ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

SԵՂԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК



Журнал издается с 5.01.1948 г. Выходит 3 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Ռ.Մ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Հ.Ա. ԹԵՐՉՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ), Չ.Կ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ռ.Վ. ԱԹՈՅԱՆ, Վ.Վ. ԲՈՒՆԻԱԹՅԱՆ, Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Ս.Մ. ՂԱՉԱՐՅԱՆ, Ո.Չ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.М. МАРТИРОСЯН (главный редактор), А.А. ТЕРЗЯН (зам. глав. редактора), З.К. СТЕПАНЯН (ответ. 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. MAROUKHYAN, YU.L.. SARGSYAN, V.S. SARKISSYAN, S.H. SIMONYAN, M.G. STAKYAN, V.S. KHACHATRYAN

Հրատ. խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ

Համակարգչային շարվածքը եւ ձեւավորումը՝

ԼԻԼԻԹ ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆԻ

Խմբագիրներ՝

ԼԵՅԼԱ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ ՆԵԼԼԻ ԱՆԱՆՅԱՆ

© Издательство ГИУА Известия НАН и ГИУ Армении (сер. техн. наук), 2004

ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

Հ\$Դ. 621.81.002.22

ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

Մ.Գ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Կ.Ց. ԻՍԱԽԱՆՅԱՆ

ՀԱՐԹ ԵՎ ԱՍՏԻՃԱՆԱՎՈՐ ԼԻՍԵՌՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ

Հաղորդում 2. Լիսեռների հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների որոշման հաշվարկային մեթոդ

Фոփոխական բարդ բեռնավորման դեպքում $(T,\pm M)$ դիտարկված է լիսեռների հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների վրա τ/σ ռեժիմային պարամետրի ազդեցությունը, որը հարթ և լարումների կուտակիչներով օժտված փորձանմուշների համար հիմնականում միալար նվազող բնույթ է կրում։ Դա թույլ է տվել, օգտագործելով լավարկային գծայնացնող (u-v) կոորդինատային համակարգեր, որոնք ապահովում են հարաբերակցական ընտրանքային գործակցի r_{\max} արժեքը, $F(\tau/\sigma,\sigma_{RN},N_G,m,C,s_m,s_{\lg Nr},s_C)=0$ կապը ներկայացնել ուղղագծային հետընթացային հավասարումների համակարգի տեսքով, որի պարամետրը նորմալ բաշխման z_P քվանտիլն է։ Ըստ առաջադրվող խնդրի բնույթի տրված են (u-v) կոորդինատային համակարգի ընտրման տարբերակները։

Առանցքային բառեր. հոգնածային դիմադրություն, գծայնացնող կոորդինատային համակարգ, հարաբերակցական գործակից։

Որակական տեսակետից և հանրագումարային առումով լիսեռների հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների վրա հաստատուն շոշափող լարումների ազդեցությունն արտահայտվում է սահմանային լարումների մակերևույթների փոփոխականությամբ [1]։ Այդ ազդեցության քանակական գնահատման համար անհրաժեշտ է բացահայտել նշված ցուցանիշների և բեռնվածության τ/σ ռեժիմային պարամետրի միջև գործող կապերը, որոնք բազմապարամետրական բնույթ են կրում։ τ/σ -ն այս դեպքում հանդես է գալիս որպես մի գործոնային պարամետր, որը թույլ է տալիս այդ կապերը ներկայացնել երեք խումբ առնչությունների տեսքով.

ա) լիսեռի դիմացկունության սահմանի, ցիկլային երկարակեցությունների և քվանտիլային հոգնածության կորի շրջման կետի աբսցիսի միջև՝ բազմացիկլային հոգնածության ողջ տիրույթում ($N=10^5...10^7$)՝

$$\sigma_{RN} = f_1(N, z_p), \ \sigma_{RN} = f_2(\tau/\sigma, z_p), \ N_G = f_3(\tau/\sigma, z_p),$$
(1)

բ) քվանտիլային հոգնածային կորի թեքության ցուցչի և պարամետրի միջև՝

$$m = f_4(\tau / \sigma, z_p), \ C = f_5(\tau / \sigma, z_p), \ C = f_6(m, z_p),$$
(2)

գ) հոգնածային փորձարկումների տվյալների ցրման բնութագրերի միջև՝

$$s_m = f_7(\tau/\sigma)$$
 , $s_c = f_8(\tau/\sigma)$, $s_{\lg Nr} = f_9(\tau/\sigma)$: (3)

(1)-(3) կապերը փաստորեն լիսեռների սահմանային լարումների մակերևույթների [1] մաթեմատիկական մոդելներն են, քանի որ բնութագրում են նշված մակերևույթների փոփոխականությունը, ներկայացնելով այդ կապերի և $\sigma_R oN$, $\sigma_R o\tau$, No τ կոորդինատային հարթությունների կամ դրանց զուգահեռ հարթությունների և սահմանային լարումների մակերևույթների հատումից առաջացած կորերի հավասարումների համակարգը, կամ էլ այդ կորերի պարամետրերի կախումը τ/σ -ից։

Նշված կորերը (նկ. 1, 2) հիմնականում միալար փոփոխման միտումներ են ցուցաբերում, ինչը հեշտացնում է վերջիններիս պարամետրերի որոշումը հարաբերակցական և հետընթացային վերլուծության մեթոդներով՝ օգտագործելով նաև լավարկող գծայնացման ձևափոխումներ [2]։ Այդ առթիվ գործնականորեն նպատակահարմար է դրանք ներկայացնել գծային հարաբերակցական հավասարումների համակարգի տեսքով, որոնց արգումենտները N-ը և τ / σ -ն են, իսկ պարամետրը՝ նորմալ բաշխման z_p քվանտիլը.

1.
$$\lg N_p = C_p - m_p \lg \sigma_{RNp}$$
, 6. $C_p = a_5 + b_5 v_5(m_p)$,
2. $\sigma_{RNp} = a_1 + b_1 v_1(\tau/\sigma)$, 7. $s_m = a_6 + b_6 v_6(\tau/\sigma)$,
3. $\lg N_{Gp} = a_2 + b_2 v_2(\tau/\sigma)$, 8. $s_c = a_7 + b_7 v_7(\tau/\sigma)$,
4. $m_p = a_3 + b_3 v_3(\tau/\sigma)$, 9. $s_{\lg Nr} = a_8 + b_8 v_8(\tau/\sigma)$:
5. $C_p = a_4 + b_4 v_4(\tau/\sigma)$, (4)

(4)–ում "p" ցուցիչով նշված են դիտարկվող ցուցանիշների հավանական արժեքները P = 0,1...0,999 ($z_p = 1,28...-3,09$) միջակայքում, իսկ $v_1(\tau/\sigma) - v_8(\tau/\sigma)$ -ն (u - v) կոորդինատային համակարգում v արգումենտի գծայնացնող ֆունկցիաներն են [2]:

(4) համակարգում 1-ը՝ հոգնածային կորի հավասարումն է, որով հնարավոր է որոշել հավանական դիմացկունության սահմանների արժեքները ցիկլային $(N = 10^5 ... 10^7)$: 2-pp huduuupniup երկարակեցությունների լայն տիրույթում ամրության տեսությունների ձևափոխված տարբերակն է, որում նորմալ և շոշափող լարումների համատեղ ազդեցության հաշվառմամբ որոշվում է $\sigma_{\scriptscriptstyle RNp}$ -ի արժեքը, որը համարժեք լարման իմաստ ունի, իսկ ամրության տեսությունը բնութագրող հավասարումը ներկայացվում է համեմատաբար պարզ գծային տեսքով։ 1-ին և 2-րդ հավասարումների համատեղ լուծումը ընդլայնում է ամրության տեսության կիրառման հնարավորությունները, դրանում ընդգրկելով նաև ցիկլային երկարակեցությունների ազդեցությունը, որն ամրության հայտնի տեսություններում հաշվի չի առնվում։ 3-րդ հավասարումը բնորոշում է հոգնածային կորի թեք և հորիզոնական հատվածների փոխադարձ դասավորությունը և ձևավորում է այդ կորի շրջման կետի աբսցիսի (N_{Gp}) և անսահմանափակ դիմացկունության սահմանի $(\sigma_{\scriptscriptstyle Rp})$ արժեքները, որոնք տրվում են տեղեկատու գրականության մեջ։



Նկ. 1. Հոգնածային դիմադրության վիձակագրական ցուցանիշների (u, p) և դիմացկունության սահմանների (գ) փոփոխականությունը τ/σ -ից՝ հարթ փորձանմուշների համար



Նկ.2. Նույնը` միջանցիկ անցքով փորձանմուշների համար

4-6 -րդ հավասարումները կապեր են հաստատում քվանտիլային հոգնածային կորերի պարամետրերի և au/σ -ի միջև։ m-ը և C-ն իրենց ներքին կառուցվածքի շնորհիվ

լիսեռների փաստորեն հոգնածային քայքայման գործընթացը բնութագրող հանրագումարային ցուցանիշներ են, որոնք ներառում են գերլարումների և ցիկլային երկարակեցությունների միջին և ցրման բնութագրերի փոփոխման առանձնահատկությունները։ Վերջիններս, իրենց հերթին, բազմացիկլային հոգնածության ձևավորում են հոգնածային փորձարկումների տվյալների ցրման տիրույթում ՝հարաբերակցական դաշտի" չափերը և դասավորվածությունը, ինչը թույլ է տալիս մեքենաների և տեխնոլոգիական սարքավորման հիմնավորված ժամկետներ նշանակել՝ հուսալիության տեսության հիմնադրույթների հաշվառմամբ։

7-9 -րդ հավասարումները բնորոշում են փորձնական տվյալների ցրման քանակական ցուցանիշների կախումը au/σ -ից, որը համեմատաբար քիչ հետազոտված բնագավառ է։ Այդ ցուցանիշներից յուրաքանչյուրը բնորոշում է հոգնածային փորձարկումների տվյալների ցրման 'հարաբերակցական դաշտի" ձևավորման որոշակի մի հայտանիշ. s_m - ը՝ այդ դաշտի ձառագայթաձև բացման չափը, $s_{\lg Nr}$ -ը՝ բաշխման կենտրոնում ցրման բացվածքը, իսկ s_c -ն՝ բազմացիկլային հոգնածության տիրույթում դաշտի տարածականության փոփոխությունը։ Դրա հետ մեկտեղ, այդ երեք ցուցանիշները ձևավորում են նաև քվանտիլային հոգնածային կորի C և m պարամետրերի արժեքները և դրանց փոփոխականությունը։ Դրանով հիմնավորվում է ոչ միայն փոփոխական բարդ բեռնավորման դեպքում հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների բազմապարամետրական կապերի առկայությունը [3], այլ նաև նրանց փոխկապակցվածությունը, որն իր հերթին՝ ամրության և երկարակեցության հաշվարկային մեթոդներ մշակելիս առաջադրում է խնդրի լուծման համալիր մոտեցումներ։ Նման մոտեցումների իրականացումը թելադրված է տարաբնույթ գործոնների ազդեցությամբ և բազմապարամետրական կապերով բնութագրվող՝ հոգնածային գործընթացի քանակական գնահատման անհրաժեշտությամբ, որովհետև այդ գործոնների ազդեցությունը հաՃախ էվրիստիկ բնույթ է կրում և քանակական գնահատման դժվար է ենթարկվում այն դեպքերում, երբ անհրաժեշտ է այդ գնահատումները խմբավորել ըստ ամրության և երկարակեցության հատկանիշների, ինչն էլ անհնար է իրականացնել ամրության հայտնի տեսություններով։

(4) համակարգի հավասարումների պարամետրերի որոշումը լավարկող հարաբերակցական հաշվարկային ընթացակարգերի միջոցով հնարավորություն է ընձեռում լուծել երկու խումբ հարցեր.

ա) բացահայտել մինչ այդ անհայտ օրինաչափություններ լիսեռների ռեժիմային պարամետրերի և հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների միջև, որը հետազոտական նպատակներից բացի, զուտ գործնական նշանակություն ունի՝ հիմնավորված և հավանական գնահատմամբ հաշվարկային ընթացակարգեր կազմակերպելիս,

բ) նշված օրինաչափությունները թույլ են տալիս ընդհանրացնել բավականին բարդ հոգնածային փորձարկումների արդյունքները։ Մեքենաշինության մեջ լայնորեն օգտագործվող և բնութագրիչ՝ միջին ածխածնային կառուցվածքային պողպատներից պատրաստված լիսեռների համար բեռնավորման հիմնավորված ռեժիմային պարամետրերի և լարումների կուտակիչների առավել տարածված տեսակների դեպքերում հնարավոր է ստանալ հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների ընդհանրացրած արժեքները։

Նշված հարցերի լուծումը թույլ կտա առանց համեմատաբար բարդ իրագործվող հատուկ հոգնածային փորձարկումներ կատարելու, լիսեռների ամրության և երկարակեցության հաշվարկներում օգտագործել նախկին փորձարկումների արդյունքներից բացահայտված օրինաչափությունները և նրանց միջոցով ստացված հավանական մեծությունները։

Հոգնածային փորձարկումներից ընտրենք առավել բնութագրիչ՝ հարթ և սուր (միջանցիկ շառավղային անցքով) լարումների կուտակիչներ ունեցող փորձանմուշների փորձարկման շարքերը և դրանց համար դիտարկենք (4) համակարգի 2-9-րդ հավասարումների պարամետրերի ստացման հաշվարկային ընթացակարգերը։

Հարթ փորձան/ուշներ։ Նախօրոք անհայտ (1)-(3) ֆունկցիաների տեսքի որոշ/ան համար (նկ.1) անհրաժեշտ է իրականացնել գծայնացնող (u - v) կոորդինատային համակարգերի այլընտրանքային տարբերակների լավարկված ընտրություն [2]։ Դիտարկենք $\sigma_{_{RN_{P}}}$ դիմացկունության սահմանի առնչությունը τ/σ -ից՝ բազմացիկլային հոգնածության տիրույթի բնութագրիչ կետերի համար ($N = 10^5$, 10^6 , $\overline{\mathrm{N}}_{\mathrm{G}}$), չքայքայ/ան հավանականության P(N) = 0.1, 0.5 և 0,999 մակարդակներով, որոնք փաստորեն ընդգրկում են $\sigma_{_{RN_{P}}}$ -ի հավանական արժեքների գործնական տիրույթը (նկ. 1գ)։

 $\begin{aligned} & \text{Qluuhnluh}_{2} \ (u-v) \ \ (u-v) \$

Հաշվարկային տվյալների 2-րդ խումբը նկարագրված է (2) ֆունկցիաներով, որոնք կապեր են հաստատում քվանտիլային հոգնածային կորերի և բեռնվածության ռեժիմի պարամետրերի (նկ. 1բ), ինչպես նաև միմյանց միջն։ Նման կապերի բացահայտումը կարևոր է հոգնածային փորձարկումների ծավալների կրձատման տեսակետից, քանի որ այդ կապերի առկայության դեպքում ստանդարտ (պտտական ծռում) փորձարկումների արդյունքով, միջին ածխածնային պողպատներից պատրաստված լիսեռների համար հաշվարկային եղանակով $\tau/\sigma = 0...1,65$ տիրույթում կարելի է որոշել քվանտիլային հոգնածային կորերի C, m պարամետրերը։ Քանի որ C, m պարամետրերի ներքին կառուցվածքները համանման են, N-ի և P(N)-ի դիտարկվող տիրույթներում r_{max} արժեքներն ապահովում է(($\lg y$)¹⁰ – x¹⁰) համակարգը՝ r = 0,9897...0,9950:

Այլընտրանքային են նաև $(y - x^n), n = 2, 9, 10$ (r = 0,9851...0,9951) և $(\lg y - x^7)$ (r = 0,9781...0,9909) կոորդինատային համակարգերը (աղ. 1)։ Նույն պատճառով $C = f_6(m, z_p)$ -ն ուղիղ գիծ է (y - x) համակարգում՝ r = 0,9996, չնայած $(e^x - e^y)$ համակարգն ապահովում է $r_{\max} = 0,9999...1,0000$ արժեքներ։

Նշված դեպքերի համար (u - v)ընդհանրացնող համակարգի տարբերակները աղ.1 - 3 - ում ստվերապատված են։

Cumulpupli dhewighl wiggend ψηρλωύσμες Lupentűberh unte hertowické kurácie a serie a serie

