линейной части $q_i(j\omega)$ и нелинейностями, удовлетворяющими тем же ограничениям, что и нелинейности исходной МСАР. На рис. 5 в качестве иллюстрации применения критерия Попова приведен качественный вид характеристических годографов абсолютно устойчивой нормальной МСАР с тремя входами и выходами.

Напомним еще раз, что в случае МСАР общего вида данные частотные критерии являются необходимыми, но недостаточными для выполнения условий положительной определенности матрицы $\text{Re } P(j\omega)$ (2).

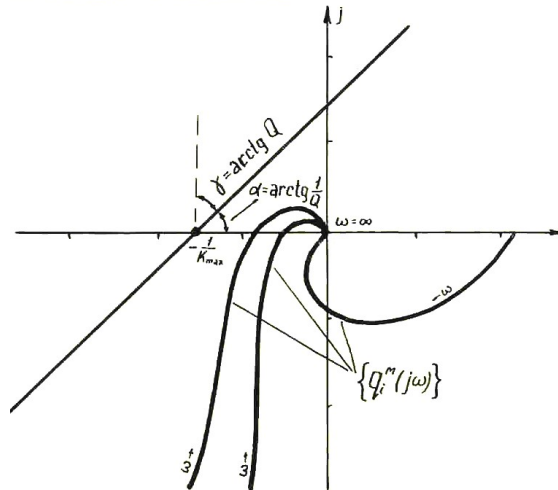


Рис. 5

2. Пример. Проиллюстрируем рассмотренные в статье положения на конкретном примере 16 – канальной циркулянтной однотипной системы автоматического регулирования с передаточной функцией идентичных сепаратных каналов вида

$$w(s) = \frac{600000000(s+3)}{s(s+0,33)(s+400)^2(s+500)}$$

и нелинейностями, принадлежащими некоторому сектору $[K_{\min}, K_{\max}]$. Данные нелинейности будем считать в общем случае нестационарными, что приводит к необходимости применения кругового критерия в форме (12), где параметр Q равен нулю.

В циркулянтных системах, относящихся к нормальным, каждая последующая строка передаточной матрицы линейной части повторяет предыдущую строку при сдвиге на один элемент вправо. Последний элемент предыдущей строки при этом становится первым элементом последующей. В однотипных циркулянтных системах данные условия относятся к числовой матрице взаимосвязей R в (5).

Зададим элементы первой строки матрицы R в виде

$$r_1 = [1 \ 0,6 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (14)$$

Структурно подобная матрица означает, что все каналы МСАР соединены “круговой” связью с коэффициентом 0,6, а собственные значения матрицы R даются выражениями

$$\lambda_i = 1 + 0,6 \exp\{j2\pi(i-1)/16\} \quad i = 1, 2, \dots, 16. \quad (15)$$

На рис. 6 построены характеристические годографы передаточной матрицы линейной части $w(s)R$ системы и показаны три круга, соответствующие одинаковым максимальным значениям $K_{\max} = 1$ и трем разным минимальным значениям $K_{\min} = [0,1, 0,2, 0,4]$ угловых коэффициентов секторов, ограничивающих нелинейности. Расчеты осуществлялись при помощи специальной программы, написанной на языке программирования MATLAB. Как видно из рис. 6, для рассматриваемой 16 - канальной циркулянтной системы достаточные условия положительной определенности эрмитовой матрицы $\text{Re}P(j\omega)$ (2) выполняются в секторе $[0,5, 1]$.

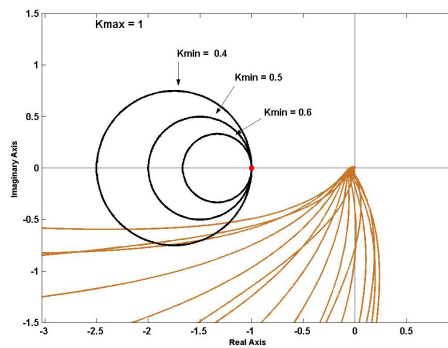


Рис. 6

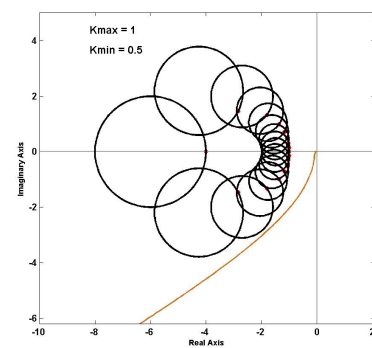


Рис. 7

На рис. 7 даны построения, соответствующие другой, описанной в [11] геометрической форме кругового критерия (на плоскости единственного характеристического годографа $w(j\omega)$) для полученного выше “устойчивого” сектора $[0,5, 1]$, а на рис. 8 показаны зависимости собственных значений $\mu_i(\omega)$ матрицы $\text{Re } P(j\omega)$ (2) от частоты ω для рассматриваемой циркулянтной системы, подтверждающие положительность всех $\mu_i(\omega)$, то есть выполнение достаточных условий абсолютной устойчивости положения равновесия МСАР.

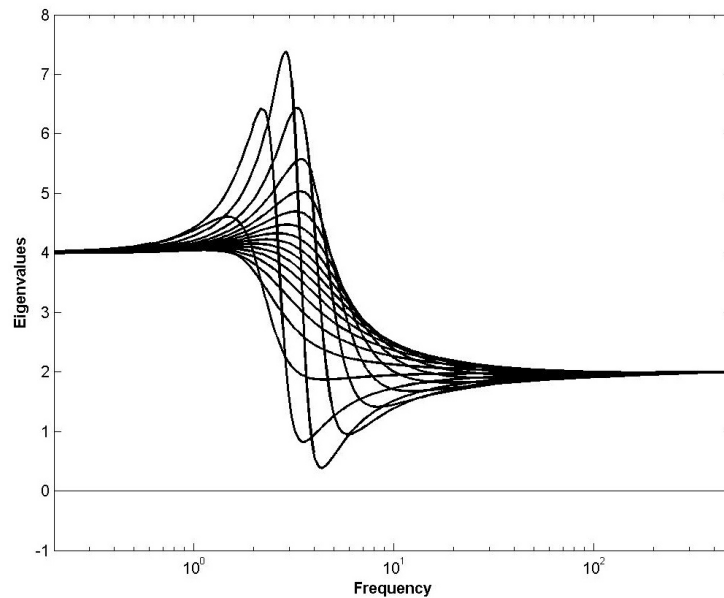


Рис. 8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попов В.М.** Об абсолютной устойчивости нелинейных систем автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика.- 1961.- № 8.-С. 24-32.
2. **Джури Э., Ли Б.** Абсолютная устойчивость систем с многими нелинейностями// Автоматика и телемеханика.-1965 .- № 6. -С.14-21.
3. **Moore J.B., Anderson B.D.** Generalization of the Circle Criterion.- Preprints, 1968, JACC (Ann.Arbor, Mich). -Р. 14-19.
4. **Гаспарян О.Н.** Исследование абсолютной устойчивости нелинейных многосвязных систем методом характеристических передаточных функций // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН.-1986. -Т. 39. - С. 23-29.
5. **MacFarlane A.G.J.** Postlethwaite, Characteristic Frequency Functions and Characteristic Gain Functions // Int.J.Contr. - 1977.-Vol.25.-Р. 78-84.

6. **Гаспарян О.Н.** Метод характеристических передаточных функций в теории многосвязного регулирования // Тез. докл. Респ. научн.-техн. конф. "Современные системы автоматического управления и их элементы".- Ереван, 1981.- С. 3-9.
7. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / Под ред. **Р.Ф.Нелепина**. -М.: Наука, 1975.- 448 с.
8. **Сю Д., Мейер А.** Современная теория автоматического управления и ее приложения.- М.: Машиностроение, 1972.- 544 с.
9. **Dorf R.C. and Bishop R.H.** Modern Control Systems.- Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 1998.
10. **Dereck A.Linkens** (editor), CAD for Control Systems.-Marcel Dekker, New Yourk, 1995.
11. **Гаспарян О.Н.,Алексанян Г.А.** К исследованию абсолютной устойчивости нелинейных многосвязных однотипных систем автоматического регулирования на основе круговых критериев // Моделирование. Оптимизация. Управление: Сб. научн. тр./ ГИУА. –Ереван, 2004.- Вып. 7, No 1.-С. 12-17.

ИРФЭ НАН РА. Материал поступил в редакцию 20.03.2004.

Օ.Ն. ԳԱՍՊՐՅԱՆ, Գ.Ա. ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ

**ՆՈՐՄԱԼ ՓՈԽԱՆՑՄԱՆ ՄԱՏՐԻՑՈՎ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱԿԱՊ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԲԱՅԱՐԶԱԿ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Բնութագրիչ փոխանցման ֆունկցիաների մեթոդով դիտարկված են գծային մասում նորմալ փոխանցման մատրիցով ոչ գծային բազմակապ ավտոմատ կառավարման համակարգերի բացարձակ կայունության հայտնի հայտանիշների բազմաչափ երկրաչափական նմանակներ: Ցույց է տրված, որ նորմալ բազմակապ համակարգերի երկրաչափական հայտանիշները բավարար են: MATLAB լեզվով բերված է թվային խնդիրների հաշվարկ:

O.N. GASPARYAN, G.A. ALEKSANYAN

**ABSOLUTE STABILITY OF NONLINEAR MULTIDIMENSIONAL CONTROL SYSTEMS WITH
NORMAL TRANSFER MATRICES OF LINEAR PART**

For a special class of nonlinear multiple-input multiple-output (MIMO) feedback control systems, with normal transfer matrices of linear part, multidimensional geometric analogs of equilibrium point's absolute stability criterion are considered on the basis of the characteristic transfer function method. It is shown that for normal MIMO control systems the derived geometrical criteria are sufficient. Numerical examples carried out in MATLAB language are given.

Р.Г. ХАЧАТРЯН, Э.В. КАЗАРЯН

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО НАВЕДЕНИЯ ГЕЛИОУСТАНОВКИ НА СОЛНЦЕ

Разработана система автоматического наведения гелиоустановки на Солнце.

Ключевые слова: датчик местоположения Солнца, система наведения, гелиоустановка, фотодиод, фотопреобразователь.

В последнее время особое внимание уделяется проблеме повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. Постоянное наведение панели с фотопреобразователями на Солнце, с целью обеспечения падения солнечных лучей на воспринимающую поверхность фотопреобразователей под углом, близким к 90° , является одним из основных факторов повышения КПД гелиоустановки.

В случае отклонения солнечных лучей от воспринимающей поверхности, на которой расположены фотопреобразователи, наблюдаются:

- оптические потери за счет повышения отражения и неполного поглощения фотоактивной части спектра;
- потери из-за затемнения фотоконтактной поверхности.

Для автоматического наведения гелиоустановки на Солнце разработаны различные системы [1-3], в которых на каждой оси гелиоустановки установлены поисковые датчики. При этом для каждого конкретного месторасположения гелиоустановки задаются определенные углы исходного положения, что усложняет конструкцию системы наведения. Кроме того, при наличии облачности процесс наведения прерывается, и наведение системы на Солнце начинается с исходного состояния при появлении Солнца.

Известны также системы [4], в которых используются биметаллические пластины, механически связанные с зубьями храпового колеса вала. Биметаллическая пластина, являющаяся рабочим органом системы слежения, периодически нагревается, и ее работа зависит от таких факторов, как температура окружающей среды, коэффициент теплового расширения пластин и период изменения освещенности пластин. Со временем параметры биметаллической пластины изменяются, и происходит нарушение процесса слежения, т.е. повышается погрешность точности наведения следящей системы. В подобных конструкциях наличие большого количества функциональных элементов затрудняет эксплуатацию системы, а также ухудшает показатели надежности.

Известна также следящая система для непрерывного измерения озона, азота и других компонентов атмосферы, которая работает в нестационарных условиях эксплуатации [5]. В ней использован датчик, выполненный в виде двух взаимно перпендикулярных плоскостей, на которых установлены по два

фотопреобразователя. Сигналы фотопреобразователей после предварительного усиления ($K_y=100$) подаются в блок управления.

Многократное включение двигателя приводит к значительному расходу электроэнергии и уменьшению показателей надежности двигателей. Кроме того, использование усилителей с большим коэффициентом усиления требует компенсации температурной погрешности и дрейфа нуля усилителей.