Աղյուսակ 1

Ցուցանիշ		P(N) = 0,1		P(N) = 0,5		P(N) = 0,999	
		<i>u</i> - <i>v</i>	r	u-v	r	u-v	r
		$y - x^2$	-0,9816	$y - x^2$	-0,9856	$y^{-3} - x^{3}$	0,9975
	0 ⁵	$y^2 - x^2$	-0,9816	$y^2 - x^2$	-0,9855	$(\lg y)^{-3} - x^3$	0,9951
	=	$(\lg y)^2 \cdot x^2$	-0,9813	$(\lg y)^2 \cdot x^2$	-0,9854	$y^2 - x^2$	-0,9945
	Ν	$lgy-x^2$	-0,9812	$lgy-x^2$	-0,9853	$e^{y} - x^{2}$	-0,9953
		$e^{y}-x^{2}$	-0,9797	$e^{y}-x^{2}$	-0,9835	$lgy-x^3$	-0,9936
(<i>d</i>		$y^{10} - x$	-0,9835	$y^{-2} - x^2$	0,9899	$y^{-2} - x^2$	0,9977
σ, z	90	$y^{-2} - x^2$	0,9832	$(\lg y)^{-2} - x^2$	0,9872	$(\lg y)^{-2} - x^2$	0,9975
2(t)	=1($(\lg y)^{-2} \cdot x^2$	0,9814	$y^{10} - x$	-0,9866	$lgy-x^2$	-0,9970
N = f	Ν	$lgy-x^2$	-0,9805	$lgy-x^2$	-0,9859	$y^2 - e^x$	-0,9968
σ_R		$y-x^2$	-0,9784	$y - e^x$	-0,9851	$y-x^2$	-0,9957
		<i>y</i> ¹⁰ - <i>x</i>	-0,9645	<i>y</i> ¹⁰ - <i>x</i>	-0,9641	$y^{-2} - x^2$	0,9102
	$\overline{N} = N_G$	$y^5 - e^x$	-0,9438	$y^4 - e^x$	-0,9431	$(\lg y)^{-2} - x^2$	0,9084
		$y^{-2} - x^2$	0,9414	$y^{-2} - x^2$	0,9405	$lgy-x^2$	-0,9077
		$lgy-x^2$	-0,9406	$lgy-x^2$	-0,9393	$y - e^x$	-0,9070
		$y - x^2$	-0,9399	$y - x^2$	-0,9385	$y - x^2$	-0,9064
		$(\lg y)^{10} - x^{10}$	0,9950	$(\lg y)^{10} - x^{10}$	0,9937	$y - x^{IO}$	0,9951
	$m=f_4(au/\sigma,z_p)$	$y-x^2$	0,9905	$y - x^9$	0,9923	$lgy-x^8$	0,9900
		$y^{10} - x^{10}$	0,9823	$lgy - x^7$	0,9829	$(\lg y)^{10} - x^{10}$	0,9897
		$e^{y} - x^{10}$	0,9819	$y^{10} - x^{10}$	0,9821	$y^{10} - x^{10}$	0,9819
		$lgy-x^7$	0,9790	$e^{y} - x^{10}$	0,9819	$e^{y} - x^{10}$	0,9819
	(dz)	$(\lg y)^{10} - x^{10}$	0,9948	$(\lg y)^{10} - x^{10}$	0,9949	$y - x^{10}$	0,9948
	$C=f_5(\tau/\sigma,$	$y - x^9$	0,9895	$y - x^{10}$	0,9921	$(\lg y)^{10} - x^{10}$	0,9924
		$y^{10} - x^{10}$	0,9825	$lgy-x^8$	0,9835	$lgy-x^9$	0,9909
	C	$e^{y} - x^{10}$	0,9819	$y^{10} - x^{10}$	0,9823	$y^{10} - x^{10}$	0,9820
		$lgy-x^8$	0,9781	$e^{y} - x^{10}$	0,9819	$e^{y} - x^{10}$	0,9819
	(dz	$e^{y} - e^{x}$	0,9999	$e^{y} - e^{x}$	0,9999	$e^{y} - e^{x}$	1,0000
	$C=f_6(m,z)$	$y^{10} - x^{10}$	0,9999	$y^{10} - x^{10}$	0,9999	$y^{10} - x^{10}$	0,9999
		<i>y</i> - <i>x</i>	0,9996	<i>y</i> - <i>x</i>	0,9996	<i>y</i> - <i>x</i>	0,9996
		$y - (\lg x)^4$	0,9995	$y - (\lg x)^4$	0,9996	$y - (\lg x)^4$	0,9998
		lgy-x	0,9955	lgy-x	0,9961	lgy-x	0,9975

Հավարկող $\left(u-v
ight)$ կոորդինատային համակարգի ընտրությունը. հարթ փորձանմու2ներ

Աղյուսակ 2

Յուցանիշ	<i>u</i> - <i>v</i>	r	Ցուցանիշ	<i>u</i> - <i>v</i>	r		
Հարթ փորձանմուշներ							
	$y^{10} - x^{10}$	0,9605		$(\lg y)^{-10} - (\lg x)^{-10}$	0,9966		
	$(lgy)^{10} - x^{10}$	0,9399		$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9918		
$\overline{N}_G = f_3(\tau/\sigma)$	$e^{y} - x^{10}$	0,8372	$s_C = f_8(\tau/\sigma)$	$\lg y - (\lg x)^{-1}$	-0,7898		
	$y - x^{10}$	0,6281		$y - (\lg x)^{-1}$	-0,7445		
	$y^{10} - e^x$	0,6267		$(\lg y)^2 - (\lg x)^{-2}$	-0,7378		
	$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,8520		$y^{-10} - x^{-10}$	0,9741		
	$(\lg y)^{-3} - (\lg x)^{-3}$	-0,6382		$(lgy)^{10} - x^{10}$	0,9368		
$s_m = f_7(\tau/\sigma)$	$\lg y - (\lg x)^{-2}$	-0,6007	$s_{lgNr}=f_9(\tau/\sigma)$	$lgy-x^{10}$	-0,7743		
	$y - (1gx)^{-2}$	-0,5646		$y - x^{10}$	-0,7214		
	$y^2 - (\lg x)^{-2}$	-0,5287		$e^{y} - x^{10}$	-0,7121		
	Շառավղա	յին անցք։	ով փորձանմ	ուշներ			
	y^{10} -(1gx) ¹⁰	0,9999		$(\lg y)^{10} - (\lg x)^{-10}$	0,9999		
	$y^{10}-x^{-10}$	0,9999		$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9994		
$\overline{N}_G = f_3(\tau/\sigma)$	$(1gy)^{10} - x^{-10}$	0,9992	$s_C = f_8(\tau/\sigma)$	$y^{-10} - x^{10}$	0,9981		
	$(\lg y)^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9992		$(1gy)^{10} - x^{10}$	0,9958		
	<i>y</i> - <i>x</i>	-0,9504		$y - x^5$	-0,8683		
$s_m = f_7(\tau/\sigma)$	$(lgy)^{10} - x^{10}$	0,9991		$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9999		
	$y^{-10} - x^{10}$	0,9991		$(\lg y)^{10} - (\lg x)^{-10}$	0,9989		
	$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9985	$s_{lgNr}=f_9(\tau/\sigma)$	$\lg y - (\lg x)^{-1}$	-0,9959		
	$(\lg y)^{10} - (\lg x)^{-10}$	0,9927		$y^{-10} - x^{10}$	-0,9951		
	$y - x^5$	-0,7920		$y - x^{IO}$	-0,9729		

Նույնը` հարթ և շառավղային միջանցիկ անցքով փորձանմուշների համար

Ընդհանրացնող է համարվում $(y - x^n)$, n = 1, 2, 5, 6 համակարգը, որի դեպքում r-ը փոփոխվում է |r| = 0,6716...0,9997 սահմաններում: $\overline{N}_G = f_3(\tau/\sigma)$ և s_m , s_C , $s_{\lg N_r} = f_{7,8,9}(\tau/\sigma)$ ֆունկցիաների համար, նախորդ դեպքի նման, r = 0,9991...0,9999 արժեքները համապատասխանում են $(y^{\pm n} - (\lg x)^{\pm n})$, $((\lg y)^{\pm n} - (\lg x)^{\pm n})$, n = 10 համակարգերին։ Ընդհանրացնող կոորդինատային համակարգ է ընդունված $(y - x^n)$, n = 1, 5, 10, որի դեպքում r = 0,7920...0,9728 (աղ. 2):

Ցուզանիշ		P(N) = 0,1		P(N) = 0,5		P(N) = 0,999	
	Singulariz	u-v	r	u-v	r	<i>u</i> - <i>v</i>	r
	$N = 10^5$	$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9103	$y^{10} - x^{-10}$	0,9711	$y^{10} - x^{-10}$	0,9929
		$y^{-10} - x^{10}$	0,8876	$y^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9711	$y^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9929
		$(\lg y)^{-10} - (\lg x)^{-10}$	0,7009	y^{10} -1gx	-0,9682	y^{10} -1gx	-0,9896
		$y^{-10} - e^x$	0,6998	$y^{10} - e^{-x}$	0,9405	$y^{10} - e^{-x}$	0,9602
		$lgy-x^{10}$	-0,5319	lgy-x	-0,8235	lgy-x	-0,8884
(^d	$N = 10^{6}$	$e^{-y} - x^{10}$	0,9957	$y^{10} - x^{-10}$	0,9990	$y^{10} - x^{-10}$	0,9998
σ, 2		$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9957	$y^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9990	$y^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9998
$\frac{1}{2}(\tau)$		$y^{-10} - x^{10}$	0,9616	y^8 -lgx	-0,9980	$y^3 - \lg x$	0,9996
N = f		$(\lg y)^{-10} - (\lg x)^{-10}$	0,8106	$y^{3} - e^{-x}$	0,9864	y-lgx	0,9986
σ_{R}		$lgy - x^{10}$	0,6417	lgy-x	-0,9756	lgy-x	-0,9692
	$N = \overline{N}_G$	$e^{-y} - x^{10}$	0,9957	lgy-x	-0,9999	$y^{10} - x^{-10}$	0,9988
	0	$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9858	$(\lg y)^2 - x$	-0,9999	$y^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9988
		$y^{-10} - x^{10}$	0,9732	y^9 -lgx	-0,9999	y^{10} -lgx	-0,9962
		$(\lg y)^{-10} - (\lg x)^{-10}$	0,8525	$y^{3} - e^{-x}$	0,9999	y-lgx	-0,9485
		$lgy-x^{10}$	-0,6787	<i>y</i> - <i>x</i>	0,9990	lgy-x	-0,8803
	$m=f_4(\tau/\sigma,z_p)$	$e^{y}-x^{2}$	-0,7778	$y^{10} - e^x$	-0,8400	y^{10} -1gx	-0,9225
		$y^{10} - e^x$	-0,7765	$y^{10} - x$	-0,8283	$y^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9180
		$e^{y} - e^{x}$	-0,7578	$y^{10} - e^{-x}$	0,7980	$y^{10} - x^{-10}$	0,9180
		$y^{10} - x$	-0,7400	$e^{y} - e^{x}$	-0,7882	$y^{10} - e^{-x}$	0,9067
		$y - x^2$	-0,6852	<i>y</i> - <i>x</i>	-0,6716	<i>y</i> - <i>x</i>	-0,6070
	$C=f_5(\tau/\sigma,z_p)$	$e^{y}-x$	-0,9640	$e^{y} - e^{-x}$	0,9796	$e^{y} - e^{-x}$	0,9638
		$e^{y} - e^{-x}$	0,9579	$e^{y}-x$	-0,9718	y^{10} -1gx	-0,9558
		$e^{y} - e^{x}$	-0,9489	e^{y} - e^{x}	-0,9413	$y^{10} - (\lg x)^{10}$	0,9517
		$y^{10} - x$	-0,9083	$y^{10} - x$	-0,9355	$y^{10} - x$	0,9517
		<i>y</i> - <i>x</i>	-0,7903	<i>y</i> - <i>x</i>	-0,8172	<i>y</i> - <i>x</i>	-0,7489
	$C=f_6(\tau/\sigma, z_p)$	$e^{-y} - x^{-9}$	0,9999	$e^{-y} - x^{-6}$	0,9998	$y^{-10} - e^{-x}$	0,9999
		$y^{-10} - e^{-x}$	0,9991	$e^{-y} - e^{-x}$	0,9988	$e^2 - e^x$	0,9998
		$y^{-10} - (1gx)^{-10}$	0,9979	y^{-7} -1gx	-0,9985	$y^{-4}-x$	-0,9998
		y^{-4} -1gx	-0,9952	$y^{-6} - x$	-0,9978	$lgy-x^4$	0,9998
		$y-x^3$	0,9860	$y - x^6$	0,9910	$y-x^5$	0,9997

Աղյուսակ 3 Նույնը` շառավղային միջանցիկ անցքով փորձանմուշների համար

ՎիՃակագրական վերլուծությունը վկայում է հետազոտվող ցուցանիշների միջև բազմապարամետրական կապերի մեծ տարրապատկերի առկայության մասին՝ աստիՃանային, լոգարիթմական, էքսպոնենտային ֆունկցիաներով և դրանց ցուցանիշներով բնորոշվող գծայնացնող ընթացակարգերով, ինչն զգալիորեն ընդլայնում է այդ կապերի բացահայտման մասին պատկերացումները։ Արդյունքների վիճակագրական մշակումից ստացված հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների բազմազանությունը, որը ներառում է նաև $\sigma_{_{RN_P}}$ -ի m_P -ի և C_P -ի պարամետրական արժեքներն ըստ N-ի և P(N)-ի, դրա հետ մեկտեղ՝ 44 խումբ ձևափոխիչ ֆունկցիաների 388 տարատեսակների կիրառումը ենթադրում են ստացված տվյալների բազայի նկատմամբ համակարգային մոտեցումների և մեթոդաբանության մշակում։ Նման համակարգումը, հետազոտականից բացի նաև որոշակի գիտագործնական հետաքրքրություն է ներկայացնում, կիրառական բնույթ ունի և, ըստ առաջադրված խնդիրների եղանակների, կարող է իրականացվել տարբերակային ընթացակարգերով։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Ստակյան Մ.Հ., Իսախանյան Կ.Ց. Հարթ և աստիճանավոր լիսեռների հոգնածային դիմադրության հավանական գնահատումը։ Հաղորդում 1. Հարթ, տեխնոլոգիական և կառուցվածքային նշանակության լարումների կուտակիչներ ունեցող լիսեռների սահմանային լարումների մակերևույթները // ՀԳԱԱ և ՀՊՃՀ տեղեկագիր։ Տեխն. գիտ. սերիա.-2004.-Հատ.57, N2. - Էջ 215 – 221:
- Իսախանյան Կ.Յ. Հարթ և աստիճանավոր լիսեռների հոգնածային դիմադրության հավանական գնահատումը։ Տեխն. գիտ. թեկն. ատեն.: Ե.02.01 – Պաշտպ. 23.05.03. – 146 Էջ։
- 3. Олейник Н.В., Коноплев А.В. О связи между параметрами различных моделей кривых усталости //Надежность и долговечость машин и сооружений: Межвед. сб. науч. тр. – Киев: Наукова думка, 1991. - №19. - С. 41-42.
- ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 02.09.2003։

М.Г. СТАКЯН, К.Ц. ИСАХАНЯН

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ГЛАДКИХ И СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Сообщение 2. Расчетный метод определения показателей сопротивления усталости валов

Для случая переменного сложного нагружения $(T,\pm M)$ рассмотрено влияние режимного параметра τ/σ на показатели сопротивления усталости валов, которое для гладких образцов и при наличии концентраторов напряжения в основном носит монотонно убывающий характер. Это позволило, используя оптимальные линеаризующие координатные системы (u - v), обеспечить значения r_{\max} для выборочного коэффициента корреляции и представить связь $F(\tau/\sigma, \sigma_{RN}, N_G, m, C, s_m, s_{\lg Nr}, s_C) = 0$ в виде системы линейных регрессионных уравнений, где параметром является квантиль нормального распределения z_p . Согласно характеру представленной задачи, рассмотрены варианты выбора координатной системы (u - v).

M.G. STAKYAN, K.Ts. ISAKHANYAN

PROBABILITY ASSESSMENT OF SMOOTH AND STEPPED SHAFT FATIQUE RESISTANCE

Message 2. Design method of defining shaft fatigue resistance indices

For the alternating complex loading (T, ±M) case the operating parameter τ/σ effect on shaft fatique resistance indices having monotonically decreasing nature for smooth patterns and in the presence of stress concentrations is considered. Using optimal linearized coordinate systems (*u*-*v*) it permitted to provide r_{max} values to the optional coorelation coefficient and to present coupling $F(\tau/\sigma, \sigma_{RN}, N_G, m, C, s_m, s_{\lg Nr}, s_C) = 0$ in the form of a system, linear regressive equations, the parameter of which is normal distribution quiantile z_p . According to the character of the presented problem, the versions of coordinate system option (*u*-*v*) are demonstrated.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.922.029

МАШИНОСТРОЕНИЕ

М.А. ГРИГОРЯН, Т.М. ГРИГОРЯН, Г.Ш. АНДРАНИКЯН

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АЛМАЗНЫХ ПРАВЯЩИХ РОЛИКОВ

Рассмотрены беспорядочно ориентированные алмазные зерна правящего ролика, которые при работе подвергаются продольному, поперечному и косому соударению со стороны шлифовального круга и разрушаются. Чем меньше угол наклона большой оси алмазного зерна к направлению внешней силы, тем меньше интенсивность хрупкого разрушения. Показано, что алмазные ролики с ориентированными и металлизированными зернами обеспечивают высокую износостойкость ролика, высокую производительность и эффективность процесса правки.