Для рассматриваемой в данной работе задачи восприятия поверхностью панели с фотопреобразователями максимальной части интенсивности солнечной радиации и минимального потребления энергии следящим устройством использование вышеупомянутой схемы потребует дополнительных изменений и доработок.

В данной статье рассматривается система автоматического наведения панели с фотопреобразователями на Солнце (см. рис.), которая предназначена для периодического слежения за положением Солнца [6].

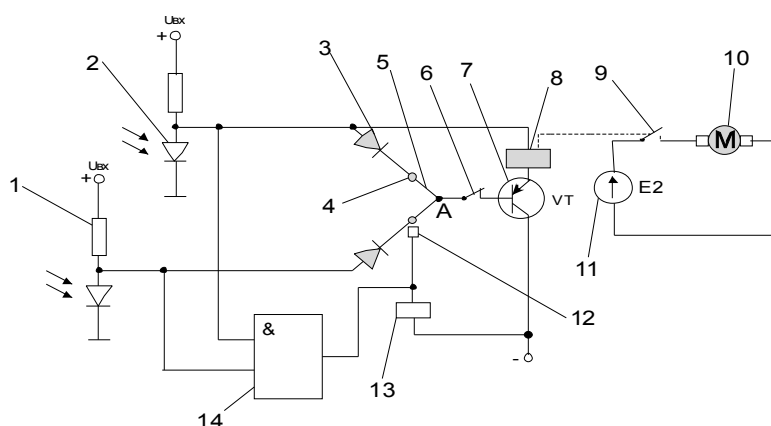


Рис. Принципиальная схема системы автоматического наведения гелиоустановки на Солнце: 1- резистор, 2 - фотодиод, 3- диод, 4 - неподвижный контакт, 5 - проводник системы наведения, 6- контакты реле отключения, 7- транзистор, 8- пусковое реле, 9 - контакты пускового реле, 10- исполнительное устройство (двигатель), 11- источник питания, 12- контактная щетка, 13- реле отключения, 14- элемент «И»

Разработанная система состоит из двух подсистем: слежения и наведения:

- в подсистеме слежения на одной плоскости, которая находится под углом к горизонту, равным широте местности, по окружности расположены фотодиоды 2, которые смещены относительно друг друга на 10° . В центре плоскости расположения фотодиодов 2 установлен перпендикулярно к ней штырь, который при определенном положении Солнца затемняет соответствующий фотодиод 2;

- система наведения состоит из группы электрических проводников 5, которые расположены в одной плоскости и одним концом соединены в одной общей точке А, а другие концы смещены относительно друг друга на 10° .

Направление каждого проводника в системе проводников 5 в плоскости совпадает с направлением соответствующего фотодиода 2.

Двигатель 10 включается с определенными интервалами времени, длительность которых зависит от угла расположения датчиков фотодиодов 2, воспринимающих солнечное излучение.

Система наведения работает следующим образом: при затемнении фотодиода 2 напряжение от источника питания через диод 3 подается на базу транзистора 7, и срабатывает пусковое реле 8 двигателя 10.

Диод 3, включенный к затемненному фотодиоду 2, находится в цепи соответствующего проводника в системе проводников 5. Направление проводника совпадает с направлением затемненного фотодиода 2.

К общей точке А подсоединена база транзистора 7, в цепь которой включена обмотка пускового реле 8 пускателя двигателя 10. При наличии тока в любом из проводников 5 срабатывает реле 8, которое, в свою очередь, приводит в движение двигатель 10, на валу которого установлена панель с фотопреобразователями.

Направление вращения двигателя задается соответственно направлению движения Солнца.

На каждом из проводников 5 системы наведения на равном расстоянии от общей точки А находятся неподвижные контакты 4, по которым при вращении двигателя 10 скользит контактная щетка 12, механически связанная с валом двигателя 10. Обмотка реле отключения 13 соединена с источником питания через контактную щетку 12.

При вращении двигателя 10 и замыкании контактной щетки 12 с неподвижным контактом 4 проводника 5, по которому течет ток, этот ток через контактную щетку начинает протекать через обмотку реле отключения 13. При этом срабатывает реле отключения 13, размыкая контакт 6, затем отключаются пусковое реле 8 и двигатель 10.

Двигатель 10 повторно включается при изменении положения солнечных лучей и затемнении последующего фотодиода 2.

В системе предусмотрена возможность корректировки положения панели с фотопреобразователями по вертикали. Это производится оператором периодически через каждый месяц и позволяет исключить использование дополнительной системы корректировки по вертикали, уменьшить затраты электроэнергии.

При наличии облачности в системе предусмотрен блок 14, построенный на логических элементах «И», который предназначен для останова двигателя при наличии облачности.

При облачности на входы логических элементов «И» подаются только логические «единицы», и в этом случае на выходе формируется сигнал, который подается в обмотку реле отключения 13. Реле 13 срабатывает и размыкает свой нормально закрытый контакт 6. При появлении Солнца процесс слежения начинается вновь, при этом в зависимости от положения Солнца затемняется соответствующий фотодиод.

При любых других сочетаниях на входе логических элементов «И» на выходе блока 14 имеется логический «ноль», и система находится в рабочем состоянии.

Таким образом, независимо от метеорологических условий, система всегда находится в состоянии готовности к слежению при появлении солнечных лучей.

В данной системе количество включений двигателя в течение солнечного дня значительно меньше по сравнению с известными аналогичными системами [5]. Благодаря меньшему количеству пуска двигателя уменьшается потребление электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дубилович В.М., Зарецкий Е.Ф., Исаев С.В.** и др. Автоматическая система управления гелиостатом. А.с. № 1322036, БИ № 25, 1987.
2. **Колесников К.Д.** Автоматический приемник солнечной энергии. А.с. 2147358 БИ N 10, 2000.
3. Strom von der Sonne. Komplette Systeme und Komponenten für solare Netzeinspeisung und Inselösungen. Wagner & Co. 2001.
4. **Bean J .R., Diver R. B.** Technical Status of the Dish/Stirling Joint Venture Program . Paper N 95-202 // Proceedings of the IECEC, Orlando, FL.1999.
5. **Матевосян П. А., Мелконян Д.О., Мнацаканян М. Г.** Следящая система для нестационарных условий эксплуатации // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1997. - Т. 50, № 3.
6. **Хачатрян Р.Г., Казарян Э.В.** Автоматическая система наведения гелиоустановки на Солнце. А.с. № 1482 А2, РА., 2004.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.06.2004.

Ռ.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Է.Վ. ԿԱԶԱՐՅԱՆ

ՀԵԼԻՈՎԱՅԱՆՔԸ ԴԵՊԻ ԱՐԵԳԱԿԸ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՈՂ ԱՎՏՈՄԱՏ ՀԱՄԱԿԱՐԳ

Մշակվել է Արեգակի շարժմանը հետևող և հեղիոկայանքը դեպի Արեգակը կողմնորոշող ավտոմատ համակարգ: Համակարգն աչքի է ընկնում կառուցվածքի և աշխատանքի պարզությամբ, կողմնորոշման գործընթացի կարճատևությամբ:

R. G. KHACHATRYAN, E. V. KAZARYAN

AUTOMATIC SYSTEM OF DIRECTING HELIOSTATION TO THE SUN

An automatic system for directing heliostation to the Sun is developed. The System has simplicity of project, simplicity of functioning and does not contain much intermediate elements.

М.А. МУРАДЯН, Р.В. МОВСЕСЯН

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ СЕГМЕНТОВ ЭКГ**

Исследована эффективность применения методов второй производной (МВП) и наименьших квадратов (МНК) к решению задачи нахождения длительности сегментов электрокардиограммы (ЭКГ). Показана эквивалентность этих двух методов. Установлено, что оптимальный, с точки зрения наименьших квадратов, фильтр можно представить в виде каскадного соединения дважды дифференцирующего и сглаживающего фильтров с характеристикой, аналогичной традиционным оконным фильтрам.

Ключевые слова: электрокардиограмма, вторая производная, наименьшие квадраты, цифровой фильтр, аддитивный шум, отношение сигнал/шум.

Автоматизированный анализ ЭКГ с применением современных персональных компьютеров в настоящее время привлекает внимание многих исследователей в области медицинского приборостроения. Программные пакеты компьютерной обработки ЭКГ позволяют определить амплитудно-временные характеристики кардиокомплексов, зубцов и интервалов и сформировать синдромное заключение в терминах клинической электрокардиографии.

Анализ электрокардиосигналов включает в себя локализацию комплексов ЭКГ для каждого отдельно взятого отведения, поиск начальных и конечных точек комплексов, выделение зубцов, составляющих каждый комплекс, и измерение амплитуд и длительностей. Измерение длительности отдельных сегментов электрических сигналов сводится к обнаружению моментов их начала и конца. Все математические методы решения этой задачи сводятся к определению моментов излома формы сигнала.

Существует множество математических методов [1] решения этой задачи, среди которых, по реализации вычислительного процесса и точности, важное место занимают МВП и МНК.

В данной работе исследуется эффективность применения этих методов к решению задачи нахождения начала и конца сегментов сигналов. Показывается эквивалентность этих двух методов. Установлено, что оптимальный, с точки зрения наименьших квадратов, фильтр можно представить в виде каскадного соединения дважды дифференцирующего фильтра и сглаживающего фильтра с характеристикой, аналогичной традиционным оконным фильтрам.

При реализации алгоритма измерения длительности сегментов ЭКГ сигнала методом второй производной считается, что в точках излома ЭКГ, т.е. в моменты начала и конца сегмента, вторая производная имеет максимальное значение (рис.1). Оценки второй производной определяются с помощью цифрового фильтра, вычисляющего вторую разность оцифрованного ЭКГ сигнала:

$$y(k) = x(k-1) - 2x(k) + x(k+1) = x(k) \otimes h_2(k), \quad (1)$$

$$h_2(k) = \delta(k-1) - 2\delta(k) + \delta(k+1), \quad (2)$$

где $x(n)$ - отсчеты оцифрованного ЭКГ сигнала; $y(n)$ - вторая разность сигнала, n - дискретное время; h_2 - импульсная функция дважды дифференцирующего фильтра.

Для проведения вычислений в реальном масштабе времени начало отсчета времени необходимо перенести с центра импульсной функции в ее начало:

$$h_2(k) = \delta(k) - 2\delta(k-1) + \delta(k-2). \quad (3)$$

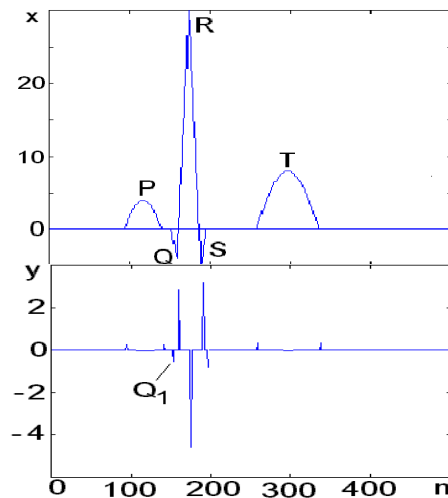


Рис. 1. ЭКГ сигнал (x) и его вторая производная (y)

Измерение и оцифрование ЭКГ сигнала всегда сопровождается наводками и шумами. По этой причине анализируемые графики (сигналы) $y(n)$ имеют дополнительные многочисленные (частные) максимумы, маскирующие интересные. Для подавления маскирующих колебаний $y(n)$ используют их фильтрацию с устранением высокочастотных составляющих. Весовая функция комбинированного фильтра, т.е. последовательное соединение сглаживающего и дважды дифференцирующего фильтров, определяется линейной сверткой:

$$h(n) = h_w(n) \otimes h_2(n), \quad (4)$$

где $h_w(n)$ - импульсная функция сглаживающего фильтра.

В качестве сглаживающего фильтра лучше всего подходят фильтры с симметрической конечной импульсной характеристикой (КИХ) "оконного" типа [2,3].