Ключевые слова: продольное, поперечное и косое соударение, ориентированные и металлизированные зерна, хрупкое разрушение, производительность.

Как каждый алмазно-абразивный инструмент, так и алмазный ролик (AP) в течение работы изнашиваются. В зависимости от различных факторов интенсивность износа ролика непостоянная. Одним из основных вопросов эффективного использования AP является обеспечение его высокой износостойкости. Для этого необходимо в первую очередь выяснить физическую природу износа инструмента, а также явления, происходящие в зоне его контактирования.

Контактирование алмазного ролика и шлифовального круга. Контактирование АР со шлифовальным кругом (ШК) при правке имеет свои особенности [1]. АР представляет собой композиционный материал, состоящий из алмазных зерен и связующего материала. Его износ обуславливается износом отдельных его компонентов. Чем медленнее изнашивается связующий материал, длиннее время выдерживания алмазного зерна и медленнее разрушается алмазное зерно, тем меньше интенсивность изнашивания инструмента. Экспериментально установлено, что алмазное зерно правящего АР при взаимодействии со ШК подвергается хрупкому разрушению [2]. Однако исследования показывают, что интенсивность хрупкого разрушения отдельных алмазных зерен неодинакова. При этом важное значение имеет направление внешней силы, влияющей на алмазное зерно. Учитывая, что алмазные зерна АР и абразивные зерна ШК беспорядочно ориентированы и случайно расположены на их поверхностях, а также перемещаются относительно друг друга с большими скоростями, то в зоне правки они могут встретиться соударениями разных видов (см. табл.). При колебательном движении АР взаимно (ультразвуковая правка) контактирующие выступы зерен получают дополнительные движения в осевом или радиальном направлениях, в результате чего появляются дополнительные ударные взаимодействия зерен. Как видно, алмазные зерна ролика при правке могут подвергаться разным видам соударения, что характеризуется направлением скорости удара (направление внешней ударной силы) относительно большой оси алмазного зерна со стороны выступов композиционной шероховатой поверхности ШК. При разных видах удара на алмазное зерно условия его разрушения различны. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что при увеличении угла lphaнаклона большой оси зерна к направлению внешней влияющей силы интенсивность хрупкого разрушения зерна увеличивается. Максимальная величина износа зерна происходит при $\alpha = 90^{\circ}$ (поперечное соударение на алмазное зерно), минимальное – при α =0((продольное соударение). В интервале 0< α <90° (косое соударение) износ алмаза имеет сравнительно среднее значение. Линейный износ алмазного зерна, подвергаемого поперечному удару, примерно в 1,4 раза больше по сравнению с износом при его косом ударе. Это свидетельствует о том, что при поперечном соударении на алмазное зерно он сравнительно легче разрушается, приводя к большому его износу. Таким образом, регулируя ориентацию большой оси алмазного зерна в ролике, можно обеспечить такое его расположение в зоне контакта относительно внешних сил, при котором он мало разрушается. Это возможно при такой ориентации, при которой ударная сила со стороны ШК на алмазное зерно влияет наклонно относительно его оси, и чем больше будет угол наклона, тем меньше будет интенсивность разрушения алмаза. Данный вывод послужил основой для разработки алмазного ролика с ориентированными алмазными зернами.

Алмазный ролик с ориентированными алмазными зернами (APO3). Одной из основных задач процесса правки является обеспечение высокой износостойкости AP с увеличением его режущей способности и производительности. С целью увеличения износостойкости алмазоносного слоя предложен APO3. Для сравнения алмазных роликов с ориентированными и неориентированными (обычные) алмазными зернами приняты следующие показатели процесса правки: мощность резания, удельный расход алмазов, производительность процесса и шероховатость шлифовальной поверхности. Исследование проводилось на зубошлифовальных станках модели 5В833 с помощью алмазного ролика AC15 250/200 M2-02 углового профиля при правке червячных кругов 24A12Ц17К5 и ЛО12С1К5100% с модулем m=3·10⁻³ м.

При правке с АРОЗ мощность, расходуемая на правку, примерно в 30...40% меньше, чем при правке роликом обычным случайным расположением зерен (рис.1).



Возможные виды соударения выступов поверхностей алмазного ролика и шлифовального круга

Таблица

V- скорость удара; V_p – скорость ролика; V_k - скорость круга; С - выступы связующих материалов ролика и круга



Рис.1. Зависимость мощности № правки от радиальной подачи S_P при правке круга m=3·10⁻³ м алмазным роликом AC15 250/200 M2-02: 1- обычный ролик; 2- ролик с ориентированными зернами

Исследования показали, что у роликов с ориентированными алмазными зернами удельный расход алмаза в 1,2...1,3 раза меньше по сравнению с неориентированными (рис. 2). Кроме того, при правке с помощью АРОЗ радиальную подачу ролика можно увеличить в 1,2 ... 1,5 раза, что приводит к повышению производительности процесса. При использовании роликов с ориентированными зернами заметного изменения чистоты шлифовальной поверхности зубов не обнаружено. Это обусловлено тем, эти ролики по сравнению с обычными обеспечивают одинаковую чистоту шлифовальной поверхности. Таким образом, использование АРОЗ способствует повышению износостойкости алмазоносного слоя ролика и эффективности процесса правки.



Рис.2. Зависимость удельного расхода q ролика от радиальной подачи Sp при правке кругов 24А12С17К5 (сплошные линии) и ЛО12С1К5 (пунктирные линии) m=3·10⁻³ м алмазным роликом AC15 250/200 M2-02: 1-обычный ролик;

2- ролик с ориентированными зернами

Алмазный ролик с металлизированными алмазами (АРМ). Эффективность процесса правки ШК предопределяется физико-механическими свойствами алмазных зерен и

связующего материала. Следовательно, необходимо в процессе резания снизить механическое и тепловое воздействие на них. Одним из способов осуществления данного процесса является применение металлизированных алмазов [3]. С целью повышения точности алмазных зерен ролика и прочности их удержания в связке при изготовлении АР металлизированные алмазы (металлизированные никелем, использовали степень металлизации 25 мас. %). Для осуществления процесса правки червячных кругов 24А 12 см17К5 и ЛО 12 СМ1 К5 использовали алмазные ролики из АС15 250/200, М2-02 как металлизированными, так и неметаллизированными алмазами. Исследования показали, что мощность, расходуемая на правку с металлизированными алмазами, больше (в 1,3...1,5 раза) по сравнению с неметаллизированными (рис.3). Это объясняется тем, что при правке АРМ алмазные зерна, за счет локального упрочнения связки с легированием никеля (при металлической связке ролика и никеля происходят диффузионные процессы), прочно удерживаются в связке. Такое алмазное зерно длительное время работает до разрушения и вырывается из связки, что является причиной некоторого возрастания мощности правки.



Рис.3. Зависимость мощности Nn нарезки от числа ін проходов нарезки: ролик AC15 250/200 M2-02; круг 24A12CM27K5; 1- алмазы неметаллизированные; 2 – алмазы металлизированные

Определение удельного расхода алмазного ролика показало, что металлизированные алмазы обеспечивают в определенной степени (в 1,7...1,8 раза) снижение расхода алмаза (рис.4). Это можно объяснить тем, что за счет металлизации повышается прочность алмазов, уменьшаются сколы и вырыв алмазных зерен из связки, создаются благоприятные условия для рассеяния тепла от зерна в связку, что в итоге приводит к уменьшению расхода ролика. В этих условиях производительность процесса правки повышается.





1 – алмазы неметаллизированные; 2 – алмазы металлизированные

Исследования показали, что микрогеометрия режущей поверхности ШК после правки роликами с металлизированными и неметаллизированными алмазами особенно не отличается, так как в обоих случаях шероховатость поверхностей и качество поверхностного слоя шлифовальных зубчатых колес одинаковы.

Технико-экономическая эффективность APM определялась на машиностроительных заводах при нарезке новых и правке изношенных червячных зубошлифовальных кругов из электрокорунда и эльбора. Сравнение технологических процессов правки из металлизированных и неметаллизированных алмазов показало, что срок службы APM в 1,5 раза больше, что позволяет производить правку примерно в два раза большей радикальной подачей ролика, сокращая время нарезки и правки червячных кругов, по сравнению с обычными роликами.

Таким образом, APM за счет сокращения расхода алмаза и повышения производительности процесса показал высокую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Григорян М.А.** Исследование динамической работы алмазного зерна при правке // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т.53, № 2. С. 147-151.
- 2. **Григорян М.А.** Некоторые особенности контактирования процесса правки // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2001. Т.54, № 3. С. 334-340.
- 3. Чистяков Е.М., Щепелев А.А., Дуда Т.М., Черных В.П. Инструмент из металлизированных сверхтвердых материалов. Киев: Наукова думка, 1982. –202 с.

Общественная организация "Хрупкие материалы" Материал поступил в редакцию 30.10.2002.

Մ.Ա. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Տ.Մ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Գ.Շ. ԱՆԴՐԱՆԻԿՅԱՆ

ԱԼՄԱՍՏԵ ՈՒՂՂՈՂ ԳՐՏՆԱԿՆԵՐԻ ՄԱՇԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՅՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԸ

Դիտարկվել են ուղղող գրտնակի անկանոն կողմնորոշված ալմաստե հատիկները, որոնք աշխատանքի ընթացքում հղկաքարի կողմից կարող են ենթարկվել երկայնական, լայնական և նեղ հարվածների ու քայքայվել; Որքան փոքր է ալմաստե հատիկի մեծ առանցքի թեքվածության անկյունը արտաքին ազդող ուժի ուղղության նկատմամբ, այնքան նրա քայքայման ինտենսիվությունը փոքրանում է։ Կողմնորոշված և մետաղապատված հատիկներով ալմաստե գրտնակները ապահովում են գրտնակի բարձր մաշակայունություն, ուղղման պրոցեսի բարձր արտադրողականություն և շահավետություն։

M.A. GRIGORYAN, T.M. GRIGORYAN, G.Sh. ANDRANIKYAN

DIAMOND DRESSING ROLLER WEAR RESISTANCE INCREASE METHODS

Random-oriented diamond grains of the dressing roller, which undergo in operation to the longitudinal, horizontal and diagonal collision by the grinding wheel and disintegrate, is considered. The less the longer axis slope of the diamond grain to the external strength direction, the less the intensity of its brittle failure. It is shown that diamond rollers with oriented and metallized grains provide high wear resistance of the roller, high productivity and efficiency of the dressing process.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

Հ\$Դ 669. 168: 661.877.22

ՄԵՏԱԼՈՒՐԳԻԱ

Ս.Գ.ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Հ. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ, <mark>Ֆ.Հ. ԶԱՔԱՐՅԱՆ,</mark> Մ.Ղ. ԶՈՒՌՆԱՉՅԱՆ

ՔԱՋԱՐԱՆԻ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԻ ԹՐԾՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ՕՊՏԻՄԱԼ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Հետազոտվել և որոշվել են տեղական մոլիբդենիտային խտանյութի օքսիդացնող թրծման օպտիմալ պարամետրերը։ Ուսումնասիրվել է օդի թթվածնով և մոլիբդենի եռօքսիդով մոլիբդենիտի օքսիդացման ռեակցիաների արագությունը՝ կախված ջերմաստիՃանից։ Պարզաբանվել են ընթացող ռեակցիաների բնույթը, ընթացաշրջանները և խառնուրդների օքսիդացման պայմանները։

Առանցքային բառեր. մոլիբդենիտ, խտանյութ, թրծում, օքսիդ, ֆազ, անհիդրիդ, եռակալում, կորզում։

Մոլիբդենի սուլֆիդային խտանյութերի օքսիդացման ռեակցիաները բարդ հետերոգեն գործընթացներ են, որոնց ուսումնասիրումն ունի գիտական և գործնական մեծ նշանակություն։ Այս տիպի ռեակցիաների արագությունը կախված է սուլֆիդի մակերևույթին առաջացող օքսիդի շերտի բնույթից։ Եթե այդ շերտը ծակոտկեն է, ապա գոծընթացի արագությունը վերահսկվում է քիմիական ռեակցիայով, իսկ եթե ծակոտկեն չէ՝ դիֆուզիայով [1]։

Մոլիբդենիտային խտանյութի թրծման գործընթացում ընթանում են մի շարք քիմիական ռեակցիաներ, որոնք բաժանվում են չորս խմբի [2].

- մոլիբդենիտի օքսիդացում թթվածնով մինչև մոլիբդենի եռօքսիդ;

- մոլիբդենիտի և մոլիբդենի եռօքսիդի երկրորդային փոխազդեցություն՝ մոլիբդենի երկօքսիդի առաջացումով;

ուղեկցվող սուլֆիդային միներալների (պիրիտ, խալկոպիրիտ և այլն) օքսիդացում՝
 օքսիդների և սուլֆատների ստացմամբ;

- մոլիբդենի եռօքսիդի և խառնուրդների օքսիդային միացությունների (օքսիդներ, սուլֆատներ, կարբոնատներ) միջև փոխազդեցություն՝ մոլիբդատների առաջացմամբ։

Կինետիկական հետազոտությունների համար օգտագործված սարքը հավաքված է հոսանուտ տարբերակով և հնարավորություն է տալիս որոշել հեռացող գազերի բաղադրությունը։ Խտանյութը բարակ շերտով տեղադրվել է կվարցե նավակի մեջ։Տաքացման ժամանակ անջատվող SO₂, SO₃ գազերի անալիզը կատարվել է ԼԽՄ-80 խրոմատոգրաֆի միջոցով՝ օգտագործելով □Պոլիսորբ-1□ սորբենտը։ Պինդ փորձանմուշների բաղադրությունն ուսումնասիրվել է քիմիական վերլուծության և ռենտգենոգրաֆիկ մեթոդներով։ Օդը, նախքան ռեակտոր մտնելը, չորացվել է։

Օգտագործվել է Քաջարանի մոլիբդենիտային խտանյութ՝ հետևյալ բաղադրությամբ. Mo - 51,8%; Cu – 0,44%; Fe -1,8%; S - 35,67%; SiO₂ - 6,90%; Al₂O₃ -0,82%; CaO - 0,75%; Re – 0,025%, այլ խառնուրդներ՝ 1,82 %։ Խտանյութը նախապես ֆլոտոռեագենտներից մաքրվել է CCI₄ –ով լվանալով։ Պղինձը խտանյութի մեջ գտնվում է խալկոպիրիտի և երկրորդային սուլֆիդի ձևով, երկաթը՝ խալկոպիրիտի և պիրիտի, իսկ ռենիումը իզոմորֆ խառնուրդ է մոլիբդենիտի մեջ։

Մոլիբդենիտի սկզբնական բոցավառման ջերմաստիձանը կախված է մասնիկի չափից. 2...7 *մկմ* չափերի դեպքում այն ամբողջությամբ օքսիդանում է 320° C – ում։ Խոնավ օդում բոցավառման ջերմաստիձանն ավելի ցածր է։

Խտանյութի նկատելի օքսիդացում չոր օդի թթվածնով սկսվում է 360°C-ից, իսկ 500°C – ից բարձր ջերմաստիճանում մոլիբդենիտը ինտենսիվ կերպով օքսիդանում է՝ առաջացնելով մոլիբդենի եռօքսիդ հետևյալ էկզոթերմիկ ռեակցիայով.

 $MoS_2 + 3,5O_2 = MoO_3 + 2SO_2$, $\Delta H_{298} = 228,5$ 44 $\mu\mu$:

Այս ռեակցիան անդարձելի է և ընթանում է նույնիսկ թթվածնի փոքր կոնցենտրացիայի պայմաններում։

Օքսիդացման առաջին արգասիքները մոլիբդենի ցածր կարգի օքսիդներն են, որոնք թթվածնի ավելցուկի պայմաններում աննկատելի են։

Օքսիդացման գործընթացում մոլիբդենիտի մասնիկը պատվում է առաջացած մոլիբդենի եռօքսիդի թաղանթով։ Այդ իսկ պատՃառով ռեակցիայի արագությունը որոշվում է օքսիդացած թաղանթի կառուցվածքով, որի միջով թթվածինը և ծծմբային գազը դիֆուզվում են հակառակ ուղղություններով։

400 ℃ ջերմաստիձանում առաջանում է ամուր օքսիդային թաղանթ, և ռեակցիայի արագությունը որոշվում է պինդ թաղանթի միջով գազերի դիֆուզիայի արագությամբ։

Օքսիդային թաղանթը 550...600° С-ում ծակոտկեն է և չի արգելակում ռեակցիայի ընթացքին։ Միներալի օքսիդացման արագությունը 600 °С-ում կազմում է մոտ 0,009 *մմ/ր*։ Մոլիբդենիտի օքսիդացման ռեակցիայի բարձր ջերմային էֆեկտն ապահովում է մոլիբդենիտային խտանյութի թրծման գործընթացի իրականացումն ամբողջությամբ։ Նկարում բերված են Քաջարանի մոլիբդենիտային խտանյութի՝ օդի թթվածնով օքսիդացման կինետիկական կորերը 450...600 °С ջերմաստիձանային տիրույթում։



Նկ. Մոլիբդենիտային խտանյութի օքսիդացման արագության կախվածությունը ջերմաստիձանից. 1-600 °C; 2 – 500 °C; 3 – 450 °C

Կորերը ցույց են տալիս, որ 600 ºC −ում ռեակցիան ընթանում է մեծ արագությամբ։

Մուլֆիդներն օքսիդանում են իրենց բռնկման ջերմաստիձանից բարձր ջերմաստիձանում։ Մոլիբդենիտն ունի համեմատաբար ցածր բռնկման ջերմաստիձան, որը մոտ է պիրիտի և խալկոզինի բռնկման ջերմաստիձաններին։

Օդի մուտքի բացակայության դեպքում՝ 550...600 ∘C ջերմաստիձանում կիսայրուքում առաջանում է մոլիբդենի երկօքսիդ՝

 $MoS_2 + 6MoO_3 = 7MoO_2 + 2SO_2$:

Ուսումնասիրվել է MoS₂ –ի և MoO₃ –ի փոխազդեցության ռեակցիայի արագությունը հելիումի միջավայրում, 500 °C, 600 °C և 700 °C ջերմաստիՃաններում, խառնուրդի MoS₂ + 6MoO₃ հարաբերության պայմաններում։ Արդյունքները բերված են աղյուսակում։

ժամանակը,	Փոխազդված MoS₂ –ի քանակը, %					
р						
1	500°C	600°C	700°C			
50	9,0	35	85			
100	10	55	90			
150	13	65	92			
200	15	68	93			
250	18	70	97			

Ինչպես տեսնում ենք, 50 րոպեում և 600°C – ում ռեակցիայի մեջ է մտնում 35% MoS₂, իսկ 700°C –ում՝ մոտովորապես 85 %։

MoO₂-ի առաջացումը նկատվում է սկզբնական շրջանում, երբ արտաքին շերտում առաջացած MoO₃ – ը փոխազդում է ներսի շերտում գտնվող MoS₂-ի հետ։ Երբ MoS₂ - ի հիմնական մասը փոխակերպվում է MoO₂ – ի, վերջինս օքսիդանում է օդի թթվածնով և փոխարկվում MoO₃ – ի։ Հետևաբար՝ MoS₂-ի օքսիդացման գործընթացն ընդգրկում է հետևյալ ընթացաշրջանները.

$$MoS_2 + 3,5O_2 = MoO_3 + 2SO_2,$$

 $MoS_2 + 6MoO_3 = 7 MoO_2 + 2SO_2,$
 $MoO_2 + 0,5O_2 = MoO_3:$

Մոլիբդենիտային խտանյութի օքսիդացնող թրծման ժամանակ 400...600°C - ում օքսիդանում են նաև պիրիտը և խալկոպիրիտը՝ առաջացնելով օքսիդներ և մասամբ սուլֆատներ, ըստ հետևյալ ռեակցիաների [3].

$$\begin{aligned} & \text{CuFeS}_2 + 4O_2 = \text{CuSO}_4 + \text{FeSO}_4, \quad (<400^\circ\text{C}), \\ & 4\text{CuFeS}_2 + 15O_2 = 4\text{CuSO}_4 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4\text{SO}_2, \quad (400 - 600^\circ\text{C}), \\ & 4\text{FeS}_2 + 11O_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2, \quad (>290^\circ\text{C}), \\ & 2\text{SO}_2 + O_2 = 2\text{SO}_3; \end{aligned}$$

Առաջանում է նաև կալցիումի սուլֆատ՝ հետևյալ ռեակցիայով. $CaCO_3 + SO_3 = CaSO_4 + CO_2$:

500...630 °C− ում մոլիբդենի եռօքսիդը փոխազդում է նաև օքսիդների, կարբոնատների և սուլֆատների հետ՝ առաջացնելով մոլիբդատներ.

 $\begin{array}{l} {\sf CaCO_3 + MoO_3 = CaMoO_4 + CO_2,} \\ {\sf CuO + MoO_3 = CuMoO_4,} \\ {\sf CuSO_4 + MoO_3 = CuMoO_4 + SO_3,} & ({\sf SO_2 , O_2}), \\ {\sf Fe_2O_3 + 3MoO_3 = Fe_2(MoO_4)_3:} \end{array}$

Կալցիումի սուլֆատը պինդ ֆազում, 750°C-ից բարձր ջերմաստիձանում, փոխազդում է MoO₃-ի հետ՝ առաջացնելով կալցիումի մոլիբդատ։

Թրծված խտանյութում մոլիբդատների առկայությունն այն դարձնում է ավելի դյուրահալ, նույնիսկ MoO₃ –ի հալման ջերմաստիՃանից ցածր (795 °C), ինչը բացատրվում է մոլիբդենի եռօքսիդ - մոլիբդատ էվտեկտիկայի առաջացմամբ։

T- հալ. էվտ.	
CaMoO ₄ – MoO ₃ ,	727°C,
$Fe_2(MoO_4)_3 - MoO_3$,	722° C,
$CuMoO_4$ - MoO_3 ,	560° C:

Խտանյութում գտնվող SiO₂ –ը չի փոխազդում մոլիբդենի օքսիդների հետ։

Ռենիումի սուլֆիդը օքսիդանում է՝ առաջացնելով Re₂O₇, ReO₃, ReO₂ օքսիդներ, որոնց եռման ջերմաստիձանները համապատասխանաբար հավասար են 359 °C, 620 °C, 2977 °C, հետևաբար ռենիումը հեռանում է Re₂O₇ անհիդրիդի ձևով.

$2\text{ReS}_2 + 7,5\text{O}_2 = \text{Re}_2\text{O}_7 + 4\text{SO}_2$:

Ռենիումի լրիվ հեռացման առաջին պայմանն է՝ բացառել խտանյութի եռակալումը, ցածր օքսիդների, պերռենատների՝ Ca(ReO4)2, Fe(ReO4)2 և այլնի առաջացումը։

Մոլիբդենիտային խտանյութերի թրծումը , որը կիրառվում է անկախ նրանից, թե ինչ նյութ են ուզում ստանալ, պայմանավորված է ծծմբի հեռացումով։ Առաջնային խնդիրն է՝ առանց մոլիբդենի մեծ կորստի ստանալ ծծմբի և գունավոր մետաղների կոնդիցիոն պարունակությամբ այրված խտանյութ, և միայն դրանից հետո ապահովել ռենիումի լրիվ կորզումը։

Հայտնի է, որ արտադրությունում մոլիբդենիտային խտանյութերի թրծումը բազմահատակ և պտտվող վառարաններում ապահովում է ռենիումի հեռացումը խտանյութից միայն 50...60% -ով, մնացած մասը մնում է թրծված խտանյութի մեջ [4]։ Ջերմաստիճանի բարձրացման հետ ռենիումի հեռացումը գազային ֆազ ինտենսիվանում է, սակայն սկսվում է նաև խտանյութի եռակալումը։

Ռենիումի կորզման լավ պայմաններ կարելի է ստեղծել վառարանների վերջնամասի ծխագազերը առանձնացնելով, ինչը կապահովի մշակվող գազերի քանակի պակասեցում 4...5 անգամ և, միաժամանակ, կբարձրացնի ռենիումի կոնցենտրացիան հեռացող գազերում։ Կցածրանա նաև գազերի փոշոտվածությունը և SO₂ – ի կոնցենտրացիան։ Անհրաժեշտ է օգտագործել ցիկլոններ, պարկային ֆիլտր, ինչպես նաև էլեկտրոֆիլտր, թաց շերտափեղկային փոշեորսիչներ։ Լուծույթներից Re –ը նպատակահարմար է կորզել լուծահանման տեխնոլոգիայով՝ էլեկտրոդիալիզային վերջավորությամբ։

Հետագա օգտագործումից կախված՝ թրծված խտանյութին ներկայացվում են տարբեր պահանջներ. եթե այն պետք է ենթարկվի հիդրոմետալուրգիական վերամշակման (NH4OH), ապա չպետք է պարունակի MoO₂, MoS₂, CaMoO₄, PbMoO₄ և FeMoO₄ , որոնք գործնականում անլուծելի են ամոնիակի ջրային լուծույթում։ Թրծման գործընթացը պետք է ընթանա այնպիսի պայմաններում, որոնք կապահովեն MoS₂-ի և MoO₂ –ի լրիվ օքսիդացումը MoO₃-ի և նշված մոլիբդատների բացակայությունը։ Այս դեպքում խտանյութի թրծումը պետք է կատարել 580...590 °C – ում, ինտենսիվ խառնումով, ինչը կապահովի նաև խտանյութի մանրահատիկայնությունը։

Պողպատների արտադրության համար օգտագործվելիք թրծված խտանյութերին ներկայացվում են հետնյալ պահանջները. գունավոր մետաղների ցածր պարունակություն, սուլֆիդային և սուլֆատային ծծմբի (MoS₂, CaSO₄, CuSO₄, MgSO₄ և այլ) բացակայություն (~ 0,1%)։ Թրծված խտանյութը պետք է լինի հատիկավորված, հատիկների չափը՝ 5...50 մմ։ Այն պետք է լինի 80 %-ից ոչ պակաս, հետևաբար, խտանյութի թրծումը նպատակահարմար է իրականացնել 620 ℃ - ում։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Habashi F. Principles of EXTRACTIVE METALLURGY. V.1. General Principles. New York, 1969. 295 p.
- 2. Зеликман А.Н. Молибден. М.: Металлургия, 1970. 438 с.
- 3. Химия и технология редких и рассеянных элементов / Под ред. **К.А. Большакова**. Ч.3 М. :Высш. школа, 1976. 320 с.
- 4. Металлургия рения // Труды III Всесоюзного совещания по проблеме рения. Ч.1. -М. : Наука, 1970. 136 с.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.10.2003։

С.Г. АГБАЛЯН, А.О. ОВСЕПЯН, Ф.А. ЗАКАРЯН, М.К. ЗУРНАЧЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КАДЖАРАНСКОГО МОЛИБДЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Исследованы и определены оптимальные параметры окислительного обжига молибденитового концентрата. Изучены скорости реакций окисления молибденита кислородом воздуха и тр, хокисью молибдена в зависимости от температуры. Пояснены характер и стадии протекающих реакций, условия окисления примесей.

S.G. AGHBALYAN, A.H. HOVSEPYAN, F.H. ZAKARYAN, M. GH .ZURNACHYAN

OPTIMUM PARAMETER RESEARCH AND DEFINITION OF KAJARAN MOLYBDENITE CONCENTRATE ANNEALING PROCESSES

The optimum parameters of molybdenite concentrate oxididization annealing are examined and specified. The temperature dependence on reaction rates of molybdenite oxidization by air oxygen and molybdenum trioxide is investigated. The character proceeding reaction stages and impurity oxidation conditions are interpreted.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.762.620.179.1

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Ш.Э. САРКИСЯН, А.С. ПЕТРОСЯН, А.Н. КАЗАРЯН, Э.Г. АМБАРЦУМЯН

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ Fe-Mo-Cu

Дан анализ технологического исполнения экструзии порошковых композиционных материалов. Исследованию были подвергнуты три состава шихт для получения материалов конструкционного и антифрикционного назначения. Выявлены преимущества бинарных систем, позволяющие экструдировать при более низких давлениях и увеличить стойкость инструмента.

Ключевые слова: экструзия, конструкционный и антифрикционный материалы, бинарные системы, температурный градиент, пресс-изделие.

Технический прогресс сопровождается непрерывным повышением требований, предъявляемых к материалам деталей машин и конструкций, работающих в условиях граничного и сухого трения при тяжелых нагрузках. Улучшение их триботехнических характеристик возможно путем синтеза новых беспористых металлокерамических антифрикционных композиций, имеющих сложнолегированную матрицу, в которую введены дисперсные включения твердых смазок: сульфиды, теллуриды, селениды ряда металлов (например, MoS₂) [1-3]. Основой для матрицы чаще всего служит железный порошок марки ПЖ. Легирующими добавками могут быть металлы, образующие с железом твердые растворы, и интерметаллидные соединения, упрочняющие основу (Мо, Сu и др), присутствие которых значительно улучшает антифрикционные свойства композиции, особенно при работе в тяжелых условиях (как в режиме самосмазывания, так и граничного трения).

Влияние Мо-а проявляется в стабилизации структуры, восприимчивости к термической обработке, понижении износа и коэффициента трения.

Легирование медью, т.е. <Fe-Cu-Mo> или <Fe-Cu-C>, повышает несущую способность подшипников до PV=7 *МПа м/с*, а также улучшает теплопроводность композиционного материала [3]. Отличительной особенностью сплавов является то, что в них реализованы оба механизма упрочнения: растворный Fe{Mo}, Fe[Cu] и интерметаллидный (FeMo,Fe2Mo).

Принципиальная схема технологического процесса получения такого антифрикционного материала состоит из приготовления шихты, прессования с пористостью $\theta = 15...20$ %, спекания с полной или частичной гомогенизацией матричной структуры и горячего компактирования до беспористого состояния. Возможно и последующее улучшение свойств термообработкой.

Компактирование чаще выполняют горячим или динамическим горячим прессованием, реже экструзией, хотя, на наш взгляд, именно она способна полностью реализовать заложенные в композиции триботехнические возможности, поскольку здесь уплотнение сопровождается высокими степенями пластических деформаций, способствующих лучшему свариванию несплошностей и улучшению структуры. Экструзия, как технологический процесс, высокопроизводительна и рентабельна при производстве как больших, так и маленьких партий продукции, поскольку переналаживание на ее новый вид можно осуществлять с минимальными материальными затратами и не останавливая производство [4]. К тому же экструзией получают профили, максимально приближенные к размерам конечной продукции.

Из вышеизложенного вытекает, что изучение процесса получения металлокерамических композиционных материалов экструзией представляет не только научный, но и значительный практический интерес.

Подбор составов шихт обусловлен литературным анализом, а также результатами ранее выполненных работ. Учитывалось также, что в Республике Армения производятся медь и молибден. Нами выбраны следующие составы шихт (табл.1).

Таблица 1

Исходные составы порошковых композиций								
Ν	Содержание компонентов, %							
состава	Cu	Мо	MoS ₂	S	С	Fe		
1	2,0	10,0	-	-	-	остальное		
2	2,0	5,0	2,0	-	0,5	_''_		
3	2,0	5,0	-	0,8	-	_''_		

Последующий технологический процесс выполнялся по двум схемам: в первом случае экструзия производилась без оболочки, во втором – в оболочке (рис.1).



Рис.1. Технологические схемы получения экструдированного композиционного материала (прессизделий)

Заготовки для экструзии по схеме 1 (рис.2а) получались двусторонним прессованием шихтовых составов пористостью $\theta = 18\%$, а заготовки для экструзии по схеме

2 (рис. 2б) формовались в специально разработанной пресс-форме, обеспечивающей получение равнопористых (наружного - из ПЖ2М и внутреннего - из шихты) слоев путем совместного двустороннего прессования.



Рис. 2. Осевые сечения заготовок для экструзии: а - без оболочки, б - с оболочкой

Перед экструзией все образцы спекались при 1150 °*C* в среде водорода в течение двух часов. Температура контейнера 350...370 °*C*, рабочая скорость экструзии - около 4 *мм/с*, тип смазки – графито-масляный. Параметры экструзии приведены в табл. 2.

Таблица 2

N соста- ва	Температура экструзии, ° <i>С</i>	Коэффи- циент вы- тяжки, λ	Вид экструзии	Давление экструзии Р, <i>МПа</i>		P _{H2} / P _{H1}
				Рн	Рк	
1	1150	4	По схеме 1	120	160	
1	1150	4	По схеме 2	80	110	0,67
2	1150	4	По схеме 1	130	150	
2	1150	4	По схеме 2	70	100	0,54
3	1150	4	По схеме 1	120	150	
3	1150	4	По схеме 2	70	100	0,58

Параметры экструзии заготовок порошковых композиций

Примечание:

Рни Рк - давление в начале и в конце истечения; Рні и Рн2 по схемам 1 и 2.