Свертке (4) соответствует передаточная функция

$$H(z^{-1}) = H_2(z^{-1})H_w(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2 H_w(z^{-1}). \quad (5)$$

Определение "начала" или "конца" сегментов ЭКГ сигнала МНК осуществляется с помощью следующего алгоритма. Для каждого момента k входного сигнала $x(k)$ на базе N точек производится построение наименее уклоняющегося в смысле МНК полинома второй степени ak^2+bk+c . Утверждается, что в точках изломов сигнала коэффициент a квадратичного члена полинома достигает максимума [1]. Коэффициенты a , b , c аппроксимирующего полинома находятся из условия минимизации следующего функционала:

$$F_k = \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} (x(k-j) - a_k(k-j)^2 - b_k(k-j) - c_k)^2 = \min, \quad (6)$$

где k – номер текущего отсчета; j – номер точки отсчета внутри скользящего интервала ($j=-(N-1)/2, \dots, -1, 0, +1, \dots, (N-1)/2$); N – нечетное натуральное число. Искомая оценка a_k определяется на этом же скользящем интервале как решение задачи (6):

$$\frac{\partial F_k}{\partial a_k} = 0, \quad \frac{\partial F_k}{\partial b_k} = 0, \quad \frac{\partial F_k}{\partial c_k} = 0. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (7) путем последовательного исключения b_k и c_k приводит к следующему результату:

$$a_k = \frac{1}{D} \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} h(j)x(k-j), \quad (8)$$

где

$$D = \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} k^4 - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} k^2 \right)^2, \quad (9)$$

$$h(j) = j^2 - \frac{1}{N} \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} k^2. \quad (10)$$

Значение D есть постоянная величина, поэтому для упрощения записи формул исключим ее из дальнейшего рассмотрения.

Вычисление a_k по формуле (8) соответствует выходному сигналу линейного КИХ фильтра с импульсной функцией $h(j)$. Отметим следующие свойства $h(j)$:

$$\begin{aligned} h(j) &= j^2 - \frac{1}{N} \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} k^2 = j^2 - \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} k^2, \\ h(-j) &= h(j), \quad j = 1, \dots, (N-1)/2, \\ h(0) &= -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} k^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Соответствующая передаточная функция имеет вид

$$H(z^{-1}) = \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} h(j)z^{-j}. \quad (12)$$

Перенеся начало отсчета времени с центра импульсной функции в ее начальную точку, что эквивалентно умножению $H(z^{-1})$ на $z^{-(N-1)/2}$, получим

$$H_1(z^{-1}) = z^{-(N-1)/2} H(z^{-1}) = \sum_{j=0}^{N-1} h_1(j)z^{-j}, \quad (13)$$

$$h_1(j) = (j - \frac{N-1}{2})^2 - \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} k^2, \quad j = 0, \dots, N-1. \quad (14)$$

Покажем, что фильтр (13), полученный МНК, можно представить в виде каскадного соединения дважды дифференцирующего фильтра и КИХ фильтра оконного типа:

$$H_1(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2 H_{msm}(z^{-1}). \quad (15)$$

Для этого достаточно показать, что $H_1(z^{-1})$ имеет корень $z=1$ с кратностью не ниже двух:

$$H_1(1) = 0, \quad H_1'(1) = 0, \quad (16)$$

где $H_1'(1)$ – производная $H_1(z^{-1})$ в точке $z=1$.

Подставляя $z=1$ в (13), получим

$$\begin{aligned} H_1(1) &= \sum_{j=0}^{N-1} h_1(j) = \sum_{j=0}^{N-1} \left[(j - \frac{N-1}{2})^2 - \frac{2}{N} \sum_{j=1}^{(N-1)/2} j^2 \right] = \\ &= (2 \sum_{j=0}^{(N-1)/2} j^2 - \sum_{j=0}^{N-1} \frac{2}{N} \sum_{j=1}^{(N-1)/2} j^2) = (2 \sum_{j=0}^{(N-1)/2} j^2 - 2 \sum_{j=1}^{(N-1)/2} j^2) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Определим $H_1'(z^{-1})$:

$$H_1'(z^{-1}) = \sum_{j=0}^{N-1} -jh_1(j)z^{-j-1} = -z^{-1} \sum_{j=0}^{N-1} jh_1(j)z^{-j}. \quad (18)$$

Используя формулы суммы квадратов ($\sum_{k=1}^n k^2 = n(n+1)(2n+1)/6$) и кубов

($\sum_{k=1}^n k^3 = n^2(n+1)^2/4$) натуральных чисел [4], из (18) получим

$$\begin{aligned} H_1'(1) &= -\sum_{j=0}^{N-1} j \left[\left(j - \frac{N-1}{2} \right)^2 - \frac{N^2-1}{12} \right] = -\sum_{j=0}^{N-1} j(j^2 - (N-1)j + \frac{(N-1)^2}{4} - \frac{N^2-1}{12}) = \\ &= -\frac{(N-1)^2 N^2}{4} + (N-1) \frac{(N-1)N(2N-1)}{6} - (\frac{(N-1)^2}{4} - \frac{N^2-1}{12}) \frac{N(N-1)}{2} = 0, \end{aligned}$$

что и требовалось доказать.

В табл. 1 приведены передаточные функции общего фильтра $H_1(z^{-1})$ и его сглаживающей части $H_{msm}(z^{-1})$ для некоторых значений N . Для сравнения на рис. 2 показаны импульсные функции МНК сглаживающего фильтра (кривая hmsm) и окон Ханна и Хэмминга (кривые hn, hm) при ширине окна $M=N-2=33$.

Таблица 1

N	$H_1(z^{-1})$	$H_{msm}(z^{-1})$
5	$2-z^{-1}-2z^{-2}-z^{-3}+2z^{-4}$	$2+3z^{-1}+2z^{-2}$
7	$5-3z^{-1}-4z^{-2}-3z^{-3}+5z^{-6}$	$5+10z^{-1}+12z^{-2}+10z^{-3}+5z^{-4}$
9	$28+7z^{-1}-8z^{-2}+17z^{-3}-20z^{-4}-17z^{-5}-8z^{-6}+7z^{-7}+28z^{-8}$	$28+63z^{-1}+90z^{-2}+100z^{-3}+90z^{-4}+63z^{-5}+28z^{-6}$
11	$15+6z^{-1}-z^{-2}-6z^{-3}-9z^{-4}-10z^{-5}-9z^{-6}-6z^{-7}-z^{-8}+6z^{-9}+15z^{-10}$	$15+36z^{-1}+56z^{-2}+70z^{-3}+75z^{-4}+70z^{-5}+56z^{-6}+36z^{-7}+15z^{-8}$
13	$22+11z^{-1}+2z^{-2}-5z^{-3}-10z^{-4}-13z^{-5}-14z^{-6}-13z^{-7}-10z^{-8}-5z^{-9}+2z^{-10}+11z^{-11}+22z^{-12}$	$22+55z^{-1}+90z^{-2}+120z^{-3}+140z^{-4}+147z^{-5}+140z^{-6}+120z^{-7}+90z^{-8}+55z^{-9}+22z^{-10}$

Исследована эффективность применения сглаживающих оконных и МНК фильтров для оценки второй разности ЭКГ сигналов. В качестве критерия для сравнения и выбора подходящих сглаживающих фильтров ("окон") использовано отношение сигнал/шум на выходе комбинированного фильтра:

$$\eta_y = y / \sigma, \quad (19)$$

где y - значение оценки второй производной ЭКГ сигнала в точке излома; σ_y - среднеквадратическое отклонение этой оценки.

Условие максимизации η труднее всего обеспечить для тех точек изломов, которые находятся между сегментами наименьшей длины [1,3]. Поэтому в данной работе исследования проводились для точки излома $Q_{\text{ж}}$, соответствующей началу Q зубца (можно представить аналогичные данные и для других точек излома).

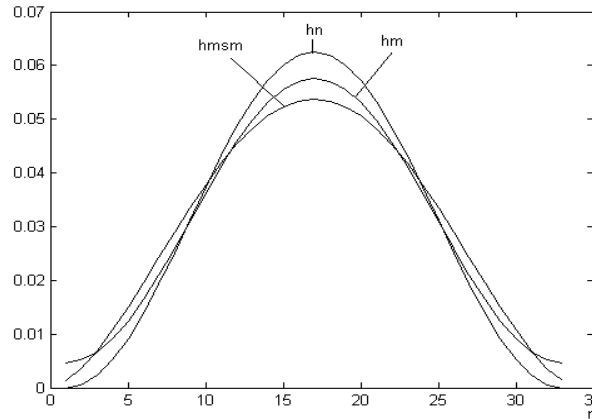


Рис. 2. Импульсные функции МНК сглаживающего фильтра (hmsm) и окон Ханна и Хэмминга (hn, hm)

Исследование эффективности применения комбинированных фильтров к анализу ЭКГ проводилось путем моделирования оцифрованного ЭКГ сигнала в программной среде MATLAB. В процессе моделирования к сигналу, представленному на рис. 1, добавляется аддитивный широкополосный шум с дисперсией σ_x и нижней частотой спектра F_c .

На рис. 3 представлены зависимости $L_{yx}=20\lg(\eta_y/\eta_x)$ от нижней частоты аддитивного широкополосного шума при частоте дискретизации $F_s=2000$ Гц для оконных фильтров: прямоугольного, Ханна, Хэмминга, Блэкмана, Кайзера и МНК (соответственно: hr, hn, hm, hb, hk, hmsm).

Полоса частот шума в ЭКГ обычно перекрывается с полосой полезного сигнала и зависит от конкретных условий измерения ЭКГ. Поэтому следует определить эффективность применения определенного типа "окна" в зависимости от полосы частот шума. С этой целью были проведены моделирования для разных значений F_c и F_s . Результаты представлены в табл.2.

Как следует из данных табл. 2, в зависимости от нижней частоты диапазона шума оптимальными могут оказаться разные окна. В случае, когда низшая частота шума больше 30 Гц и меньше 45 Гц, лучшие результаты можно получить с помощью МНК (хотя и другие окна: Кайзера, Хэннинга Хемминга и Блэкмана, дают аналогичные результаты), при $F_c > 45$ Гц окна Блэкмана обеспечивают наибольшее подавление шума.

Таблица 2

Тип окна	F_c , Гц		F_s , Гц				
			500	1000	1500	2000	4000
Прямоуг.	0	η_y/η_x	0,565	0,808	0,995	1,152	1,641
		M	11	21	31	41	83
Прямоуг.	25	η_y/η_x	0,641	0,911	1,147	1,320	1,891
		M	11	21	33	45	89
Кайзер Блэкман	35	η_y/η_x	0,986	1,377	1,768	2,000	2,873
		M	17	35	53	69	139
Блэкман Хэннинг	40	η_y/η_x	2,019	2,723	3,707	4,127	6,047
		M	19	37	57	75	151
Блэкман	45	η_y/η_x	6,850	9,557	13,89	15,47	23,00
		M	21	39	59	79	157
Блэкман	50	η_y/η_x	21,23	28,64	41,35	46,54	67,69
		M	19	37	57	75	149
МНК	35	η_y/η_x	1,042	1,4263	1,8213	2,0513	2,9422
		M	15	31	47	63	129
МНК	40	η_y/η_x	2,3619	2,8950	3,8821	4,3302	6,2533
		M	17	33	51	69	139

Выделение точек излома ЭКГ производится путем сравнения значений $\text{abs}(y(n))$ с некоторым заданным порогом $g\sigma_y$: если $\text{abs}(y(n)) \geq g\sigma_y$, то считается, что пик в $y(n)$ соответствует излому ЭКГ, в противном случае - пик считается ложным. Коэффициент g определяет требуемую достоверность оценки. Например, вероятность превышения ложного пика порога $3\sigma_y$ меньше 0,01. Заданное значение g определяет необходимое минимальное значение отношения сигнал/шум η_y .

Выбор типа и параметров сглаживающего фильтра производится с помощью таблиц, аналогичных табл. 2. Для известного значения η_x определяются значения η_y путем умножения значений η_y/η_x на η_x (масштабирование таблицы), далее для требуемого значения η_y из масштабированной таблицы определяются тип и длина окна, а также необходимая минимальная частота дискретизации F_s .

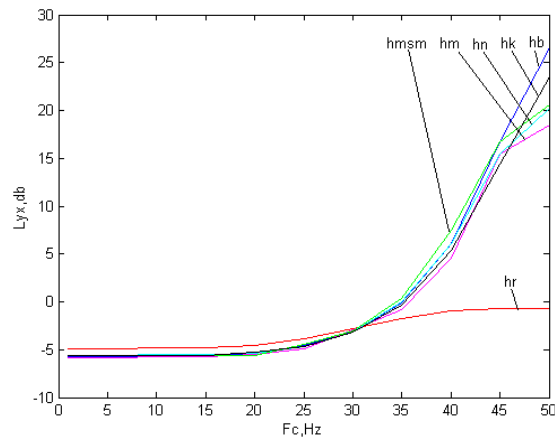


Рис. 3. Зависимость $L_{xy} = 20\lg(\eta_y/\eta_x)$ от нижней частоты широкополосного шума при $F_s = 2000 \text{ Гц}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев В.В., Калантар В.А., Аракчеев А.Г. и др. Алгоритмы измерения комплексов ЭКГ // Медицинская техника. - 1988. - 15. - С. 6-14.
2. Jackson L.B. Digital Filters and Signal Processing. - 1996. - 657p.
3. Мурадян М.А., Мовсесян Р.В. Исследование цифровых методов анализа кардиосигнала // Моделирование, оптимизация, управление. - 2001. - Вып. 4. - С. 128-133.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1974. - 831с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 22.12.2004.

Մ.Ա. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ, Ռ.Վ. ՄՈՎՍԵՍՅԱՆ

**ՆՎԱԶԱԳՈՒՅՆ ՔԱՌԱԿՈՒՄԻՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ԷԼԵԿՏՐԱՍՐՏԱԳՐԻ
ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՀԱՏՎԱԾՆԵՐԻ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱՐ**

Հետազոտվել է էլեկտրասրտագրի ազդանշանի հատվածների տևողությունների որոշման համար երկրորդ ասանցյալի և նվազագույն միջին քառակուսիների մեթոդների արդյունավետությունը: Ցույց է տրված այդ մեթոդների համարժեքությունը: Հաստատված է, որ նվազագույն միջին քառակուսիների իմաստով օպտիմալ զտիչը կարելի է ներկայացնել կրկնակի դիֆերենցող և պատուհանաձև բնութագրով հարթեցնող զտիչների հաջորդական միացման տեսքով:

M.A. MURADYAN, R.W. MOVSESYAN

**APPLICATION OF MEAN SQUARE MINIMUM METHOD TO DETERMINATION OF ECG
SEGMENTS DURATION**

The efficiency of the second derivative and mean square minimum methods' applications to the determination of ECG signal segments duration is investigated. The equivalency of two mentioned methods is shown. The overall mean square minimum optimized filter is represented as cascade connection of the second order differentiating and averaging filters. The averaging filter has characteristics similar to window functions.

П.О. БАЛДЖЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ
ПОТОКОВ ПРИ ПОСТОЯНСТВЕ ИХ НАНОСОНЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Предлагается обобщение зависимости для решения задач руслообразования, в которых имеет место баланс наносов. На основе анализа результатов разработок выводится связь между гидравлическими параметрами “живого” сечения, позволяющая при заданных до начала руслообразования величинах потока прогнозировать их значения после завершения процесса с учетом всего многообразия имеющихся выражений для расчета количества наносов.

Ключевые слова: процесс руслообразования, расход наносов, транспортирующая способность потока, баланс наносов, прогноз.

Прогноз руслообразующих процессов играет важную роль в прикладной гидродинамике. Без него не могут быть решены задачи мостовой гидравлики и различных противоселевых сооружений, заилиения водохранилищ и руслового размыва у речных сооружений. В указанных задачах естественным или искусственным путем нарушается созданное равновесие между руслом и потоком, что приводит к интенсивному руслообразованию как в вертикальном, так и в поперечном направлениях. Данный процесс завершается, если в новых условиях восстанавливается равновесие, т. е. имеет место баланс наносов. Необходимость соблюдения условия баланса наносов, как признак завершения руслообразования, вытекает также из уравнения Экснера-Великанова [1], описывающего нестационарный русловой процесс в виде

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где A – поперечная “живая” площадь потока; P — количество наносов в потоке.

При завершении размыва или отложений имеем постоянные параметры по времени, т.е. $\partial A / \partial t = 0$. Следовательно, по направлению движения получаем

$$P = \text{const} \quad \text{или} \quad q_{\text{ТВ}} = \text{const}. \quad (2)$$

Некорректность использования в дальнейших разработках той или иной формулы проявляется в том, что до настоящего времени отсутствует строго полученное универсальное уравнение по определению расхода наносов $q_{\text{ТВ}}$ или же наносонесущей способности потока P (предельное значение последнего обозначим через S).

При этом ввиду сложности и многофакторности задачи (разнообразие русел водотоков, широкий разброс физико-механических параметров русла и наносов, большая разница между концентрациями потока) невозможно получить достаточно точное решение. Исходя из этого, при решении задач руслообразовательного процесса в различных работах за основу принята та или иная рекомендация. В результате надежность решений в значительной степени становится зависимой от принятого исходного выражения. Это является причиной того, что даже в одной задаче данной области (мостовой переход, заиление водохранилища и т. д.) полученные по различным методам результаты порой сильно отличаются друг от друга.

С учетом вышеизложенного и опираясь на проведенный нами анализ известных зависимостей [1-6], охватывающих многообразие задач движения наносов, разработано универсальное решение. Полученная на основе баланса наносов обобщающая зависимость позволяет учесть основные предложения по расчету величин $q_{тв}$, p и S при решении различных задач руслообразующего процесса.

С целью четкого представления особенностей исследуемого объекта рассматриваются некоторые недостаточно освещенные стороны руслового процесса.

Обычно продольный уклон водотоков в направлении движения уменьшается. Каждому участку русла, в зависимости от его уклона, расхода потока и других характеристик, соответствует определенная величина предельной наносонесущей (транспортирующей) способности потока S , которая также уменьшается. При руслоформирующем расходе Q_p имеем концентрацию P_p . Очевидно, что транспортирующая способность потока на каком-то участке русла S с практической точностью будет соответствовать расчетной концентрации потока P_p . Иначе говоря, на данном участке поток будет двигаться с предельной наносонесущей способностью. Все параметры этого участка, именуемого в дальнейшем предельным, обозначим индексом "ноль" (рис. 1). Величины указанных параметров (уклона i_0 , транспортирующей способности S_0 , площади живого сечения A_0 и др.) играют важную роль при оценке состояния потока по длине водотока и, следовательно, установлении типа руслообразования. Очевидно, что для предельного участка имеем

$$S_0 = P_p. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что величины транспортирующей способности потока в верхних по отношению к предельному участкам больше S_0 , а в нижних - меньше S_0 . Следовательно, по длине водотока можно выделить следующие состояния потока: на верхних участках он движется с концентрацией P_p , меньшей транспортирующих способностей данных участков; на предельном участке - $P_p = S_0$; на нижних участках - концентрация P_p больше их пропускных способностей. Указанное позволяет

по всей длине водотока выделить два известных типа естественного руслообразования: зону транзита наносов (верхние и предельный участки) и зону их отложений (нижние участки) (см. рис.). Со временем при возрастании величины P_p предельный участок переместится вверх, а при ее уменьшении – вниз.

При возведении руслового сооружения на соответствующих местах водотоков имеет место нарушение равновесия. Вследствие этого около створа сооружения возбуждаются интенсивные руслообразующие явления: размыв или отложение грунтов (см.рис.). Начатый процесс затухает, когда восстанавливается транзитная переброска наносонесущего потока с расчетной концентрацией P_p через исследуемый участок. (Все его параметры обозначим без индекса). Очевидно, что по всей длине участка движение, аналогично предельному, будет подчиняться условию

$$S = P_p \quad . \quad (4)$$

Из связей (3) и (4) следует

$$S_0 = S \quad . \quad (5)$$

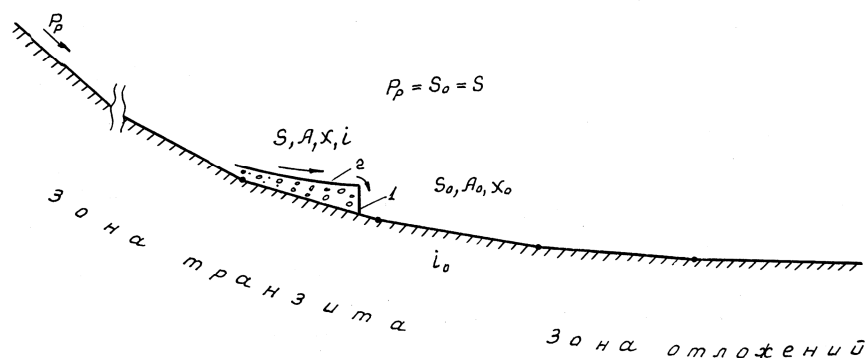


Рис. Профиль русла водотока: 1 - русловое сооружение, 2 - конечная поверхность отложений наносов

Равенство (5) справедливо для любого местоположения участка (по отношению к предельному) при условии, чтобы здесь имел место баланс наносов. Данное равенство позволяет, с учетом существующих предложений по расчету расхода наносов или наносонесущей способности, вывести обобщенную зависимость между гидравлическими параметрами двух участков русла: предельного и вновь образованного, т. е. установить функцию

$$X = f(A, A_0, X_0) \quad . \quad (6)$$

Как было отмечено выше, известно множество выражений по расчету количества наносов [1- 6]. В настоящей работе поставлена цель раскрыть вид функции (6), что практически позволит сделать первоначальный прогноз по конечному результату руслообразования. При этом учитывается весь спектр

известных формул по расчету количества наносов. На примере формулы Великанова [2] приводится последовательность разработок:

М. А.

$$S = \text{const} \frac{Vi}{W\rho'}, \quad (7)$$

где W - гидравлическая крупность наносов; ρ' - их относительная плотность. С учетом формулы Шеззи имеем

$$S = \text{const} \frac{V^3}{C^2 R W \rho'}. \quad (8)$$

Согласно выражению (8), равенство (5) напишется в виде

$$\frac{V_0^3}{C_0^2 R_0} = \frac{V^3}{C^2 R}. \quad (9)$$

Введем безразмерные величины: $\bar{b} = \frac{b}{b_0}$, $\bar{h} = \frac{h}{b_0}$, $\bar{A} = \frac{A}{A_0}$, $\bar{X} = \frac{X}{X_0}$, $\bar{R} = \frac{R}{R_0} = \frac{\bar{A}}{\bar{X}}$,

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0} = \frac{1}{\bar{A}}, \bar{n} = \frac{n}{n_0}, \bar{C} = \frac{C}{C_0} \text{ и т.д.}$$

При этом, например, для прямоугольной формы русла площадь живого сечения и смоченный периметр имеют вид

$$\bar{A} = \frac{bh}{b_0 h_0} = \bar{b} \bar{h} K, \quad (10)$$

$$\bar{X} = \frac{b + 2h}{b_0 + 2h_0} = (\bar{b} + 2\bar{h}) \frac{K}{k + 2}, \quad (11)$$

где $K = b_0 / h_0$ - известное в гидравлике соотношение.

В безразмерных величинах выражение (9) напишется в виде

$$\frac{\bar{V}^3}{\bar{C}^2 \bar{R}} = 1. \quad (12)$$

Заменяя безразмерные скорость потока $\bar{V}$ и гидравлический радиус $\bar{R}$ на площадь живого сечения $\bar{A}$ и смоченный периметр $\bar{X}$ и определив коэффициент Шеззи по Маннингу, получим

$$\frac{\bar{X}^{4/3}}{\bar{A}^{13/3}} \bar{n}^2 = 1. \quad (13)$$

Практически $n = n_0$ (т.е. $\bar{n} = 1$). Следовательно, для предельного и подвергнутого руслообразованию участков русла зависимость между их гидравлическими параметрами представляется в виде

$$\bar{X} = \bar{A}^{13/4} . \quad (14)$$

Аналогичным образом обработаны более чем 40 выражений по определению величины S или $q_{\text{ТВ}}$ [1-6]. На их основе были получены соответствующие соотношения между $\bar{X}$ и $\bar{A}$, отличающиеся друг от друга значениями показателя степени при $\bar{A}$. В случаях, когда $n \neq n_0$ или $C \neq C_0$, использованы известные зависимости (Штриклера-Чанга, несдвигающих скоростей и др.).