Типичный внешний вид пресс-изделия, полученного по схемам 1,2, показан на рис.3 а и б. Видны глубокие кольцевые поперечные трещины и надрывы на боковой и торцевой поверхностях, где наличные растягивающие напряжения превысили прочность материала (рис.3а). Кольцевые трещины сосредоточены в головной и средней частях прессизделия и отсутствуют в хвостовой части, что указывает на ослабление растягивающих напряжений в зоне деформирования к концу процесса выдавливания. На наш взгляд, такая картина получилась из-за малопластичности композиции и сильного подхолаживания поверхности заготовки во время ее переноса в контейнер и в процессе самой экструзии (этот процесс из-за малой скорости выдавливания длится 15...20 с). По экспериментальным данным [4], подхолаживание поверхности стальной заготовки, нагретой до 1100 °С, за время ее переноса в контейнер (7 с) достигает 70 °С, а глубина слоя в заготовке, где еще наблюдается понижение температуры, достигает 15...20 мм. Исходя из этого, можно предположить, что заготовка диаметром Ø 24 мм будет охлаждаться по всей глубине (даже учитывая меньшую теплопроводность пористой заготовки), а разница температур наружных и внутренних слоев будет незначительная. Заготовка во время экструзии одновременно охлаждается с поверхности от контакта с более холодными стенками инструмента, причем сильнее при использовании графитовой смазки и слабее - стеклосмазок, и нагревается в зоне деформации за счет выделяемой от этого процесса теплоты. Стеклосмазка при высоких скоростях экструзии может компенсировать теплопотери и даже несколько подогреть заготовку. При низких скоростях экструзии ее влияние незначительно. В условиях эксперимента на начальных стадиях экструзии масса заготовки такова, что в ней имеется значительная разница температур от поверхности к сердцевине, которая с уменьшением массы пресс-остатка уменьшается. В конечной стадии экструзии заготовка значительно охлаждена, что увеличивает давление истечения, создает более благоприятное напряженное состояние в матричной воронке, и дальнейшее выдавливание пресс-изделия происходит бездефектно (рис.За) [5, 6].





Рис. 3. Пресс- изделия, выдавленные: а - без оболочки (по схеме 1), t =1150 ° *C*, λ =4 по составу 1; б - в оболочке (по схеме 2) t=1150°*C*, λ =4, оболочки – ПЖ2М, матрицы: I – состав 1, II – состав 2

На рис.3 б показан вид пресс-изделий, экструдированных по схеме 2 (в оболочке). Их боковая поверхность качественная. При выдавливании получается компактный "бездефектный" материал.

Сравнение силовых параметров (табл. 2) показывает, что давление экструзии (при идентичных условиях) в оболочке в 1,5...1,8 раза ниже, чем без оболочки. Оболочка в ряде случаев применялась при экструзии труднодеформируемых сплавов и активных металлов [3]. Принято, что прочностные и упругие свойства оболочки должны быть ниже, чем у матричного материала. В этом случае снижаются усилия выдавливания и повышается равномерность истечения [3, 7].

По С.И. Губкину [8], при экструзии по прямому методу обеспечиваются наиболее благоприятные условия истечения, если коэффициент трения металла о стенки контейнера весьма незначителен (0,03...0,05) и заготовка обладает однородными свойствами по сечению. Тогда зона деформации сосредотачивается вблизи матрицы, распространяясь в направлении

штемпеля на длину, равную или меньшую половины диаметра контейнера (первый вид распространения деформации), что подтверждается экспериментальными исследованиями деформаций при экструзии как различных компактных [4, 9], так и пористых [10] заготовок. При этом напряженное состояние выдавливаемого металла представляет трехосное сжатие, при котором бездефектно можно экструдировать как весьма пластичный, так и малопластичный материал.

В реальных условиях экструзии при высоких температурах наблюдается значительное подхолаживание наружных слоев заготовки о более холодный контейнер, причем подхолаживание сильнее, если смазка не теплозащитна, а материал имеет низкую теплопроводность. Усиление этих факторов приводит к распространению зоны деформации вглубь и увеличению ее неравномерности по сечению заготовки, (т.е. возникает второй или третий вид распределения деформаций [8]). Это, в свою очередь, приводит к появлению растяжения в поверхностных напряжений слоях деформируемого материала. Неравномерность деформаций и ухудшение напряженного состояния добавочно усиливаются при увеличении коэффициента трения металла о стенки контейнера. В случае экструзии пластичного материала растягивающие напряжения "поглощаются" пластическими деформациями и релаксационными явлениями, в случае малопластичного образуют поверхностные трещины. Из сказанного вытекает, что в случае экструзии бинарных систем будут иметь место наиболее благоприятные условия истечения, если подхолаженный наружный слой (оболочка и более теплая менее пластичная матрица) получит во время экструзии примерно одинаковые свойства (предел текучести), и тогда возникнет первый (по С.И. Губкину) вид распространения деформаций. Этот факт необходимо учесть для бинарной системы, т.к. обеспечивается равномерность толщин слоев по всей длине пресс-изделия. При нарушении этого равенства и необеспечении малых коэффициентов трения металл – контейнер может возникнуть второй и даже третий вид распространения деформаций, при которых наличие пластичной оболочки, хотя и не позволит образование поверхностных дефектов, но и не обеспечит условие равномерности толщин слоев вдоль пресс-изделия.

В ряде случаев полученные изделия подвергают термической обработке с целью повышения их эксплуатационных характеристик. Механические свойства сплава <Fe-Mo-Cu > ($\sigma_{\rm B} = 418 \, M\Pi a$, $\delta = 20\%$, HB=1190 *МПа*) обосновываются металлографическим анализом (рис.4 а и б). Установлено, что в системе <Fe-Mo-Cu> тройных соединений не образуется. Тройной твердый раствор на основе меди находится в равновесии с α , γ , ε и Мо. Здесь α и γ - твердые растворы на основе железа (микротвердостью 1800...2400 *МПа*), ε - двойные соединения системы Fe-Mo [FeMo, Fe₂Mo] (микротвердостью 7500...8000 *МПа*) [11].



Рис.4. Композиционный материал: а - <Fe-5Mo>; б - <Fe-5Mo-2Cu> после экструзии Тэ =1150 °C, τ = 2 ч, λ = 4

Таким образом, на основании вышеизложенного можем прийти к следующим выводам.

1. Получены двухслойные профили, где внутренний рабочий слой представляет сравнительно дорогой, прочный и менее пластичный композиционный материал антифрикционного назначения, а наружный слой – дешевый и более пластичный (ПЖ2М) материал конструкционного назначения, что в целом снижает стоимость конечного изделия.

2. Снижаются усилия выдавливания примерно в 1,5...1,8 раза, что позволит экструдировать композиционный материал с более высокими степенями деформации.

3. Установлено, что более мягкий наружный слой заготовки позволяет увеличить стойкость инструмента.

4. Показано, что наличие мягкой оболочки позволяет проводить экструзии и при заметном общем охлаждении заготовки, т.е. при низких скоростях выдавливания. Это значит, что производство заготовок (труб) для антифрикционных подшипников скольжения можно осуществлять и на тихоходных гидравлических прессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Федорченко И.М., Пугина Л.И.** Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. 404 с.
- 2. Алаян А.А., Касьян В.Л., Казарян А.Н. и др. В кн.: Порошковая металлургия на пороге 3000летия. – Ереван: Тигран Мец, 2000. – С. 67-88.
- 3. Манукян Н.В. Технология порошковой металлургии. Ереван: Айастан, 1986. 234 с.
- 4. Прозоров Л.В. Прессование стали и тугоплавких сплавов. М.: Машиностроение, 1969.- 206 с.
- 5. Процессы формоизменения металлов и сплавов / Отв. ред. Н.В. Агеев. М.: Наука, 1971.
- Манукян Н.В., Петросян Г.Л., Петросян Х.Л., Агбалян С.Г. Исследование процессов получения протяжного инструмента составной конструкции // Труды VIII Межд. конф. по порошковой металлургии. - Дрезден, 1981. –С. 71-81.
- Могучий Л.Н. Влияние механических характеристик материалов на их совместное истечение при выдавливании (прессовании) // Пластическая деформация нерядовых металлических материалов: Сб. - М.: Наукова думка, 1976. – С. 35-41.
- 8. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургиздат, 1947.-315 с.
- 9. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. М.: Металлургиздат, 1959. 415 с.
- 10. Саркисян Ш.Э. Исследование процессов экструзии и разработка технологии получения беспористых металлокерамических материалов: Дис. ... канд. техн. наук. Ереван, 1971. 155 с.
- Dannohl W. Wissenschaftliche Veroff –entlichungen aus den Siemens Werken.- 1938. T. 17, N 2. – C. 1-13.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.06.2003.

Շ.Է. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Ն. ՂԱՉԱՐՅԱՆ, Է.Գ. ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ ԿՈՄՊՈՉԻՑԻՈՆ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԱՐՏԱՄՂՈՒՄ

Տրված է հակաշփական նշանակության փոշեկոմպոզիցիոն նյութերի արտամղման տեխնոլոգիական գործընթաց։ Հետազոտվել են կոնստրուկցիոն և հակաշփական նշանակության երեք բովախառնուրդներ։ Բացահայտված են երկմետաղական սիստեմների առավելությունները, որոնք թույլ են տալիս արտամղում իրագործել ավելի ցածր Ճնշումներով և բարձրացնել գործիքի կայունությունը արդյունաբերական արտադրության ժամանակ։

Sh.E. SARKISSYAN, H.S. PETROSYAN, A.N. KAZARYAN, E.G. HAMBARTSUMYAN TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR OBTAINING COMPOSITE MATERIAL BASED ON Fe-Mo-Cu

Technological construction analysis for powder material extrusion is given. For obtaining structural and antifriction properties three compositions of blend are studied. Binary systems permitting to extrude in lower pressures and increase the durability of the tool are revealed.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 548.73.2

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Г.Р. ДРМЕЯН

МОНОХРОМАТОР ДЛЯ СВЕТОСИЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В МАТЕРИАЛАХ

Теоретически показано, что нанесение аморфного или поликристаллического слоя на одну из смежных поверхностей блоков двухкристального интерферометра позволяет аномально уменьшить коэффициент поглощения рентгеновских лучей во втором кристалле. На основе этого предложен монохроматор для фокусировки рентгеновских лучей в толстых кристаллах, имеющий простую конструкцию и большую светосилу.

Ключевые слова: фокусирующий монохроматор, двухкристальная система, интерферометр, коэффициент поглощения, показатель преломления.

В [1] показаны фокусирующие в линию монохроматоры рентгеновского излучения, выполненные в виде монокристаллических пластин, изогнутых по Иоганну, Иоганссону или Кошуа. При использовании таких монохроматоров фокусировка имеет место только на фокусирующей окружности, что приводит к необходимости использования сложных систем механического перемещения датчика или прецизионной установки объекта, на который должно попасть сфокусированное излучение. В [2] рассмотрены плоские концентрирующие монохроматоры с асимметричностью отражения, которые не обеспечивают достаточно фокусировки, результате чего приходится острой в использовать несколько последовательных отражений от нескольких кристаллов с асимметричностью отражения, что в случае монолитного кристалла приводит к высоким требованиям к точности обработки отражающих поверхностей, а в случае отдельных кристаллов - к необходимости применения прецизионных механизмов юстировки.

В [3] описаны монохроматоры-интерферометры, содержащие две параллельные толстые монокристаллические пластины равной толщины, выполненные из одного монокристалла. Такие монохроматоры работают на эффекте Бормана и не обеспечивают высокой степени фокусировки. В [4] известны устройства, в которых используется эффект дифракционной фокусировки рентгеновского излучения при его одновременной монохроматизации, причем условием осуществления этого эффекта является наличие двух тонких, параллельных идентичных монокристаллов равной толщины. Предпочтительно такие кристаллы вырезать из одного монокристаллов друг относительно друга. Такие монохроматоры весьма ограничены из-за необходимости использования очень тонких кристаллов. Поэтому фокусировка рентгеновских лучей в более толстых кристаллах на основе устройства, имеющего сравнительно простую конструкцию, а также повышение светосилы монохроматора представляют актуальную задачу рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализа, что и является целью настоящей работы. В фокусирующем монохроматоре рентгеновского излучения, содержащем два параллельных идентичных монокристалла равной толщины, изготовленных, например, из единого монокристаллического блока, по крайней мере, на одну из смежных поверхностей монокристаллов нанесен слой вещества, показатель преломления рентгеновских лучей которого меньше показателя преломления рентгеновских лучей для монокристаллов. При этом может быть нанесен слой аморфного или поликристаллического вещества.

На рис. 1 показан разрез фокусирующего монохроматора, на рис. 2 - дисперсионные поверхности в двухволновом случае динамического рассеяния рентгеновских лучей.



Рис.1. Схематическое изображение устройства для светосильной фокусировки рентгеновских лучей



Рис. 2 Связь между дисперсионной поверхностью и направлением потока энергии (стрелками показаны направления потоков энергии)

Фокусирующий монохроматор содержит параллельные монокристаллы 1, 2 равной толщины, на смежные поверхности которых нанесены аморфные или поликристаллические слои 3, 4, для которых n₂ > n₁ (n₁- показатель преломления рентгеновских лучей в слое, n₂ - в кристалле). Рентгеновский пучок 5 проходит через монокристалл 1, расширяется в пучок 6, который через слой 4 падает на кристалл 2 и фокусируется в точке F. При облучении кристалла расходящимся пучком рентгеновских лучей все точки распространения (все участки поверхностей) в области отражения данного рефлекса возбуждаются. При этом потоки энергии перпендикулярны дисперсионным поверхностям в соответствующих точках, как это показано на рис. 2, где стрелками показаны направления потоков энергии.

Как видно из рисунка, потоки энергии волн, возбужденных в точках распространения верхней ветви дисперсионной поверхности, расходятся - они не фокусируются, а потоки энергии волн, возбужденных в точках распространения нижней ветви дисперсионной поверхности, фокусируются - происходит сужение волнового фронта. При этом коэффициент поглощения волн, возбужденных в точках распространения нижней ветви дисперсионной поверхности, гораздо больше, чем средний коэффициент поглощения кристаллом излучения с данной длиной волны. С другой стороны, коэффициент поглощения волн, возбужденных в точках верхней ветви гиперболы, меньше указанного среднего коэффициента поглощения, но данные волны не фокусируются.

При нанесении на пути вхождения рентгеновского излучения во второй кристалл слоя с меньшим, чем у монокристаллов, коэффициентом преломления роли ветвей дисперсионных гипербол относительно поглощения меняются: коэффициент поглощения волн, возбужденных в точках нижней ветви гиперболы, будет меньше, чем средний коэффициент поглощения кристалла, а коэффициент поглощения волн, возбужденных в точках верхней ветви, будет, наоборот, больше. Следовательно, появляется возможность фокусировать рентгеновские лучи и в более толстых кристаллах, нежели это имеет место в известном случае. Роль поглощения в первом и во втором кристаллах сводится к следующему. При узком пучке, когда падающее излучение практически входит в первый кристалл через одну точку его поверхности падения, возбуждаются все точки обеих гипербол, соответствующих угловой области отражения. В этом случае потоки энергии, исходящие из точек как верхней, так и нижней гипербол, расходятся и заполняют всю угловую область шириной в 20; в первом кристалле фокусировки не происходит. В достаточно толстых кристаллах волны, возбужденные в точках нижней (фокусирующей) ветви гиперболы, поглощаются, и остаются только волны, возбужденные в точках верхней ветви гиперболы. Следовательно, для первого кристалла не нужно наносить аморфный (поликристаллический) слой на входную поверхность. Во втором кристалле происходит фокусировка волн, возбужденных на нижней ветви гиперболы, коэффициент поглощения которых аномально велик, поэтому второй кристалл не может быть толстым, а так как толщины первого и второго кристаллов должны быть одинаковыми, то огра-ничение толщины второго кристалла ограничивает и толщину первого кристалла. Но если нанесением аморфного (поликристаллического) слоя аномально уменьшить коэффициент поглощения фокусируемых во втором кристалле волн, то станет возможным фокусировать волны в значительно более толстых кристаллах.

Таким образом, для осуществления фокусировки в толстых кристаллах достаточно нанести аморфный слой только на входную поверхность второго кристалла. Для работы кристалла с любой стороны падения на него рентгеновских лучей необходимо такие слои нанести на обе смежные поверхности кристаллов.

Эффект уменьшения поглощения волн, возбужденных в точках нижней ветви дисперсионной гиперболы, теоретически можно обосновать следующим образом.

Допустим, что рентгеновская монохроматическая плоская волна длиной λ_1 из слоя

падает на кристалл. Абсолютный показатель преломления слоя $\left(n_1 = 1 - \frac{1}{2} \left| \Phi_{01} \right| \right)$ меньше

единицы. Абсолютный показатель преломления кристалла $\left(n_2 = 1 - \frac{1}{2} \left| \Phi_{02} \right| \right)$ также

меньше единицы, однако показатель преломления кристалла относительно среды больше единицы:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \approx 1 + \delta > 1$$
, где $\delta = \frac{1}{2} |\Phi_{01}| - \frac{1}{2} |\Phi_{02}| > 0$

и $\left|\Phi_{01}\right| > \left|\Phi_{02}\right|$, или, имея в виду отрицательность Φ_{01} и Φ_{02} , можно написать $\Phi_{01} < \Phi_{02}$
Предположим, что среда (слой) не поглощает, а кристалл поглощает. С учетом поглощения величина $\Phi_0 = \left| \Phi_{01} \right| - \left| \Phi_{02} \right|$ принимает вид

$$\Phi'_{0} = \Phi'_{0r} + i\Phi'_{0i}, r \neq \Phi'_{0r} = \Phi_{02r} - \Phi_{01}; \Phi'_{0i} = \Phi_{02i}; \Phi_{02} = \Phi_{02r} + i\Phi_{02i}.$$

Теперь линейный коэффициент поглощения μ связан с линейной частью компонента Фурье Φ'_{oi} соотношением $\mu = -2\pi K_1 \Phi'_{oi}$.