На основе анализа результатов проведенных разработок можно сделать вывод о том, что, несмотря на конкретные назначения выражений по определению наносонесущей способности (для взвешенных и данных наносов, двухфазных и селевых потоков, гидротранспорта и т. д.), независимо от имеющихся расхождений между результатами расчетов по данным выражениям, все они с учетом баланса наносов (5) приводятся к обобщенному виду

$$\bar{X} = \bar{A}^a \quad (15)$$

или

$$\frac{X}{X_0} = \left(\frac{A}{A_0} \right)^a . \quad (16)$$

При этом каждому выражению соответствует определенное значение показателя a . Однако, вопреки вышеуказанному расхождению между результатами расчетов по указанным выражениям, доверительный интервал изменения показателя a сравнительно небольшой - от 2,5 до 4,5. Из зависимостей (15) или (16) легко перейти к любым частным известным решениям по прогнозу процесса руслообразования. Например, для прямоугольной формы русла при $a = 3$ получим хорошо известную в мостовой гидравлике формулу по расчету глубины размыва под мостом [6]:

$$h = h_0 \left(\frac{b_0}{b} \right)^{2/3} . \quad (17)$$

Анализ значений a показывает, что в различных задачах, в зависимости от концентрации потока, указанный интервал можно раздробить. Так, при концентрациях 10...70 кг/м³ (заиление водохранилищ, ирригационные каналы) значения a предпочтительно брать 2,5...3,3, при 70...150 кг/м³ (мостовые переходы и другие русловые сооружения на предгорных водотоках) - 3,0...4,0, для селевых и горных паводковых потоков - 3,5...4,5.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно прийти к следующим выводам:

- так как ни одно из существующих выражений по расчету наносонесущей способности потока не охватывает всего многообразия движения наносов, то

для решения задач руслообразования использование того или иного конкретного выражения в условиях баланса наносов некорректно;

- целесообразно использовать обобщенную зависимость (15) или (16), полученную с учетом всего многообразия существующих выражений. При этом расчеты необходимо вести на фоне изменения показателя α и в качестве окончательного принимать возможно неблагоприятный из полученных вариантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Великанов М. А.** Динамика русловых потоков. Том. 1. - М.: Гостехиздат, 1954. - 322 с.
2. **Великанов М. А.** Динамика русловых потоков. Том. 2. - М.: ГИТТЛ, 1955. - 323 с.
3. Движение наносов и гидротранспорт/ Под ред. **А. П. Юфина**. - М.; Л.: Госэнергоиздат. 1963. - 199 с.
4. **Салахов Ф. С.** Гидравлический расчет ирригационных отстойников: Сб. науч. тр. АзНИИГиМ.- Баку, 1964. - Том 5.- С. 36-43.
5. **Балджян П. О.** Определение гидравлических параметров селевого потока и расчет селетранспортирующих каналов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Ереван, 1982.- 23 с.
6. **Андреев О. В.** Проектирование мостовых переходов.- М: Транспорт, 1980.- 208 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 15.03.2003.

Պ. Հ. ԲԱԼԶՅԱՆ

ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ՀԴԴՐԱՎԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԿԱՊԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ԲԵՐՎԱԾՔԱՍԱՆՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊԶՈՒՄ

Հունակագմական խնդիրների լուծման համար բերվածքների քանակի որոշման բանաձևերի մշակման և վերլուծության հիման վրա առաջարկվում է հոսանքի հիդրավիկ պարամետրերի միջև կապ հաստատող ընդհանրացված արտահայտություն, որի օգնությամբ հնարավոր է նաև կանխագուշակել հունակագմական երևույթի կարևոր բնութագրերը:

P. H. BALJYAN

DEFINITION OF DEPENDENCE BETWEEN HYDRAULIC FLOW PARAMETERS AT THEIR DRIFT- BEARING CAPACITY CONSTANCY

Generalization of dependence for solving those problems of river bed processes in which the drift balance takes place is considered. Based on the development result analysis of a large number of expressions by defining the drift-bearing flow capacity, a relation between hydraulic parameters of free cross-sectional area allowing at the given flow magnitudes before beginning of the bed formation to predict their values after the completion of the process is deduced.

Э.П. АЩИАНЦ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ СВОБОДНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ В ВОДОНАПОРНОЙ КОЛОННЕ

Разработана методика расчета амплитуды колебания горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне при установке диафрагмы у ее основания.

Ключевые слова: водонапорная колонна, диафрагма, амплитуда колебаний.

Надежным способом гашения гидравлического удара в нагнетательном водоводе насосной установки при незначительной высоте подъема воды и малой инерции вращающихся масс насосных агрегатов является использование водонапорной колонны, установленной в начале водовода после обратного клапана (см. рис.).

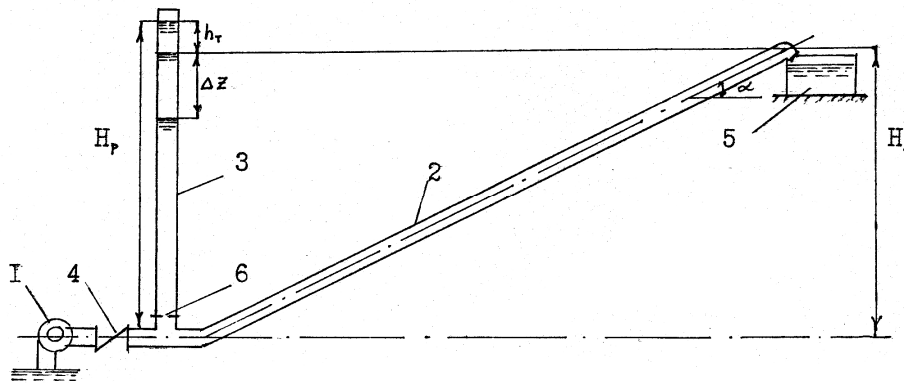


Рис. Схема нагнетательного водовода с водонапорной колонной:

1-насос; 2-нагнетательный трубопровод; 3-водонапорная колонна; 4-обратный клапан; 5-приемный бассейн; 6-диафрагма

Водонапорная колонна представляет собой одну из разновидностей уравнивающих резервуаров, используемых на напорных водоводах ГЭС.

Гидравлический расчет амплитуды колебаний уровня воды в водонапорной колонне несколько проще, чем в уравнивающих резервуарах. Этому способствует следующее обстоятельство. При отключении электропитания двигателя насоса давление, развиваемое насосом в течение очень малого промежутка времени (секунда или доли секунды), резко уменьшается и становится значительно меньше статического уровня в водонапорной колонне. За такой промежуток времени уровень свободной поверхности воды в

водонапорной колонне не в состоянии значительно понизиться, что вызывает перепад давления до и после обратного клапана, в результате чего он закрывается, и подача воды насосом прекращается.

При стационарном режиме работы насосной установки уровень горизонта воды в водонапорной колонне равен $H_p = H_0 + h_t$, где H_0 - статический напор в начале водовода; h_t - потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений.

При отключении электропитания двигателя насоса 1 (см. рис.) в напорной системе возникает нестационарный процесс, начинающийся с понижения давления. В этот промежуток времени в нагнетательном водоводе 2 имеет место явление гидравлического удара с последующим колебанием колонны жидкости. Понижение уровня свободной поверхности воды в водонапорной колонне 3 определяется запасом кинетической энергии колонны жидкости в нагнетательном водоводе, диаметром водонапорной колонны, наличием гидравлических сопротивлений и другими факторами. Так же, как и в уравнильных резервуарах ГЭС [1,2], с целью уменьшения амплитуды колебаний горизонта вода в водонапорной колонне у е, основания рекомендуется устанавливать диафрагму 6 (см. рис.).

При установке водонапорной колонны основной задачей гидравлического расчета является определение оптимального диаметра водонапорной колонны и площади отверстия диафрагмы, при которых обеспечивается допускаемая амплитуда колебаний горизонта воды в водонапорной колонне.

Диаметр трубы водонапорной колонны вначале рекомендуется принимать равным диаметру нагнетательного водовода.

При установке у основания водонапорной колонны диафрагмы, для исключения возможности образования в начале водовода при понижении давления разрыва сплошности потока, минимальная площадь отверстия диафрагмы определяется исходя из необходимости выполнения условия

$$V_0 A_1 = A_d \sqrt{2gH_0} / \sqrt{1 + \xi_d}, \quad (1)$$

где V_0 - скорость течения жидкости в нагнетательном трубопроводе при стационарном режиме работы насосной установки; A_1 - площадь сечения нагнетательного водовода; A_d - площадь отверстия диафрагмы; ξ_d - коэффициент гидравлического сопротивления диафрагмы, определяемый по формуле [3]

$$\xi_d = \left(\frac{A_k}{\varepsilon A_d} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

A_k - площадь сечения водонапорной колонны; ε - коэффициент сжатия.

Имея в виду (2), минимальная площадь отверстия диафрагмы определяется из равенства

$$\left(\frac{A_k}{\varepsilon A_d} - 1 \right)^2 = \left(\frac{A_d}{A_1} \right)^2 \frac{2gH_0}{V_0^2} - 1. \quad (3)$$

При нестационарном процессе волновые явления в нагнетательном водоводе быстро затухают, а колебания горизонта свободной поверхности воды водонапорной колонны будут иметь значительный промежуток времени. Поэтому основным динамическим уравнением движения колонны жидкости для рассматриваемой напорной системы является уравнение Д. Бернулли для нестационарного течения.

Если за плоскость сравнения принять уровень статического напора - H_0 в начале водовода, то уравнение, составленное для сечений, взятых на свободной поверхности воды в водонапорной колонне и на конце нагнетательного водовода, может быть представлено в виде

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{V^2}{2g} + \xi_d \frac{V_1^2}{2g} + \xi_\ell \frac{V^2}{2g} + \frac{\ell}{g} \frac{dV}{dt}, \quad (4)$$

где $Z_1 = h_T - \frac{A_1}{A_k} S$; S – расстояние, пройденное колонной жидкости в нагнетательном водоводе; $h_T = -\frac{\lambda_0 \ell}{S} \frac{V^2}{2g}$; ℓ -- длина нагнетательного водовода; $\xi_\ell = \lambda_0 \ell / D$; $V_1 = \frac{A_1}{A_k} V$; V – средняя скорость течения жидкости в нагнетательном водоводе; g – ускорение силы тяжести; t – время.

Заменяя в (4) переменную t на S , получим дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dy}{dS} + py = a - bS, \quad (5)$$

где $y = V^2$; $P = [1 - \left(\frac{A_1}{A_k}\right)^2 + \left(\frac{A_1}{A_k}\right)^2 \xi_d + \xi_\ell] / \ell$; $a = 2gh_T / \ell$; $b = 2g \frac{A_1}{A_k} / \ell$.

Интегрируя уравнение (5) при начальном условии $S=0$, $V=V_0$, получим зависимость, определяющую изменение скорости течения колонны жидкости при ее замедленном движении в зависимости от переменной S :

$$V = \sqrt{V_0^2 e^{-PS} + \frac{a}{p}(1 - e^{-PS}) - \frac{b}{p^2}(e^{-PS} + PS - 1)}. \quad (6)$$

При $P \rightarrow 0$ зависимость (6) принимает вид

$$V = \sqrt{V_0^2 - \frac{g}{\ell} S^2}. \quad (7)$$

Приравнявая выражение (7) нулю, определяем максимальное расстояние - $S_{\max}$, пройденное колонной жидкости в нагнетательном водоводе:

$$S_{\max} = V_0 \sqrt{\ell A_k / g A_1}. \quad (8)$$

Исходя из условия неразрывности течения $A_1 S_{\max} = A_k Z_{\max}$, где $Z_{\max}$ - максимальная величина понижения горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне, получим

$$Z_{\max} = V_0 \sqrt{\ell A_1 / g A_k}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что для уменьшения амплитуды колебаний уровня свободной поверхности воды в водонапорной колонне необходимо, чтобы $A_k > A_1$.

Зависимости (7)-(9) представляют в основном теоретический интерес. В действительности, из-за наличия влияния гидравлических сопротивлений, как это видно из (6), понижение уровня воды в водонапорной колонне будет значительно меньше.

После остановки колонны жидкости она начинает двигаться в обратном направлении благодаря возникшему перепаду горизонтов свободной поверхности воды $-\Delta Z$ на конце нагнетательного водовода и в водонапорной колонне:

$$\Delta Z = Z_{\max} - h_T. \quad (10)$$

Если $\Delta Z \leq h_T$, то дальнейшее определение величины повышения горизонта воды в водонапорной колонне не представляет практического интереса, так как это превышение над статическим уровнем не будет больше величины h_T .