В двухволновом случае интерференционный коэффициент поглощения через мнимую часть аккомодации и линейный коэффициент поглощения [5] выражается соотношением

$$\sigma = -4\pi K_1 g_i = -\frac{2\mu}{\left|\Phi'_{oi}\right|} g_i,$$

где общее выражение мнимой части аккомодации (gi) определяется в виде

$$g_{1} = -\frac{\left|\Phi'_{oi}\right|}{4} \left(\frac{1}{\gamma'_{0}} - \frac{1}{\gamma'_{h}}\right) \mp \frac{W'_{i}}{4\gamma'_{h}}, \qquad (1)$$

где $\gamma'_0 = \cos \phi_B$, $\gamma'_h = \cos(\phi_B + 2\theta_1)$; ϕ_B - угол падения, соответствующий отражению от атомных плоскостей под точным углом Брэгга (θ_0) ; θ_1 - угол Вульфа-Брэгга с учетом преломления рентгеновских лучей в нанесенном слое; W_i - мнимая часть следующей величины:

$$\begin{split} W_{i} &= \left(\beta^{2} \pm b^{2} \Phi'_{h} \Phi'_{\overline{h}}\right)^{1/2} \text{ где } b = 2 \left|C\right| \left(\gamma'_{h} / \gamma'_{0}\right)^{1/2}, \\ \beta &= \beta_{r} + i\beta_{i}, \ \beta_{r} = 2\alpha'_{h} + \left|\Phi'_{or}\right| \left(1 - \gamma'_{h} / \gamma'_{0}\right), \ \beta_{i} = \left|\Phi'_{oi}\right| \left(1 - \gamma'_{h} / \gamma'_{0}\right); \end{split}$$

 α_h' - параметр, пропорциональный углу падения $\,\delta\Psi_0'\,,\,\alpha_h'=\delta\Psi_0'Sin2\theta_1\,.$

В выражении (1) положительный знак слагаемого $\pm \frac{Wi'}{4\gamma'_h}$ относится к первому полю,

а отрицательный знак – ко второму.

Имея в виду вышесказанное, мнимые части gi для первого и второго полей принимают соответственно следующие значения:

$$g_{i1} = -\frac{\left|\Phi'_{oi}\right|}{4} \left(\frac{1}{\gamma'_{0}} + \frac{1}{\gamma'_{h}}\right) + \frac{W'_{i}}{4\gamma'_{h}}, \ g_{i2} = -\frac{\left|\Phi'_{oi}\right|}{4} \left(\frac{1}{\gamma'_{0}} + \frac{1}{\gamma'_{h}}\right) - \frac{W'_{i}}{4\gamma'_{h}}.$$

Таким образом, подставляя последние выражения в (1), для интерференционных коэффициентов поглощения первого и второго полей получим

$$\sigma_{1} = \frac{\mu}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma_{0}'} + \frac{1}{\gamma_{h}'} \right) - \frac{Wi'}{\gamma_{h}' |\Phi'_{oi}|} \right], \qquad (2)$$
$$\sigma_{2} = \frac{\mu}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma_{0}'} + \frac{1}{\gamma_{h}'} \right) + \frac{Wi'}{\gamma_{h}' |\Phi'_{oi}|} \right]. \qquad (3)$$

Для двух коэффициентов поглощения можем написать следующее общее выражение: $\sigma_{1,2}=\stackrel{-}{\sigma}\pm S$,

rge
$$\overline{\sigma} = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{\mu}{2} \left(\frac{1}{\gamma'_0} + \frac{1}{\gamma'_h} \right), \qquad S = \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_1) = \frac{\mu}{2} \frac{Wi'}{\gamma'_h |\Phi'_{oi}|}.$$
 (4)

Обозначая $P=P_{r+i}P_{i=}\beta/b(\Phi'_{h}\Phi'_{\overline{h}})^{l/2}$, выражения (2) и (3) можем переписать в следующем виде:

$$\sigma_{1} = \frac{\mu}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma_{0}'} + \frac{1}{\gamma_{h}'} \right) - \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{h}'} - \frac{1}{\gamma_{0}'} \right) P_{r} + 2A' |C| (\gamma_{0}' \gamma_{h}')^{1/2}}{(P_{r}^{2} + 1)^{1/2}} \right],$$

$$\sigma_{2} = \frac{\mu}{2} \left[\left(\frac{1}{\gamma_{0}'} + \frac{1}{\gamma_{h}'} \right) + \frac{\left(\frac{1}{\gamma_{h}'} - \frac{1}{\gamma_{0}'} \right) P_{r} + 2A' |C| (\gamma_{0}' \gamma_{h}')^{1/2}}{(P_{r}^{2} + 1)^{1/2}} \right],$$

где $A' = \left| \Phi'_{hi} \right| / \left| \Phi'_{oi} \right| \cos \vartheta_{h}$, $\cos \vartheta_{h} = \pm 1$, если кристалл имеет центр симметрии.

Обсуждение результатов, полученных для поглощающих сред. Обсуждение начнем со случая Лауэ. Обозначив P_r=Shv, для отражения по Лауэ приведем выражение (4) к следующему виду:

$$\sigma_{1,2} = \overline{\sigma} \mp S = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{1}{\gamma'_0} + \frac{1}{\gamma'_h} \right) \mp S = \frac{\mu}{2chV} \left[\frac{1}{\gamma'_0} e^{\pm V} + \frac{1}{\gamma'_h} e^{\mp V} \mp \frac{2|C|A'}{(\gamma'_0\gamma'_h)^{1/2}} \right].$$

Нетрудно убедиться в том, что при положительной А' (примитивная решетка [5]) в рассматриваемом случае (n₂₁>1) $\sigma_2 > \sigma_1$, тогда как в случае n₂₁<1 имеет место $\sigma_2 < \sigma_1$ [5-7].

Таким образом, при относительном показателе преломления, большем единицы, во втором кристалле сильно поглощаются волны, связанные с точками распространения, расположенными в верхней ветви дисперсионной поверхности, и слабо поглощаются фокусирующиеся волны, связанные с точками распространения нижней ветви гиперболы, что имеет важное значение для дифракционной фокусировки рентгеновских лучей. Дело в том, что, как известно [8], фокусируются только волны, связанные с точками распространения, расположенными в нижней ветви дисперсионной поверхности, а если коэффициент поглощения этих волн большой, как это имеет место при п21<1, то фокусировка возможна только в очень тонких кристаллах. В рассматриваемом же случае, наоборот, коэффициент поглощения этих волн, как уже было сказано, меньше, поэтому в кристаллах с относительным показателем преломления, большим единицы, рентгеновские волны можно фокусировать и в толстых кристаллах, что значительно расширяет область применения фокусировки. Более того, предложенное устройство обладает высокой

светосилой, что резко увеличивает эффек-тивность приборов, основанных на явлении фокусировки рентгеновских волн в кристаллах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 541 с.
- 2. Русаков А. А. Рентгенография металлов. Ч. 1. М.: МИФИ, 1965. С. 239-240.
- 3. Патент США N: 3439164, кл. 250-51,5. Опубл. 1969.
- 4. А. с. СССР N: 478235, кл. G 01 N: 23/20, 1973.
- 5. James R.W. Solid State phys.- 1963. V.15. P.53.
- 6. Battermann B.W., Colc H. Rev. of mod phys. 1964. V.36. P. 681.
- 7. Authier A.Acta geologica. Bratislava, 1968. 14, 11.
- 8. **Левонян Я.В.** Письма в ЖЭТФ.- 1981. Т.7.- С 269-272.

Гюмр. пед. ин-т. Материал поступил в редакцию 17.04.2003.

Հ. Ռ. ԴՐՄԵՑԱՆ ՄՈՆՈԽՐՈՄԱՏՈՐ՝ ՆՅՈՒԹԵՐՈՒՄ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ ՄԵԾ ԼՈՒՍԱՈՒԺՈՎ ՖՈԿՈՒՍԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Տեսականորեն ցույց է տրվել, որ երկբյուրեղ ինտերֆերոմետրի բլոկների հանդիպակաց մակերևույթների վրա ամորֆ կամ բազմաբյուրեղական շերտի նստեցումը թույլ է տալիս անոմալ ձևով փոքրացնել ռենտգենյան ձառագայթների կլանման գործակիցը երկրորդ բյուրեղում։ Դրա հիման վրա առաջարկվել է մոնոխրոմատոր, որը թույլ է տալիս ֆոկուսացնել ռենտգենյան ձառագայթները հաստ բյուրեղներում, ունի պարզ կառուցվածք և մեծ լուսաուժ։

H.R. DRMEYAN MONOCHROMATOR FOR LIGHT-GATHERING FOCUSING OF X-RAYS IN MATERIALS

Amorphous or polycrystalline coating of one of adjacent surfaces in a two-crystal interferometer permiting to decrease anomalously the absorption factor of X-rays in the second crystal is shown theoretically. Basing on this result, a simple monochromator with high aperture ratio is suggested for X-ray focusing in thick crystals.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 678.5:621.891

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Н. КАРАПЕТЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕНИИ АЛИФАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ

Методом масс-спектрометрии исследованы трибохимические процессы, происходящие в поверхностных слоях алифатических полиамидов. Показано, что интенсивность износа полиамидов зависит от скорости трибораспада, протекающего по α-метиленовой группе амидной связи. С увеличением гетероцепной характеристики уменьшается вероятность гомолитического распада связи – NH–CH₂ – и повышается износостойкость материалов.

Ключевые слова: полимер, коэффициент трения, износостойкость, термо- и трибораспад.

Исследования, проведенные в области трибологии полимеров за последние несколько лет, показали, что существует функциональная взаимосвязь между важнейшими эксплуатационными характеристиками полимеров и трибохимическими процессами, протекающими в зоне фрикционного контакта. Установление закономерностей протекания этих процессов и разработка на их основе методов управления структурой и свойствами полимеров представляют большой научный интерес для целенаправленной разработки новых износостойких полимерных материалов [1-5].

Целью настоящей работы является исследование характера трибохимических процессов, протекающих при трении алифатических полиамидов.

Среди большого числа термопластичных полимеров, используемых в качестве связующих антифрикционных материалов, значительный интерес представляют алифатические полиамиды ПА-6 и ПА-66 ввиду их высоких показателей разрушающегося напряжения при растяжении и изгибе, стойкости к ударным нагрузкам и вибрационным воздействиям, устойчивости к агрессивным средам, структурные формулы которых имеют вид

ПА-6: [– NH – (CH2)5– CO –]n, ПА-66: [– NH – (CH2)6– NH – CO – (CH2)4– CO–]n.

В табл.1 показаны теплофизические свойства исследуемых полиамидов.

Таблица 1

r < 7

Геплофизические свойства	исследуемых полиамидов [6	l.
--------------------------	---------------------------	----

Материал	ГПЦ, %	ПЭК, <i>кал/см³</i>	Нµ при 30 ° <i>С</i> , <i>МПа</i>	Н _µ при 75 <i>°C</i> , <i>MПа</i>	Температура плавления, ^о С
ПА-6	20	122,7	31	26	225
ПА-66	20	130,8	31	25	250
ПА-610	14	94,63	29	22	210
ПА-12	8	60,94	28	15	160

Алифатические полиамиды отличаются друг от друга строением элементарного звена макромолекулы, что, во-первых, обусловлено гетероцепной характеристикой (ГПЦ), т.е. соотношением амидных и метиленовых групп в звене (в мольных процентах) [7], во-вторых, расположением амидной связи, которая зависит от способа получения полимера. Как видно из табл. 1, хотя ПА-6 и ПА-66 имеют одинаковые значения ГПЦ и относительно близкие значения температур плавления и плотности энергии когезии (ПЭК), однако они отличаются строением звена. ПА-6 получают гидролитической полимеризацией є-капролактама и характеризуются расположением звеньев "голова к хвосту", а РА-66-поликонденсацией гексаметилендиамина с адипиновой кислотой с "зеркальным" чередованием элементарных звеньев, где амидная связь расположена "голова к голове" [6].

Известно [8-9], что существенное влияние на износостойкость и антифрикционные свойства алифатических полиамидов оказывают условия трения. В сочетании с относительно высоким коэффициентом трения и при более жестких условиях сухого трения (PV $\geq 2,0$ *МПа ^м/с*) значительно ухудшаются трибологические характеристики полиамидов. Для сравнительной оценки трибологических свойств исследуемых полиамидов приведены обобщенные значения интенсивности изнашивания, коэффициента трения и поверхностной температуры от условия трения (габл.2).

Таблица 2

Трибологические свойства алифатических полиамидов [10-11]

Материал	Интенсивность	Коэффициент	Температура на
	изнашивания,	трения,	фрикционном
	I-10-9	f	контакте, $artheta$, $^{\it 0}$ С
ПА-6	12,2 / 46,5	0,24 / 0,30	90 / 100
ПА-66	10,5 / 45,3	0,28 / 0,34	100 / 125
ПА-610	18,5 / 60,4	0,32 / 0,40	100 / 125
ПА-12	24,2 / 73,5	0,36 / 0,46	110 / 130

В числителе указаны показатели испытания на машине трения СМТ-1 по схеме вал-частичный вкладыш ($P_a=1,91$ *МПа*, V=0,78*м/с*, сталь 45, HRC 48...52, R_a=1,25*мкм*), в знаменателе – на машине торцевого трения ИМ-58 ($P_a=0,2$ *МПа* и V=1,7*м/с*, сталь 1Х13, HB 150...170, R_a=1,25*мкм*)

Исследования показали, что строение звена алифатических полиамидов влияет на их трибологические характеристики. Однако количество амидных групп, приходящихся на

звено алифатической цепи, не объясняет однозначно изменение коэффициента трения и износа в рассматриваемом ряду полимеров. Для выяснения этого вопроса необходимо изучить влияние химического строения звена макромолекулы полиамидов на трибохимические превращения, протекающие в поверхностных слоях.

Анализируя трибологические свойства исследуемых полиамидов, следует указать, что особенности их трения обычно [12-13] связывают с наличием в звене макромолекулы –NH– CO– групп. С другой стороны, в работах [14-15] отмечалось, что в различного рода химических превращениях полиамидов, в том числе связанных с термовоздействием, значительная роль принадлежит не только амидной группе, но и α-метиленовой связи – NH–CH₂–.

Для изучения трибохимических процессов, происходящих в поверхностных слоях полиамидов ПА-6 и ПА-66, было произведено масс- спектрометрическое исследование этих слоев путем термического разложения в масс-спектрометре MS-30.

Масс-спектрометрический анализ продуктов деструкции, зарегистрированных в спектрах (табл.3 и рис.1), а также ранее полученные результаты [14-15] свидетельствуют о том, при повышенных температурах основным процессом, обусловливающим ухудшение трибологических свойств полиамидов, является термоокислительная деструкция, протекающая по свободно-радикальному механизму [16-17]. Наиболее чувствительными к термоокислению в полиамидах являются аморфные области, которые легко подвергаются энергетическим воздействиям [15].

Таблица З

Ион,	Структура соединения					
m/z	ПА-6	ПА-66				
30	$\left[CH_{3}-CH_{3}\right]^{+}$	$[CH_3 - CH_3]^{\dagger}$				
41	$\left[CH_3-C=N\right]^+$	$\left[CH_3 - C = N\right]^+$				
42	[-N=C=O] ⁺	$[-N=C=O]^+$				
43	[HN=C=O] ⁺	[HN=C=O] ⁺				
55	$[CH_3 - CH_2 - C = N]^+$	$\left[CH_3-CH_2-C=N\right]^+$				
56	[-(CH ₂) ₄ -] ^{+.}	$[-(CH_2)_4-]^{+}$				
84	-	$[CH_2 - CH_2 - CH_2 - N = C = O]^+$				
85	$[CH_3 - CH_2 - CH_2 - N = C = O]^+$	-				
111	$[CH_2 = CH_{-} (CH_2)_3 - N = C = O]^+$	-				
113	$[CH_{3} - (CH_{2})_{4} - N = C = O]^{+}$	-				
114	[NH ₂ – (CH ₂) ₅ – CO–] ^{+.}					
143	-	$[CH_3 - (CH_2)_2 - NH - CO - (CH_2)_3 - CH_3]^+$				

Продукы термо- и трибодеструкции ПА-6 и ПА-66

Как видно из рис.1, процесс термораспада ПА-6 и ПА-66 происходит как бы двухступенчато, достигая максимумов выделения продуктов при температурах 200 \mathcal{C} (область предплавления) и 320...420 \mathcal{C} .

Молекулярный ион m/z 113 (табл.3) и соответствующий ему однозарядный ион m/z 114 являются довольно интенсивными пиками в спектре ПА-6, но легко фрагментируют под электронным ударом по связи –С–С–, что приводит к появлению в спектре наиболее интенсивных пиков m/z 30, 41, 42, 43, 55, 56, 84, 85.