При обратном течении жидкости в нагнетательном водоводе возникший ранее перепад ΔZ будет уменьшаться в зависимости от расстояния S , пройденного колонной жидкости. При расчетной схеме водовода, представленной на рисунке, изменение перепада уровней в зависимости от расстояния S можно представить в виде

$$\Delta Z - \left(\frac{A_1}{A_k} + \sin \alpha \right) S, \quad (11)$$

где α - угол наклона нагнетательного водовода к горизонту.

Под действием указанного перепада давления обеспечивается образование обратной скорости течения, преодоление гидравлических сопротивлений в нагнетательном водоводе и водонапорной колонне и возникновение инерционного напора. Таким образом, уравнение Бернулли для переходного процесса будет иметь вид

$$\Delta Z - \left(\frac{A_1}{A_k} + \sin \alpha \right) S + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{V^2}{2g} + \xi_d \frac{V_1^2}{2g} + \xi_\ell \frac{V^2}{2g} + \frac{\ell_1}{2g} \frac{dV}{dt}, \quad (12)$$

где $\ell_1 = \ell_T + \ell_K$; ℓ_T - длина нагнетательного водовода; ℓ_K - длина колонны жидкости в водонапорной колонне, принимаемая равной $\ell_K = H_0 - \Delta Z$.

Так как $V_1 = \frac{A_1}{A_K} V$, то выражение (12) можно представить в виде

$$\Delta Z - \left(\frac{A_1}{A_K} + \sin \alpha \right) S = \frac{V^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_d \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_\ell \right] + \frac{\ell_1}{2g} \frac{d(V^2)}{dS}. \quad (13)$$

Так же, как и ранее, интегрируя уравнение (13) при начальном условии $S=0, V=0$, получим

$$V_{об} = \sqrt{\frac{a_1}{P_1} (1 - e^{-P_1 S}) - \frac{b_1}{P_1} (e^{-P_1 S} + P_1 S - 1)}, \quad (14)$$

где $P_1 = \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_d \left(\frac{A_1}{A_K} \right)^2 + \xi_\ell \right] / \ell$; $a = 2g\Delta Z / \ell$; $b_1 = 2g \left(\frac{A_1}{A_K} + \sin \alpha \right) / \ell$.

Приравнявая выражение (14) нулю, определяем расстояние, пройденное колонной жидкости при обратном движении, и соответственно повышение уровня свободной поверхности воды в водонапорной колонне над статическим уровнем.

Пример. Определим максимальную амплитуду колебания горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне, установленной в начале нагнетательного водовода (рис.), при внезапном обесточивании электродвигателя насоса. Основные расчетные данные следующие: длина нагнетательного водовода $\ell = 500$ м; высота подъема воды $H_0 = 9$ м; диаметр нагнетательного водовода $D = 0,4$ м; скорость течения воды в нагнетательном водоводе при стационарном режиме работы насосной установки $V_0 = 1,5$ м/с; коэффициент гидравлического сопротивления по длине водовода $\lambda_0 = 0,021$; потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений в начале водовода $h_T = 3$ м.

Диаметр водонапорной колонны принимается равным диаметру нагнетательного водовода, т.е. $D_1 = D_K$ и $A_1 = A_K$.

Для решения задачи вначале из равенства (3) определяем диаметр отверстия диафрагмы, принимая значение коэффициента сжатия равным $\varepsilon = 0,65$:

$$\left(\frac{0,4}{0,65 d_d^2} - 1 \right) = \left(\frac{d_d^2}{0,4^2} \right) \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 9}{1,5^2}.$$

Равенство удовлетворяется при $d_d = 0,24$ м.

Имея значение d_d , по формуле (2) определяем значение коэффициента сопротивления диафрагмы ξ_d :

$$\xi_d = \left(\frac{0,4^2}{0,65 \cdot 0,245^2} - 1 \right)^2 = 9,6.$$

Далее определяем значения параметров p , a и b , входящих в зависимость (6):

$$P = \left[1 - \left(\frac{0,4}{0,4} \right)^2 + \left(\frac{0,4}{0,4} \right)^2 \cdot 9,6 + \frac{0,021 \cdot 500}{0,4} \right] / 500 = 0,072 \text{ 1/м.}$$

$$a = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 3}{500} = 0,118 \text{ м/с}^2; \quad \dot{a} = \frac{2 \cdot 9,81}{500} = 0,393 \text{ 1/с}^2.$$

Подставляя значения указанных параметров в (6) и приравнявая нулю, получим

$$1,5^2 \cdot e^{-0,0729} + \frac{0,118}{0,072} (1 - e^{-0,0725}) - \frac{0,393}{(0,072)^2} (e^{-0,00729} +), 0729 - 1) = 0.$$

Равенство удовлетворяется при $S=3,75 \text{ м.}$

Так как $A_1=A_k$, то максимальная амплитуда колебания горизонта воды в водонапорной колонне будет равна 3,75 м. В дальнейшем эта амплитуда будет существенно уменьшаться.

Таким образом, как показывают расчеты, гидравлические сопротивления существенно уменьшают амплитуду колебаний горизонта свободной поверхности воды в водонапорной колонне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование водной энергии / Под ред. Д. С. Щавелева -Л.: Энергия, 1976.-656 с.
2. Аронович Г.В., Картвелишвили Н. А., Любимцев Я. К. Гидравлический удар и уравнильные резервуары. - М.: Наука, 1968. - 248 с.
3. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика - М.: Стройиздат, 1987. - 414 с.

Инт-т водных проблем и гидротехники. Материал поступил в редакцию 02.02.2004.

Է.Պ. ԱՇԿՅԱՆՑ

ԶԴԱՆՇՈՒՄԱՅԻՆ ՍՅՈՒՆՈՒՄ ԶԴԻ ԱՁԱՏ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՑԹԻ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՏՍՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԱՄՊԼԻՏՈՒԴԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Մշակված է ջրաճնշումային սյունում ջրի ազատ մակերևույթի հորիզոնի տատանման ամպլիտուդի հաշվարկային մեթոդիկան, սյունի հիմքում դիաֆրագմայի տեղադրման դեպքում:

E.P. ASCHYANTS

DETERMINATION OF FREE WATER SURFACE LEVEL OSCILLATION AMPLITUDE IN WATER HEAD COLUMN

Free water surface horizon oscillation amplitude calculation technique in a water head column while setting up the diaphragm at its base is developed.

СЛОВО О ГЕНИИ

(к 100 - летию Андраника Иосифьяна)

21-го июля 2005г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося ученого, основоположника специальной и космической электромеханики, Героя социалистического труда, Лауреата Ленинской и Государственной премий, заслуженного деятеля науки и техники России и Армении, академика Национальной академии наук Армении **Андраника Иосифьяна**.



Он родился в семье учителя в карабахском селе Цмакаог. В 1922 году вступил добровольцем в армию. После демобилизации из армии поступил в институт. Уже в студенческие годы проявилось исключительное его дарование. Будучи студентом последнего курса, представил свое первое изобретение “Электрическая винтовая пушка”. После окончания института Иосифьян был приглашен на работу во Всесоюзный энергетический институт, где проработал до 1941г. В этом институте он сформировался как ученый и в свои 35 лет стал доктором технических наук, профессором. К этому периоду относятся уникальные разработки Иосифьяна по созданию электрических пулеметов и орудий дальнего боя, линейных двигателей для разгона,

изобретение бесконтактного сельсина и на этой основе создание обобщенной теории электрических машин и др.

Изобретение бесконтактного сельсина не только сыграло исключительно важную роль в развитии следящего привода в космической, авиационной и военной технике, но и положило начало созданию целого поколения высокоскоростных бесконтактных электрических машин с внешнезамкнутым и внутризамкнутым потоком.

Через три месяца после войны для разработки и выпуска военной электротехники в Москве был создан Государственный союзный завод N 627, и 36-летний Иосифьян был назначен директором этого завода.

Под руководством Иосифьяна завод впоследствии перерос в крупнейшую электротехническую империю – Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики, (ВНИИЭМ), который в настоящее время носит его имя.

Трудно переоценить значение ВНИИЭМ в становлении и развитии ракетно-космической техники. В конце 40-х годов Иосифьян назначается Главным конструктором бортового электротехнического оборудования ракет и космических аппаратов и включается в состав Совета главных конструкторов С.Королева, затем и М.Янгеля.

Создаваемое электротехническое оборудование, предназначенное для эксплуатации в космосе, нуждалось в космических испытаниях. Под руководством Андраника

Гевондовича впервые в мировой практике создается космическая электротехническая лаборатория “Омега”. Отмечу, что в этой разработке принимал участие также созданный Иосифьяном в Ереване филиал ВНИИЭМ, переросший впоследствии в крупный научно-исследовательский институт ВНИИ комплектного электрооборудования – головной союзный институт по разработке систем автономного электроснабжения.

Одним из наиболее крупных успехов ВНИИЭМ во главе с Иосифьяном является выигрыш в конкурсе проектов метеорологических спутников, определивший тематику института на многие годы вперед.

В качестве конкурента выступало знаменитое КБ “Южное” во главе с академиком М.Янгелем. Изюминкой проекта, предложенного Иосифьяном, являлась трехосная ориентация спутника с использованием впервые шарового электродвигателя-маховика. Сегодня ВНИИЭМ им. Иосифьяна является единственной организацией России, разрабатывающей метеорологические искусственные спутники Земли.

Десятки исполнений космических станций “Космос”, “Метеор”, “Метеор-природа”, “Ресурс”, “Электро”, “Омега” и др., разработанных под руководством Главного конструктора Иосифьяна, в разное время выводились на орбиту. В настоящее время уникальная космическая система “Метеор” выполняет важную миссию, обеспечивая необходимой оперативной метеорологической информацией с высокой точностью географической привязки получаемых измерений, а также изображений облачных полей и земной поверхности. Ежегодно информация о сотнях обнаруженных циклонов, тысячах атмосферных фронтов оперативно со спутников системы “Метеор” передается соответствующим наземным службам, службам морского флота и авиации.

Под руководством Иосифьяна в начале 60-х годов разворачиваются работы по созданию энергетической системы подводных лодок. Требовалось обеспечить исключительно высокие требования к создаваемому электрооборудованию – маложумность, маломощность, высокоиспользованность и автоматизированность. Параллельно с разработкой и созданием электрооборудования для конкретных подводных лодок была сформирована новая научная идея для перспективных атомных подводных лодок по решению проблемы создания системы электродвижения атомных подводных лодок с использованием сверхпроводниковых гребных электрических двигателей и сверхпроводниковых турбогенераторов.

Сложность поставленной задачи заключается в том, что для функционирования сверхпроводящей магнитной системы электрической машины температура сверхпроводящей обмотки не должна превышать критической температуры. Так, для сверхпроводника на основе сплава ниобий-титан – это температура кипения жидкого гелия.

Под руководством Иосифьяна был решен целый комплекс научных и конструкторско-технологических проблем. В частности, был разработан специальный пропиточный компаунд, позволяющий эффективно эвакуировать тепловыделение катушки в зону хладагента.

Такую сверхзадачу мог поставить только такой ученый-романтик, как Иосифьян. К сожалению, после ухода из жизни Андраника Гевондовича эти весьма перспективные работы не нашли своего логического завершения.

В конце 70-х гг., когда началось бурное развитие атомной энергетики, Андраник Гевондович назначается научным руководителем работ по созданию комплекса электрооборудования для атомных электростанций. Созданная система “Скала”, включающая в себя не только автоматизированную систему управления и защиты реактора, но и систему гарантированного питания, по сей день успешно эксплуатируется на многих атомных электростанциях.

Наряду с решением сложнейших и важнейших задач в области специальной электротехники, Андраник Гевондович уделял немало времени созданию электротехнических изделий общепромышленного назначения. Под его руководством были разработаны первые серии электрических машин (до 100кВт) и аппаратов, затем (1946-49гг.) единая серия асинхронных двигателей А и АО. Несомненно, наиболее высоким достижением в области общепромышленной электротехники явилось создание (1968-1972гг.) под научным руководством Иосифьяна в рамках международной интеграции (СЭВ) серии асинхронных двигателей 4А, а впоследствии - серии микродвигателей с постоянными магнитами (ДМП).

С внедрением этих гистерезисных двигателей родилось новое направление – силовая гироскопия.

Андраник Гевондович, славившийся своими удивительными способностями доводить любую разработку до “железа”, находил время для глубинных теоретических изысканий. Свои первые работы по теории поля он опубликовал в 60-ые годы: “К вопросу об уравнениях взаимодействия электричества и вещества” (1955г.), “Вопросы единой теории электромагнитных и гравитационно-инерционных полей” (1959г.).

В 70-х годах Иосифьян предлагает использовать всеобщий принцип действия к электромагнитным явлениям и обосновывает уравнение действия для электромагнитного поля. В 80-х годах в журнале “Электричество” в своих статьях “Эволюция физических основ электродинамики” (1987, 1989гг.) Андраник Гевондович открывает весьма интересную дискуссию по фундаментальным проблемам классической и квантовой электродинамики.

Особо следует отметить вклад Иосифьяна в развитие науки и промышленности Армении. Как большой патриот своей родины Андраник Гевондович не мог остаться безучастным в решении этих важнейших проблем. Будучи директором ВНИИЭМ, насчитывающего свыше 25 тысяч человек, он одновременно избирается вице-президентом Академии наук Армении.

По существу, электротехническая, радиотехническая и электронная наука и промышленность в Армении были созданы по инициативе и постоянной поддержке Иосифьяна.

Всесоюзный научно-исследовательский институт комплексного электрооборудования первоначально был создан как Ереванский филиал ВНИИЭМ. Впоследствии он стал головной организацией по системам автономного электроснабжения наземного и надводного мобильного базирования. Уникальные разработки этого института по сей день выпускаются для электроснабжения систем управления ракетными комплексами.

Практически все созданные в институте изделия выпускались на Армэлектрозаводе, что превратило это предприятие в крупнейшего производителя систем автономной

энергетики. Достаточно сказать, что в 90-ые годы Армэлектрозавод выпускал 40% средств автономного электроснабжения, производимых в стране.

По инициативе Иосифьяна в Ереване был создан второй крупнейший институт – Ереванский научно-исследовательский институт математических машин. Институт за короткое время стал головным предприятием по разработке отрезка единой серии электронных вычислительных машин. Была создана уникальная автоматизированная система управления, которая эксплуатируется по сей день.

Создав в Москве в 1962 году первые образцы малогабаритной электронной вычислительной машины М-3, Андраник Гевондович посылает одну из них в Ереван, и на ее базе создается первый в Армении Вычислительный центр Академии наук, сыгравший громадную роль в становлении и развитии вычислительной науки в республике.

Далее СКБ “Транзистор” в Ереване, НИИ “Автоматика” в Кировакане, комплекс предприятий электронной промышленности в Абовяне – вот далеко не полный перечень уникальных научно-производственных предприятий, созданных при содействии Иосифьяна вместе с другими образовательными, научными и промышленными предприятиями, определившими лицо Армении 50-х – 80-х годов.

Андраник Гевондович был великим ученым-романтиком, неустанным энтузиастом, большим патриотом, посвятившим свою жизнь становлению и развитию науки и техники своей страны.

Он был исключительно добрым, отзывчивым и ранимым человеком.

Мне выпало большое счастье иметь дело с гением.

Академик А. Терзян

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Լ., ԲԱՅՍ Պ.

Փոշենցոնիթերից ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԳԼԱՆՆԵՐԻ ԿՈՆՏԱԿՏԱՅԻՆ
ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆ ԳՈՐԾԸԹԱՑՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ 203

ՇԵԿՅԱՆ Հ.Հ., ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ Ա.Ա.

ՏԵՆԶՈՂԻՆԱՍՈԳՐԱՖԻԿԱԿԱՆ ՀԱՐԹԱԿԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏ ԿՈՇՏՈՒԹՅՈՒՆԸ 209

ՄԱՀՐԱԴՅԱՆ Ա.Ի.

ՏԱՇԵՂԻ ԿԾԿՄԱՆ ԳՈՐԾԱԿՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ՏԱՐԲԵՐ ԳՈՐԾԻՔԱՆՅՈՒԹԵՐՈՎ
ՊՈՂՊԱՏՆԵՐԻ ԵՎ ՀԱՄԱԶՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ
..... 213

ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Ս.Պ.

ԳԼԴԻԿԱՎՈՐ ԱՌԱՅՔԱԿԱԼՆԵՐՈՒՄ ԳԼՈՐՄԱՆԸ ԴԻՄԱԴՐՈՂ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ
ՄՈՄԵՆՏԻ ԱՌԱԶԳԱԿԱՆ ՀԻՍՏԵՐԵԶԻՄՈՎ ՊԱՅՄԱՆԱՎՈՐԿԱԾ ԲԱՂԱԴՐԻՉԻ
ՀԱՇՎԱՐԿԻ ԻՆԺԵՆԵՐԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԸ 218

ՆԱՎՈՅԱՆ Ս.Հ., ՄԻՍՈՆՅԱՆ Ս.Մ., ԲԱԼԱՅԱՆ Վ.Ա., ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ Է.Գ.

ԿՏՐՈՂ ՄԵՊԻ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ ՉԱՓՈՒՄՆ ԸՆԴՀԱՏ ԿՏՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ ... 229

ՄԱՀԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Ա.Ա., ՄԱՀԱԼՅԱՆ Ա.Ս.

ԲԱՐՁՐԱՑՎԱԾ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ
ԼԵԳԻՐՎԱԾ ՓՈՇԵԱՐՏԱԴՐԱՏԵՄԱԿՆԵՐԻ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ 233

ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Ա.Ն., ԳՐԻԲՈՎԱԻ.Ա., ԿՐԱՄՆՈՎ Ա.Պ.,

ՍՏՈՒԴՆԵՎ Յ.Ն., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Ա.Կ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Կ.Վ.

ՖՏՈՐ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ՕԼԻԳՈՄԵՐՆԵՐՈՎ ԶԵՎԱՓՈԽՎԱԾ ՀԱՅԿԱԿԱՆ
ԼՑԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒ-
ԹՅՈՒՆԸ 243

ԳԵՈՔՉՅԱՆ Օ.Ղ., ՄԿՐՉՉՅԱՆ Լ.Հ., ՊՈՂՈՍՅԱՆ, ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ Ա.Գ.,

ՄԱՎՉԵՆԿՈՂ Լ.Ս.

ԿԵՐԱՄԻԿԱԿԱՆ ՆԵՐԿԵՐԻ ՀԱՄԱՐ ՈՍԿԻ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ ՊԻԳՄԵՆՏԻ ՍՏԱՅՄԱՆ
ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄ 251

ՄԱՐԳՍՅԱՆ Վ.Ս., ՄԱԻԼԽԱՆՅԱՆ Հ.Ա.

ՓԼՈՒԶՄԱՆ ՊՐԻԶՄԱՅԻ ՇԵՐՏԵՐԻ ԿՈՂԱՅԻՆ ՆԻՍՏԵՐԻ ՎՐԱ ՍԱՀՔԻ ԱՆԿՅԱՆ
ՍԱՀՄԱՆԱՅԻՆ ԱՐԺԵՔԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԵԹՈԴ՝ ԳՐՈՒՆԱՅԻՆ ԶԱՆԳՎԱԾԻ
ԱՆՀԱՄԱՍԵՈ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԴԵՊՔՈՒՄ 254

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ՄՆԱՅԱԿԱՆՅԱՆ Ս. Ա.

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԿՏԻՎ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՍՏԻ
ԹՈՒՅԼԱՏՐԵԼԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆ ԱՃԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՏՐՈՀՄԱՆ ՄԵԹՈԴՈՎ 260

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Վ.Գ.

ԱԷԿ-Ի ԱՆՎՏԱՆԳՈՒԹՅԱՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ԲԱՐՁՐԱՅՈՒՄԸ ԱՊԼՀ-Ի ՄԻՋՈՑՈՎ 269

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Լ. Ա.

ՇԵՆՔԵՐԻ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ՊԱՍԻՎ ԶԵՌՈՒՑՄԱՆ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՄԵԹՈԴ 275

ՀԱԿՈԲՉԱՆՅԱՆ Գ.Դ., ՄԱՖԱՐՅԱՆ Վ.Ս.

ՀԱՄԱՍԵՈ ՇՂԹԱՅԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆ 285

ՅՈՆԴԵՍ Մ.Ե.

ՄԿԱՎԱՌԱԿԱԶԵՎ ԽԱՐԻՍԽՈՎ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄԵՔԵՆԱ
..... 291

ԱԶԱՐՅԱՆ Ս.Հ.

ՏԱՐԱԾԱԿԱՆ ՏԵՂԱՇԱՐԺԻ ՊՈՆԴԵՐՈՍՈՏՈՐ ՓՈԽԱԿԵՐՊԻՉ 295

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ո.Ս., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ., ՄԱՆԱՍՅԱՆ Վ.Ա.,

ՓԻՐՈՒՄՅԱՆ Հ.Ա., ԶԱԼԻՅԱՆ Վ.Պ.

ԹՎԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԻՆՏԵՐՖԵՐԵՆՑԻՈՆ

ՌԱԴԻՈԴԻՏԱԿԻ ՄԻ ՇԱՐՔ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԼԱՎԱՅՈՒՄ	302
ԳԱՄՊԱՐՅԱՆ Ֆ.Վ., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Վ.Մ., ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ Վ.Վ.	
ԱՆՀԱՄԱՍԵՌ ԼԵԳԻՐԱՑՎԱԾ p-n ԱՆՑՄԱՆ ՋԵՐՄԱԷԼԵՈՒՆ	307
ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ ՅՈՒ.Հ., ՀԱԽՈՒՄՅԱՆ Ա.Ա., ԹԱԴԵՎՈՍՅԱՆ Վ.Ռ., ՄԵԼԻՔՅԱՆ Հ.Կ.	
ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ՃՈՃՔՈՎ ԱԼԵԱՐԶԱԿ՝ ՊԱՐԲԵՐԱԿԱՆ ՃԵՂՔԵՐՈՎ ՀԱՅԵԼԱՅԻՆ ԴԻԷԼԵԿՏՐԻԿ ԱԼԻՔԱՏԱՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ	318
ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Վ.Հ.	
ՉԱՓԻՉ ԳԾԻ ՄԻՋՈՑՈՎ ԲԱԶՄԱԼԻՔ ԿԱՐՃ ՏՐԱԿՏՆԵՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ	323
ԹԵՐԶՅԱՆ Հ.Ա., ՍՈՒՔԻՍՅԱՆ Հ.Ս., ՊԱՐՈՆԻԿՅԱՆ Ա.Ե.	
ԸՆԴՀԱՏԱՎՈՐՄԱՆ ՑԱՆՑԻ ՏԱՐԲԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿ ԿՈՄՊՈԶԻՑԻԱՅՈՎ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐԲԵՐԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԱՍԻՆ	332
ՄԻՍՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԲԱԴԱԼՅԱՆ Լ.Ա.	
ԳՐԵՎԻԼԻ ՄԵԹՈԴԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ-ԹԵՅԼՈՐՅԱՆ ՆՄԱՆԱԿԵՐՊԸ ՈՉ ԱՎՏՈՆՈՍ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ	340
ՍՈՂՈՍՈՆՅԱՆ Կ.Հ., ԹՈՒՄՆՅԱՆ Կ.Ա., ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ Զ.Ն., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Ն.Լ.	
ԲԱԶՄԱԶՈՓ ՏԱՐԱԾՈՒԹՅԱՆ m - ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ՋԵՎԱԿԱԶՄԱՎՈՐՄԱՆ ՊՐՈՑԵԿՏԻՎ ԱԼԳՈՐԻԹՄԸ	354
ԳԱՄՊԱՐՅԱՆ Օ.Ն., ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ Գ.Ա.	
ՆՈՐՄԱԼ ՓՈԽԱՆՑՄԱՆ ՄԱՏՐԻՑՈՎ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱԿԱՊ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԲԱՅԱՐԶԱԿ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅՈՒՆԸ	359
ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ռ.Գ., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Է.Վ.	
ՀԵԼԻՈԿԱՅԱՆՔԸ ԴԵՊԻ ԱՐԵԳԱԿԸ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՈՂ ԱՎՏՈՄԱՏ ՀԱՄԱԿԱՐԳ	368
ՍՈՒՐԱՅԱՆ Մ.Ա., ՄՈՎՍԵՍՅԱՆ Ռ.Վ.	
ՆՎԱԶԱԳՈՒՅՆ ՔԱՌԱԿՈՒՄԻՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ԷԼԵԿՏՐԱՄՐՏԱԳՐԻ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՀԱՏՎԱԾՆԵՐԻ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱՐ	372
ԲԱԼԶՅԱՆ Պ.Հ.	
ՀՈՍԱՆՔՆԵՐԻ ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԿԱՊԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ԲԵՐՎԱԾՔԱՏԱՆՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ	380
ԱՇՉԻՅԱՆՑ Է.Պ.	
ԶՐԱՃՆՇՈՒՄԱՅԻՆ ՍՅՈՒՆՈՒՄ ԶՐԻ ԱԶԱՏ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԱՄՊԼԻՖՏՈՒԴԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ	386
ԽՈՍՔ ՀԱՆՃԱՐԻ ՄԱՍԻՆ (Ա. ԻՈՍԻՅՅԱՆԻ 100-ամյակի առթիվ)	392