Природа продукта с m/z 113, появляющегося в спектрах ПА-6 при 200 °С, может быть результатом двух параллельно протекающих процессов: при пиролизе - по механизму деполимеризации внутримолекулярно или при аминолизе и ацидолизе - по концевым звеньям, что приводит к образованию молекулярного иона m/z 113, либо гомолитического разрыва связи –СН2–NH–, которая является самой непрочной в звене полиамида на основании квантомеханических расчетов, когда молекулу рассматривают в виде совокупности взаимодействующих связанных электронных пар [18].



Рис.1. Влияние температуры на характер выделения основных продуктов деструкции полиамидов ПА-6 (а) и ПА-66 (б) в камере масс-спектрометра

Повышение температуры деструкции до 375...400 \mathcal{C} приводит к значительному увеличению скорости распада полимера. Полный ионный ток (ПИТ) повышается в три раза по сравнению с ПИТ при 200 \mathcal{C} Основным продуктом деструкции в спекре ПА-6 является молекулярный ион m/z 113, большая часть выхода которого связана, видимо, с процессом деполимеризации [16]. Соответственно повышается и скорость выделения более мелких ионов m/z 30, 43, 95, 111 по сравнению с деструкцией при 200°С.

Таким образом, при термодеструкции ПА-6 наблюдаются параллельно протекающие процессы, связанные как с расщеплением амидной связи, т.е. с деполимеризацией и гидролизом, так и с гомолитическим распадом энергетически слабой связи – NH–CH₂–.

Для выявления природы трибохимических процессов, происходящих в поверхностных слоях полиамидов, было проведено исследование образцов на установке, размещенной вблизи области ионизации [19].

Результаты исследования процесса трения образцов в течение 30 *мин* непосредственно в камере масс-спектрометра свидетельствуют о протекании активных трибохимических процессов, приводящих к значительному выделению продуктов деструкции. Набор продуктов аналогичен по составу продуктам термораспада (табл.3), что свидетельствует о сходной природе данных процессов. Однако процесс выделения основных продуктов при трибораспаде и их соотношение имеют ряд существенных отличий по сравнению с процессом термораспада.

При общей оценке характера трибораспада исследуемых полиамидов следует отметить, что для каждого из них можно выявить временный период начала максимального выделения продуктов деструкции, образовавшихся при трении. Для ПА-12 этот период составляет 9 *мин* от начала процесса трения, для ПА-610 - 10 *мин*, ПА-6 - 15 *мин*, ПА-66 - 16 *мин*. С другой стороны, при анализе трибологических характеристик (табл.2) можно заметить, что износостойкость исследуемых полиамидов возрастает в том же ряду ПА-12, ПА-610, ПА-6, ПА-66. Наблюдаемая корреляция свидетельствует о том, что износостойкость полиамидов с различной молекулярной структурой зависит от интенсивности трибодеструкции.



Рис. 2. Выделение основных продуктов трибодеструкции при трении образцов из ПА-6 (a), ПА-66 (б), ПА-610 (в) и ПА-12 (г) в камере масс-спектрометра

Начальный период трения для ПА-6 и ПА-66 характеризуется незначительной скоростью выделения продуктов трибораспада. Начиная с 10 *мин* трения интенсивность процесса увеличивается. Скорость образования иона m/z 113 и продукта его фрагментации m/z 85 после достижения максимальной величины стабилизируется. После 10 *мин* трения

неуклонно нарастает скорость образования алифатического осколка m/z 30. Накопление его в газовой фазе нельзя приписать целиком фрагментации крупных продуктов, например, m/z 113, 85, поскольку характер их образования несимбатен характеру образования иона m/z 30. Это свидетельствует о том, что в числе первичных актов при трибохимических превращениях может иметь место распад алифатической цепи –C–C–.

Обращает на себя внимание тот факт, что в отличие от процесса термораспада, где интенсивность выделения иона m/z 111 значительно ниже интенсивности выделения m/z 113 и продуктов его фрагментации, при трении образование продукта m/z 111 заметно возрастает, особенно после 15 *мин* трения. Одновременно наблюдается стабилизация скорости выделения фрагмента m/z 113 и увеличение интенсивности образования продукта m/z 42, являющегося фрагментом m/z 111.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при трибодеструкции ПА-6, в отличие от термодеструкции, наблюдается усиление вероятности распада алифатической цепи и возрастание интенсивности трибораспада по механизму гомолитического распада связи – NH–CH₂– с образованием азотсодержащих продуктов.

При анализе данных трибодеструкции полиамидов можно отметить, что общим характерным фактором для них является наличие в спектрах азотсодержащих ионов, соответствующих структурам с группами –N=C=O и –C=N. Вероятно, это связано с наличием в полиамидах амидной и метиленовых групп. Появление этих продуктов объясняется гомолитическим распадом связи –NH–CH2–. Дальнейшая их фрагментация под электронным ударом протекает, видимо, по алифатическому хвосту осколка, и поэтому во всех случаях отмечается наличие интенсивных низкомолекулярных ионов, содержащих азот, например, m/z 43, и низкомолекулярных алифатических ионов, например, m/z 30. Если рассмотреть соотношение вышеуказанных ионов и сопоставить их между собой по "валовому" выходу за весь период процесса, то получим: 4,13 (ПА-12), 3,13(ПА-610), 0,6 (ПА6),0,54 (ПА-66). При сопоставлении интенсивности изнашивания исследуемых полиамидов и соотношенния $\sum Im/z43 / \sum Im/z30$ (табл. 4) видно, что трибораспад, сопровождающийся преобладающим количеством азотсодержащих фрагментов в общей доле выделявшихся продуктов, приводит к понижению износостойкости полиамидов, т.е. трибоустойчивость звена алифатического полиамида зависит от интенсивности гомолитического распада связи –NH- CH2-.

Материал	ГЦП, %	Интенсивность	\sum Im/ z43
		изнашивания,	$\overline{\Sigma} \text{ Im}/730$
		I·10 ⁻⁹	<u></u> iii/ 2,50
ПА-12	8	24,2 / 73,5	4,13
ПА-610	14	18,5 / 60,4	3,13
ПА-6	20	12,2 / 46,5	0,6
ПА-66	20	10,5 / 45,3	0,54

Гетероцепная характеристика, износостойкость и трибораспад алифатических полиамидов

Таблица 4

Таким образом, проведенные исследования показали, что интенсивность износа алифатических полиамидов зависит от скорости распада, протекающего по метиленовой группе амидной связи. По мере уменьшения количества метиленовых групп между амидными группами, т.е. с увеличением ГЦП характеристики, уменьшается вероятность гомолитического распада –NH–CH₂– и повышается износостойкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Коршак В.В., Грибова И.А., Краснов А.П., Погосян А.К., Карапетян А.Н., Трохова С.Ш. Исследование трибохимических превращений при трении сополимера формальдегида с 1,3диоксоланом // Трение и износ.-1988.-Т. 9, № 5.- С.773-778.
- Pogosian A.K., Karapetyan A. N., Oganesyan K.V. Tribochemical processes and wear of composite polymer materials // Proc. of Inter. Conf. Wear of Materials.-1989. Denver, USA.-Vol.2. - P.521-528.
- 3. Грибова И.А., Краснов А.П., Чумаевская А.Н. Химическое строение полимеров и трибохимические превращения в полимерах и наполненных системах // Трение и износ.- 1997.- Т.18, N2.- С. 258-279.
- 4. **Карапетян А.Н.** Трибохимические процессы и антифрикционные свойства композиционных полимерных материалов: Тематический сб. науч. трудов/ ГИУА.- Ереван, 2002. Т.1.-С.199 200.
- 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.
- 6. Коршак В.В. Технология пластических масс.- М.: Химия, 1985.-500 с.
- 7. Коршак В.В., Фрунзе Т.М. Синтетические гетероцепные полиамиды.-М.: Наука, 1962.-523 с.
- 8. **Холодилов О.В.** Влияние эксплуатационного режима на трение термопластов // Трение и износ.-1985.-T.5, N.4.-C.678-682.
- 9. Холодилов О.В. Влияние скорости скольжения на особенности изнашивания термопластов // Трение и износ.-1984. -Т.5, N.3.-C.431-436.
- 10.**Карапетян** А.Н. Триботехнические свойства самосмазывающихся композитов на основе гетероцепных полимеров // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004.-Т.57, N.1.-С.58-61.
- 11. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс: Обзор. информ / Под ред. **Г.В. Сагалаева, Н.Л. Шембель.** -М.: Изд. стандартов, 1982. 62 с.
- 12. Билик Ш.М., Донский В.И., Чернасская П.М. Строение полимеров и их коэффициенты трения по стали: ДАН СССР.-1970.-Т.195, N.5.-С.1069-1071.
- 13. **Лапшин В.В., Андреева Т.И.** Влияние молекулярного строения полимеров на коэффициент трения и износостойкость // Пластические массы.-1983.- N.4-C.19-20.
- 14. Коршак В.В., Грибова И.А., Фрунзе Т.М. и др. Исследование трения поликапроамида различной структуры // Трение и износ.- 1982.-Т.3, N.4.- С.621-625.

- Коршак В.В., Грибова И.А., Гуреева Г.И. и др. Исследование трения сополимеров ε-капролакмата с ε-додекалактамом // Трение и износ.- 1983.-Т.4, N.6.- С.965-971.
- 16. Коварская Б.М., Блюменфельд А. Б., Левантовская И.И. Термическая стабильность гетероцепных полимеров.-М.: Химия, 1977.-264с.
- 17. Левантовская И.И. Старение и стабилизация полиамидов. В кн.: Старение и стабилизация полимеров.-М.: Наука, 1964.- С.197-236.
- 18. Тождаев С.Х., Борисов Ю.С. Расчет энергетических характеристик молекул методом взаимодействующих связей // Изв. АН СССР. Сер. Химия.-1988.- N.7.- С.1680-1683.
- 19. Некрасов Ю.С., Жохов В.Е., Адериха В.Н. Установка для исследования трибохимических процессов в жесткоцепных полимерах методом масс-спектрометрии // Трение и износ.- 1983.- Т.4, N.1.- С.147-150.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.11.2003.

Ա.Ն. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ՇՓԱՔԻՄԻԱԿԱՆ ՊՐՈՑԵՄՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱԼԻՖԱՏԻԿ ՊՈԼԻԱՄԻԴՆԵՐԻ ՇՓՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Մասս-սպեկտրոմետրիայի մեթոդով ուսումնասիրված են ալիֆատիկ պոլիամիդների շփման ժամանակ մակերևութային շերտերում ընթացող շփաքիմիական պրոցեսները։ Ցույց է տրված, որ պոլիամիդների մաշման ինտենսիվությունը կախված է շփակազմալուծման արագությունից, որն ընթանում է ամիդային կապի α-մեթիլային խմբով։ Հետերոցիկլիկ բնութագրի աձման դեպքում փոքրանում է – NH–CH₂ – կապի հոմոլիտիկ կազմալուծման հավանականությունը և մեծանում է նյութերի մաշակայունությունը։

A.N. KARAPETYAN

STUDY OF TRIBOCHEMICAL PROCESSES OF ALIPHATIC POLYAMID FRICTION

The tribochemical processes in superficial layers of aliphatic polyamids by the massspectrometric method are investigated. It is testified that the wear intensity of polyamids depends on the tribodisintegration speed, running by α -methylene group of the amide bond. With increasing the heterochained characteristics the probability of homolytic disintegration of the bond – NH–CH₂ – is decreased and the wear resistance of materials is increased.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 669.018.95; 621.316.8

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Д.А. ГЕОДАКЯН, С.В. СТЕПАНЯН, К.Д. ГЕОДАКЯН

ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ РЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ СТЕКЛОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

Исследованы возможность получения высокотехнологичных объемных резисторов высокого класса, а также способы получения этих резисторов методами перемешивания компонентов в расплаве. Установлено, что методом горячего прессования получаются высококачественные образцы, температурный коэффициент электрического сопротивления которых в несколько раз ниже соответствующего металла.

Ключевые слова: стекло, металл, композиция, резистор.

Стеклометаллические композиции используются, главным образом, для получения электропроводящих или резистивных элементов пленочного типа, применяемых в электронной технике. В научной литературе, особенно в патентной, существует много работ, посвященных составам и свойствам этих материалов. Не останавливаясь на них, отметим, что авторы работ используют стекла и электропроводящие материалы самых различных составов и свойств. Стеклофаза в основном рассматривается ими в качестве инертной среды, выполняющей роль связки и разбавителя электропроводящей фазы. Соответственно, в литературе вопросам однородности и микроструктуры полученных материалов не уделено особого внимания. В тех же работах, где эти вопросы в той или иной степени освещены, отсутствуют сведения об электрических свойствах композиций ввиду их предназначенности в качестве конструкционных материалов [1-4].

Еще в 70-е годы нами было установлено, что в высокооднородных керамических композициях, состоящих из компонентов с резко отличающейся электрической проводимостью, перенос электричества осуществляется как по цепочкам непосредственно контактирующих между собой частиц высокопроводящего компонента, так и по низкопроводящей фазе, покрывающей эти частицы тонкими пленками [5-8].

Стеклометаллическая композиция – идеальный объект для осуществления указанного механизма переноса электричества. Она состоит из высокоэлектропроводящей металлической фазы в виде тонкодисперсного порошка и стеклообразного диэлектрика, способного при синтезе композиций расплавляться, покрывая каждую частицу металла пленкой, толщина которой легко может быть регулирована изменением концентрации или дисперсности металлической составляющей. К тому же стекла и металлы обладают противоположными по знаку термическими коэффициентами электрического сопротивления (ТКС), что открывает возможность регулирования ТКС композиции.

Участие стеклофазы в переносе электричества, помимо теоретического, имеет и практическое значение. В частности, реализуя его, можно на основе сравнительно дешевых исходных материалов синтезировать композиции с требуемыми значениями электрического сопротивления и ТКС для замены сравнительно низкотехнологичных и дорогих линейных

резисторов проволочного типа. Однако в результате химического взаимодействия компонентов или окисления неблагородных металлических составляющих кислородом воздуха в процессе синтеза могут образоваться побочные фазы, также влияющие на электрические свойства материалов. Поэтому при синтезе таких композиций вопросы фазового состава и микроструктуры полученных материалов должны быть в центре внимания исследователей. Соответственно, в качестве первого этапа работ по определению возможности получения объемных резисторов высокого класса на основе дешевых стеклометаллических композиций нами было исследовано (методом дериватографии) окисление тонкодисперсных порошков металлов кислородом воздуха и взаимодействие этих же порошков со стеклами различного состава [9].

Были исследованы:

- алюминиевая пудра марки ПАП-1 по ГОСТ 5494-95 (остаток на сите 008 < 1%);
- бронзовая пудра марки БПО по ТУ 48-21-5-72 (остаток на сите 010 < 0,5%);
- никелевый порошок марки ПНК 2К9 по ГОСТ 9722-79 (размеры частиц 71...100 мкм);
- железо-хромо-никелевый порошок производства НИИ Хим. маш. (г. Москва, размеры частиц 200...300 мкм);
- свинцовое стекло состава (мас.%): 71,5 PbO; 15,6 B2O3; 11,0 SiO2; 1,9 Al2O3; ThD=430 °C;
- фосфатное стекло состава: 47 Р2О5; 18 ZnO; 10 В2О3; 10 СdO; 5 Na2O; 5 К2O; 4 TiO2; 1 СаO; THD = 490 °C;
- силикатное (оконное) стекло состава: 72,0 SiO₂; 15,0 Na₂O; 7,6 CaO; 3,5 MgO; 1,4 Al₂O₃; 0,4 SO₃; 0,1 Fe₂O₃; T_{HD} = 570 °C.

Полученные результаты представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

	I	стадия окислени	II стадия окисления		
Металл	Начало,	Максимум,	Прирост	Максимум,	Прирост
	°C	∘С ∘С массы, %		°C	массы, %
AI	340	586	1,8	-	-
Бронза	130	240	0,56	480	1,6
Ni	420	465	0,45	700	1,7
Fe-Cr-Ni	580	900	0,63	-	-

Окисление металлов на воздухе (в смесях с Al₂O₃)

Таблица 2

	Начало оки	сления в разли	ичных стеклах,	Начало взаимодействия с			
М		٥C		разли	чными стекла	ми, ⁰С	
Металл	Свиниовое	Фосфатное	Силикат-	Свинновое	Фосфатное	Силикатное	
Свини	Сынцовос	φοεφατίτος	ное	Свинцовос	φοεφατιιός	Ginnikarinoe	
AI	320	440	430	350	635	430	
Бронза	165	180	180	500	550	500	
Ni	420	420	320	620	540	730	
Fe-Cr-Ni	580	830	850	580	830	850	

Поведение металлов при нагревании в смесях со стеклами

Возможность синтеза стеклометаллических композиций, пригодных для получения объемных резисторов, в настоящей работе исследовалась следующими способами:

- перемешивание компонентов в расплаве стекла с последующей выработкой пресс-изделий по стекольной технологии;
- сухое или мокрое перемешивание компонентов в шаровой или планетарной мельнице с последующей холодной прессовкой и обжигом штабиков в инертной или воздушной атмосферах;
- перемешивание компонентов по второму способу с последующей горячей экструзией штабиков;
- перемешивание компонентов по этому же способу с последующей горячей прессовкой штабиков.