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕТРОСЯН Г.Л., БАЙС П. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЕЧЕННЫХ ПОРОШКОВЫХ ЦИЛИНДРОВ	203
ШЕКЯН Г.Г., МЕЛКОНЯН А.А. ЭФФЕКТИВНАЯ ЖЕСТКОСТЬ ТЕНЗОДИНАМОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ	209
САГРАДЯН А.И. ИССЛЕДОВАНИЕ УСАДКИ СТРУЖКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ И СПЛА- ВОВ РЕЗЦАМИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	213
МАНУКЯН С.П. ИНЖЕНЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОБЩЕГО МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ В ШАРИКОВЫХ ПОДШИПНИКАХ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ УПРУГИМ ГИСТЕРЕЗИСОМ	218
НАВОЯН М.О., СИМОНЯН М.М., БАЛАЯН В.А., ОВСЕПЯН Э.Г. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЗАНИИ	229
АГБАЛЯН С.Г., ПЕТРОСЯН А.А., АГБАЛЯН А.С. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНО – ЛЕГИРОВАН- НЫХ ПОРОШКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ	233
КАРАПЕТЯН А.Н., ГРИБОВА И.А., КРАСНОВ А.П., СТУДНЕВ Ю.Н., ПОГОСЯН А.К., ОГАНЕСЯН К.В. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ АРМЯНСКИХ МИНЕРАЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФТОРСОДЕРЖАЩИМИ ОЛИГОМЕРАМИ	243
ГЕОКЧЯН О.К., МКРТЧЯН Л.А., ПОГОСЯН М.А., АМБАРЦУМЯН А.Г., САВЧЕНКО Л.М. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗОЛОТОСО- ДЕРЖАЩЕГО ПИГМЕНТА ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ КРАСОК	251
САРКИСЯН В.С., АДИЛХАНИЯН Г.А. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНОГО УГЛА СДВИГА НА БОКОВЫХ ГРАНЯХ ФРАГМЕНТОВ ПРИЗМЫ ОБРУШЕНИЯ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ СТРОЕНИИ ГРУНТОВОГО МАССИВА	254
ХАЧАТРЯН В.С., МНАЦАКАНЯН М.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРИРОСТОВ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦИИ	260
ПЕТРОСЯН В.Г. ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ	269
ХАЧАТРЯН Л.А. МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ПАССИВНОГО ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ	275
АКОПДЖАНИЯН Г.Д., САФАРЯН В.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ ЦЕПНЫХ СХЕМ	285
ЙОНДЕМ М.Е. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ДИСКООБРАЗНЫМ	

ЯКОРЕМ	291
АЗАРЯН М.Г.	
ПОНДЕРОМОТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	295
МАРТИРОСЯН Р.М., ГУЛЯН А.Г., САНАМЯН В.А., ПИРУМЯН Г.А., ЗАЛИНЯН В.П.	
УЛУЧШЕНИЕ РЯДА ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА МЕТОДОМ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА	302
ГАСПАРЯН Ф.В., АРУТЮНЯН В.М., БУНИАТЯН В.В.	
ТЕРМО-ЭДС НЕОДНОРОДНО-ЛЕГИРОВАННОГО р-п ПЕРЕХОДА	307
АВЕТИСЯН Ю.О., АХУМЯН А.А., ТАТЕВОСЯН В.Р., МЕЛИКЯН А.К.	
ЧАСТОТНО - СКАНИРУЮЩАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЩЕЛЯМИ	318
АВЕТИСЯН В.Г.	
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКИХ МНГОВОЛНОВЫХ ТРАКТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ	323
ТЕРЗЯН А.А., СУКИАСЯН Г.С., ПАРОНИКЯН А.Е.	
О РАСЧЕТЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДИНАМИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДИСКРЕТИЗАЦИИ	332
СИМОНЯН С.О., БАДАЛЯН Л.А.	
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТЕЙЛОРОВСКИЙ АНАЛОГ МЕТОДА ГРЕВИЛЛЯ ДЛЯ НЕАВТОНОМНЫХ МАТРИЦ	340
СОГОМОНЯН К.А., ТУМАНЯН К.А., ДАЛЛАКЯН ДЖ.Н., КАЗАРЯН Н.Л.	
ПРОЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ m – ПОВЕРХНОСТЕЙ МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВ	354
ГАСПАРЯН О.Н., АЛЕКСАНИЯН Г.А.	
АБСОЛЮТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С НОРМАЛЬНЫМИ ПЕРЕДАТОЧНЫМИ МАТРИЦАМИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ	359
ХАЧАТРЯН Р.Г., КАЗАРЯН Э.В.	
СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО НАВЕДЕНИЯ ГЕЛИОУСТАНОВКИ НА СОЛНЦЕ	368
МУРАДЯН М.А., МОВСЕСЯН Р.В.	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СЕГМЕНТОВ ЭКГ	372
БАЛДЖЯН П.О.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТ- РАМИ ПОТОКОВ ПРИ ПОСТОЯНСТВЕ ИХ НАНОСОНЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ	380
АЩИЯНЦ Э.П.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ В ВОДОНАПОРНОЙ КОЛОННЕ	386
СЛОВО О ГЕНИИ (к 100 - летию Андраника Иосифьяна)	392

CONTENTS

PETROSYAN G., BEISS P. THE INVESTIGATION OF PROCESS CONTACT DEFORMATION OF SINTERED PM CYLINDERS	203
SHEKYAN G.G., MELKONYAN A.A. EFFECTIVE RIGIDITY OF STRAIN DYNAMO MICROGRAPHY PLATFORM	209
SAGRADYAN A.I. CHIP SHRINKAGE STUDY IN STEEL AND ALLOY MACHINING BY CUTTERS MADE FROM TOOL MATERIALS	213
MANUKIAN S.P. ENGINEERING CALCULATION MODEL OF ONE CONSTITUENT PART OF GENERAL RESISTANCE TO THE ROCKING MOMENT IN BALL- BEARINGS DUE TO ELASTIC HYSTERESIS	218
NAVOYAN M.H., SIMONYAN M.M., BALAYAN V.A., HOVSEPYAN E.G. CUTTING WEDGE TEMPERATURE MEASUREMENT DURING INTERRUPTED CUTTING	229
AGHBALYAN S.G., PETROSYAN A.A., AGHBALYAN A.S. TECHNOLOGY FOR OBTAINING SURFACE - ALLOYED POWDER PARTS WITH INCREASED MECHANICAL PROPERTIES	233
KARAPETYAN A.N., GRIBOVA I.A., KRASNOV A.P., STUDNEV J.N., POGOSIAN A.K., HOVHANESYAN K.V. ARMENIAN MINERAL STRUCTURE AND PROPERTY STUDIES OF MODIFIED FLUORINE BEARING OLIGOMETERS	243
GEOKCHYAN H.Gh., MKRTCHYAN L.A., POGHOSYAN M.A., HAMBARZUMYAN A.G., SAVCHENKO L.M. TECHNOLOGY IMPROVEMENT FOR OBTAINING GOLD BEARING PIGMENT FOR CERAMIC PAINTS	251
SARGSYAN V.S., ADILKHANYAN H.A. CRITICAL ANGLE DESIGN PROCEDURE OF SHIFT ON LATERAL FACE OF COLLAPSE PRISM FRAGMENTS IN INHOMOGENEOUS GROUND MASS STRUCTURE	254
KHACHATRYAN V.S., MNATSAKANYAN M.A. PERMISSIBLE RELATIVE POWER LOSS GROWTH DETERMINATION IN THE ELECTRICAL POWER SYSTEM BY DECOMPOSITION METHOD	260
PETROSYAN V.G. NPP SAFETY IMPROVEMENT WITH SPDS	269
KHACHATRYAN L.A. METHOD FOR EVALUATION OF SOLAR PASSIVE BUILDING HEATING ENERGY EFFICIENCY	275
HAKOBJANYAN G.D., SAFARYAN V.S. ON THE STUDY OF HOMOGENEOUS CHAIN CIRCUITS	285
YONDEM M.E. DIRECT CURRENT ELECTRICAL MACHINE WITH A DISC SHAPED ANCHOR	291
AZARYAN M.H. THE PONDEROMOTOR CONVERTER OF DISPLACEMENTS	295
MARTIROSSYAN R.M., GHULYAN A.G., SANAMYAN V. A., PIROUMYAN H.A., ZALINYAN V.P. IMPROVEMENT OF SOME CHARACTERISTICS FOR INTERFERENCE RADIOTELESCOPE BY DIGITAL ANALYSIS OF RECEIVED SIGNAL	302

GASPARYAN F.V., AROUTIOUNIAN V.M., BUNIATYAN V.V. THERMO-EMF OF NON-HOMOGENEOUSLY DOPED p-n JUNCTION	307
AVETISYAN Yu.H., HAKHOUMIAN A.A., TADEVOSYAN V.R., MELIKYAN H.K. FREQUENCY SCANNING ANTENNA BASED ON DIELECTRIC IMAGE WAVEGUIDE WITH PERIODICAL SLOTS	318
AVETISSYAN V.H. MEASUREMENT TECHNIQUES OF OVERMODED SHORT TRACT CHARACTERISTICS BY LECHER LINE	323
TERZIAN H.A., SUKIASYAN H.S., PARONIKYAN A.E. ON CALCULATION OF MAGNETIC FIELDS BY FINITE-ELEMENT METHOD WITH DYNAMIC COMPOSITION OF DISCRETIZATION ELEMENTS	332
SIMONYAN S.H., BADALYAN L.A. DIFFERENTIAL-TAYLOR ANALOGUE OF GREVILL METHOD FOR NONAUTONOMOUS MATRICES	340
SOGOMONYAN K. H., TUMANYAN K. A., DALLAKYAN G.N., GHAZARYAN N. L. A DESIGN ALGORITHM FOR FORMING MULTIDIMENSION SPACE m-SURFACES	354
GASPARYAN O.N., ALEKSANYAN G.A. ABSOLUTE STABILITY OF NONLINEAR MULTIDIMENSIONAL CONTROL SYSTEMS WITH NORMAL TRANSFER MATRICES OF LINEAR PART	359
KHACHATRYAN R. G., KAZARYAN E. V. AUTOMATIC SYSTEM OF DIRECTING HELIOSTATION TO THE SUN	368
MURADYAN M.A., MOVSESYAN R.W. APPLICATION OF MEAN SQUARE MINIMUM METHOD TO DETERMINATION OF ECG SEGMENTS DURATION	372
BALJYAN P.H. DEFINITION OF DEPENDENCE BETWEEN HYDRAULIC FLOW PARAMETERS AT THEIR DRIFT- BEARING CAPACITY CONSTANCY	380
ASCHYANTS E.P. DETERMINATION OF FREE WATER SURFACE LEVEL OSCILLATION AMPLITUDE IN WATER HEAD COLUMN	386
ABOUT THE GENIUS (ON THE 100 – th ANNIVERSARY OF ANDRANIK IOSSIFYAN’S BIRTH)	392