В качестве исходных компонентов для синтеза композиций были использованы те же металлы и стекла, что и в [9]. При этом стекла были предварительно измельчены в фарфоровой шаровой мельнице до средних размеров частиц ~ 10 *мкм*.

Для перемешивания расплава стекла необходимо, чтобы вязкость не превышала 100 пуаз. Такой вязкостью использованное нами свинцовое стекло обладает при температурах порядка 700 °C, фосфатное стекло – 1000 °C, силикатное стекло – 1200...1300 °C. Поэтому получение композиционных материалов первым способом на основе фосфатного и силикатного стекол не представлялось возможным из-за опасности химического взаимодействия, окисления или плавления металлов. Исходя из этого, опыты проводились только на расплавах свинцового стекла. Было установлено, что получить однородное распределение металлических порошков в расплаве стекла практически невозможно из-за спекания или частичного плавления порошков с образованием обособленных участков чисто металлических и стеклянных фаз. При этом были опробованы различные концентрации (5...40 мас.%) порошков алюминия, бронзы, никеля и сплава Fe-Cr-Ni. Электрическое сопротивление полученных материалов находилось в пределах 10⁵ ... 10⁸ *Ом.*

Смеси порошков для синтеза композиций по остальным способам готовились методом сухого или мокрого (спирт) перемешивания компонентов в шаровой (фарфор, 24 ч) или планетарной (халцедон, 6 ч) мельницах. Степень дополнительного измельчения исходных компонентов в процессе приготовления смесей не контролировалась. После мокрого перемешивания компонентов смеси высушивались при температуре 150 °C до полного удаления спирта (2 ч).

Для получения стеклометаллических композиций методом холодной прессовки с последующим обжигом приготовленные вышеописанным способом однородные смеси компонентов увлажняли (5...6 %) водой или насыщенным водным раствором поливинилового спирта, прессовали (100 *МПа*) в штабики (50 x 10 x 10 *мм*) и обжигали (аргон или воздух, 30 *мин*) при температурах, обеспечивающих максимальную плотность образцов. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Было установлено также, что образцы, содержащие бронзу выше 530 °С, вспучиваются, а образцы, содержащие Al, не растекаются даже при 980 °С. Композиции на основе свинцового стекла, содержащие Ni и сплав Fe-Cr-Ni, наоборот, растекались уже при температуре ~ 480 °С. Все образцы, включая содержащие Ni и сплав Fe-Cr-Ni, оказались диэлектриками $(R > 10^5)$ Ом), что обусловлено химическим взаимодействием тонкодисперсных порошков со металлов стеклами В процессе сравнительно продолжительного обжига, недостаточной концентрацией металлов или высокой пористостью образцов.

Таблица З

	Оптимальная т -ра обжига			Объемная масса образцов лля различных стекол.			Пористость образцов		
Металл,	Металл, для различных стекол, °С		текол, °С	г/см ³			%		
10 мас.%	Свин-	Фос-	Сили-	Свин-	Фос-	Сили-	Свин-	Фос-	Сили-
	цовое	фатное	катное	цовое	фатное	катное	цовое	↓ ос фатное	КАТ-
		T			T			1	ное
AI	545	530	880	3,68	2,37	2,23	33	12	8
Бронза	485	-"-	-"-	4,63	2,79	2,44	24	16	20
Ni	480	-"-	630	5,41	2,83	2,43	12	15	19
Fe-Cr-Ni	480	-"-	-"-	5,31	2,31	2,31	12	9	21

Основные свойства образцов, полученных методом холодного прессования и обжига в аргоне

Для уточнения причины отсутствия проводимости образцов выполняли дополнительную серию экспериментов с силикатным стеклом, содержащим медный порошок с размерами частиц 50...100 *мкм*. Выяснилось, что композиции, содержащие 1...15 мас.% стекла и 85...99 % меди, после обжига в атмосфере аргона при 700 °C (30 *мин*) обладают почти металлической проводимостью (R < 10⁻² *Om*). При концентрациях стекла выше 25 % образцы вспучиваются, но вплоть до 70 % остаются хорошими проводниками (R = 10⁻² ... 10³ *Om*). При концентрациях меди ниже 30 % (28...5 %) сопротивления образцов превышали 10⁵ *Om*.

Полученные результаты показывают, что причиной отсутствия проводимости в случае образцов с высокодисперсными порошками металлов является химическое взаимодействие компонентов в условиях достаточно длительных выдержек при высоких температурах в процессе обжига, а в случае с низкодисперсными порошками – недостаточно высокая концентрация металлов. В любом случае при формовании образцов по способу холодного прессования и обжига, вряд ли можно будет добиться образования вокруг частиц металла стеклопленки толщиной, достаточной для участия в электропередаче. Следовательно, по этому способу трудно будет контролировать и, тем более, регулировать

значение ТКС композиции, необходимой для получения объемных резисторов высокого класса. В атмосфере воздуха получение высококачественных резисторов еще больше затрудняется из-за опасности окисления металлов.

Способ горячей экструзии проверялся на композициях свинцового стекла с 5 и 10 мас.% алюминиевой пудры. Опыты проводились на экструдере объемом около 100 см³, внутренним диаметром 30 и выходным отверстием 13 мм.

Использовали следующие приемы работы:

- непосредственное экструдирование порошка при температурах 400...450 °C;
- экструдирование при температурах 400...450 °C штабиков (d = 30, h = 60 *мм*), полученных методом холодного, сухого прессования (P = 100 *МПа*);
- экструдирование при 400...450 °C штабиков (d = 30, h = 60 *мм*), полученных методом прессования и обжига (30 *мин*) при температуре 420 °C.

Было установлено, что, независимо от способа экструзии, образцы, полученные при температуре ~ 420 °C, имели гладкую поверхность, были практически беспористыми, однако под действием внутренних напряжений после выхода из экструдера искривлялись и при резком охлаждении разрушались.

Электрические сопротивления обломков образцов, содержащих 10 мас. % Al, были в пределах 0,1...1,0 *Ом*, 5 мас. % Al – выше 10⁵ *Ом*. На основе вышеизложенного был сделан вывод о том, что методом горячей экструзии можно получить объемные резисторы, однако требуется строгое соблюдение технологических режимов, в частности температуры и продолжительности, не только процесса экструзии, но и последующего отжига штабиков.

Устройство, использованное нами для проверки способа получения композиций методом горячего прессования, давало максимальную температуру порядка 450 °C. Поэтому вынуждены были работать только на наиболее легкоплавком, свинцовом стекле. В качестве металла в композициях была использована алюминиевая пудра как более доступная, мелкодисперсная и, по сравнению с бронзой, устойчивая на воздухе.

Перемешивание предварительно тонко измельченного стекла (меньше 10 *мкм*) с алюминиевой пудрой осуществляли сухим способом в фарфоровой шаровой мельнице (3 ч). Концентрацию алюминия варьировали в пределах 4...10 мас. %. В этом интервале концентраций, согласно предварительным экспериментам, ожидалось образование наиболее интересных по электрическим свойствам композиций.

Готовые смеси загружали в предварительно нагретую до 420 °С стальную прессформу, ожидали 2...3 *мин* для выравнивания температуры порошка с температурой формы и медленно (в течение минуты) повышали давление до 100 *МПа*, выдерживали 1 *мин* и также медленно отпускали. После извлечения из формы образцы подвергались отжигу. По внешнему виду они оказались совершенно однородными, имели блестящую, почти полированную поверхность, высокую механическую прочность и легко подвергались механической обработке (резка, шлифовка, полировка).

Для определения воспроизводимости свойств по длине образцов из штабиков размерами 50 x 10 x 10 *мм* были вырезаны образцы длиной 10 *мм* и определены их объемные массы, пористость и удельные объемные сопротивления. Полученные результаты суммированы в табл. 4.

На основе полученных результатов можно констатировать, что для синтеза высококачественных резистивных материалов методом горячего прессования, помимо

фазовой однородности исходных смесей, необходимо соблюдать также термическую однородность в процессе формования. Последнее условие в наших экспериментах не было соблюдено из-за несовершенной конструкции использованного нами устройства горячего прессования (нагреваемая стальная плита, на которую ставилась пресс-форма, закрытая для теплоизоляции асбестовой тканью). Именно этим и объясняется разброс между значениями свойств не только среди различных образцов, но и образцов, вырезанных из одного и того же штабика.

Таблица 4

Содержа-	Объемная	масса, <i>г/см³</i>	Пористость, %		Уд. объемное эл.	
ние АГВ			_		сопротивле	ние, <i>Ом·см</i>
циях со свинцо- вым стеклом,	Среднее по 4 образцам из штабика 1	Среднее по 4 образцам из штабика 2	Среднее по 4 образцам из штабика 1	Среднее по 4 образцам из штабика 2	Среднее по 4 образцам из штабика 1	Среднее по 4 образцам из штабика 2
мас. %						
4	$5,41 \pm 0,01$	5,31 ± 0,13	$5,2 \pm 0,2$	7,8 ± 2,6	5100 ± 50	5225 ± 44
5	$4,94\pm~0,14$	$5,35\pm0,03$	13,0 ± 2,5	$5,8\pm0,6$	5100 ± 50	$5070\pm~40$
6	$4{,}68\pm0{,}13$	$5,19\pm0,16$	$17,2 \pm 1,8$	8,2 ± 2,8	2370 ± 250	1240 ± 430
7	$4,44\pm\ 0,07$	$5,18\pm0,01$	21,0 ± 1,3	7,7 ± 0,1	247 ± 65	152 ± 22
8	$4,87\pm0,07$	$4,93 \pm 0,04$	13,6 ± 0,4	11,8 ± 0,7	50 ± 15	30 ± 6
9	4,91 ± 0,03	$4,47 \pm 0,02$	11,8 ± 0,5	19,6 ± 0,3	6,6 ± 2,4	$2,5 \pm 0,3$
10	$4{,}74\pm~0{,}01$	$4{,}73\pm~0{,}07$	$14,2\pm\ 0,2$	$14,5\pm\ 1,2$	$0,33\pm\ 0,11$	$0,\!17\pm0,\!04$

Свойства образцов, полученных методом горячего прессования (воздух, 420 °C)

Образцы, полученные методом горячего прессования на основе свинцового стекла и алюминиевой пудры, испытывались также при различных значениях силы тока (для оценки максимальной мощности рассеивания) и различных температурах (для определения значения ТКС). Результаты этих испытаний приведены в табл. 5.

Таблица 5

Электрические сопротивления при различных силах тока и ТКС алюминийсодержащих композиций на основе свинцового стекла

Содержа-	Эл	ТКС, К ⁻¹ , в						
ние Al , <i>мас.</i>		значениях силы тока, мА						
%	2	2 32 350 1200						
7	$215,0 \pm 1,8$	$215,5 \pm 2,8$	235,1 ± 3,4		+ 1,6 · 10 ⁻³			
8	$50,6\pm~4,0$	$50,1 \pm 4,0$	$49,4\pm~0,1$	$51,3\pm0,4$	+ 2 · 10 ⁻³			
9	$3,18 \pm 0,16$	$3,22\pm~0,02$	$3,\!24\pm0,\!18$	$4,40\pm\ 1,06$	+ 1,5 · 10 ⁻³			
10	$0,25\pm\ 0,02$	$0,25\pm\ 0,01$	$0,26\pm\ 0,02$	$0,29\pm\ 0,02$	+ 2 · 10 ⁻³			

Как следует из табл. 5, сопротивления образцов в пределах 2...1200 *мА* достаточно стабильны. Это гарантирует получение резисторов с высокими рассеивающими мощностями. ТКС образцов несколько выше требований ГОСТ 6513-75, установленного для

линейных резисторов (не более $5 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$), однако ниже ТКС металлического алюминия (4,5 $\cdot 10^{-3}$ [10]).

Таким образом, соответствующим выбором состава, размеров частиц исходных компонентов, а также условий перемешивания и синтеза стеклометаллических композиций можно добиться участия стеклофазы, наряду с металлической, в переносе электричества и, тем самым, регулировать значения электрического сопротивления и ТКС композиции в достаточно широких пределах. На основе таких композиций методами горячей экструзии или горячего прессования, при соблюдении определенных условий, можно получить высокотехнологичные и сравнительно дешевые объемные резисторы взамен линейных проволочных.

В окончательных рекомендациях по созданию новых материалов для линейных объемных резисторов можно останавливаться на легкоплавких стеклах с температурой размягчения порядка 400 °C в качестве матрицы и на тонкодисперсных (до 10 *мкм*), металлических порошках с температурой окалинообразования не ниже 500 °C в качестве наполнителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wenzel W., Cudenau H. W., Mey P. Fachber Hutfen Prax Metallweiterverarb.- -1976.- V. 14, N2. -P. 107-115
- 2. Bergmann H.W., etc. Z. Metalik. -1979.- V. 70, N12. P. 802.
- 3. Muller G. Fernwenftechn and Mesytechn. –1979. V. 87, N3. P. 110-113.
- 4. **Иванов С. В., Лысенко Е.В., Щорбань Н.И.** Антифракционные и фракционные материалы. Киев: Наукова думка, 1978. С. 110-117.
- Геодакян Д. А., Костанян К. А., Мкртчян Л. А., Григорян Л. Т., Унанян Л. Г. Механизм влияния окислов Сu, Mn, Zn, Sb на спекаемость и электропроводность SnO₂ // Тезисы докл. IV Всесоюзн. совещ. по высокотемпературной химии силикатов и окислов. - Ленинград, 1974, С. 166-167.
- 6. Геодакян Д. А., Григорян Л. Т., Костанян К. А., Мкртчян Л. А. Физика спекания легированной окиси олова // Стекло и керамика. 1976.- №12. С.24-27.
- Геодакян Д. А., Алексанян О. А. Электронно-микроскопическое исследование процесса обжига SnO₂, легированной окисью меди // Мат. IV Респ. совещ. по неорг. химии.- Ереван, 1978. - С. 91-95.
- 8. **Геодакян Д. А., Григорян Л. Т., Костанян К. А.** Активированное спекание двуокиси олова // Изв. АН. СССР. Неорг. мат. – 1976. - Т. 12, №2. - С. 350-351.
- 9. **Геодакян Д. А., Степанян С. В., Сагателян С. Т.** Окисление тонкодисперсных металлов на воздухе и в смесях со стеклами // Вестник строителей Армении. 2001. Спец. выпуск 2 (20). С. 17-19.
- 10. Справочник химика. 1963. Т. 1. С. 931.

НПП материаловедения. Материал поступил в редакцию 12.07.2003.

Ջ.Ա. ԳԵՈԴԱԿՅԱՆ, Ս.Վ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Կ.Ջ. ԳԵՈԴԱԿՅԱՆ

ԱՊԱԿԵՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԲԱՂԱԴՐԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ ՌԵԶԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ուսումնասիրված է բարձր տեխնոլոգիական և տեխնիկական հատկություններով oժտված ծավալային էլեկտրադիմադրողական տարրերի տարբեր եղանակներով ստացման հնարավորությունը։ Պարզված է, որ տաք մամլմամբ կարելի է ստանալ էլեկտրադիմադրողական տարրեր, որոնց էլեկտրական դիմադրության ջերմաստիձանային գործակիցը մի քանի անգամ փոքր է համապատասխան մետաղական բաղադրամասի գործակցից։

J.A. GEODAKYAN, S.W. STEPANYAN, K.J. GEODAKYAN

THE POSSIBILITY OF GENERATING VOLUMETRIC RESISTORS BASED ON GLASS-METALLIC COMPOSITIONS

A possibility of generating high technology, high-class volumetric resistors, as well as ways of generating such resistors by methods of mixing components in a fusion have been researched. It is found out that high quality samples having a temperature coefficient of electric resistance several times lower than that of a corresponding metal can be generated by a hot pressing method.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 539.3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Г.А. ГЕВОРКЯН , В.Р. МАНУСАДЖЯН

ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ПОЛЯ

Предлагается модификация метода конечных элементов треугольной формы, при котором решения двумерных задач теории поля сводятся к задачам квадратичного программирования. Приведен алгоритм их решения.

Ключевые слова: конечные элементы, квадратичное программирование, узловые функции, однородная функция второй степени, алгоритм.

Уравнение, описывающее поведение некоторой неизвестной физической величины Φ , зависящее от двух переменных, может быть записано в виде [3]

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + \Omega = 0, \qquad (1)$$

где Φ - искомая функция, которая должна удовлетворять граничному условию частной задачи; k_x , k_y и Ω - известные функции от x и y.

К этому уравнению в практике приводятся задачи: теплопроводности, фильтрации в пористой неоднородной среде, распределения электрического (или магнитного) потенциала, кручения анизотропных призматических стержней, изгиба призматических балок и т. д.

Уравнение (1) и граничное условие единственным образом определяют задачу. Известно [3], что с помощью вариационного исчисления формулируется эквивалентная к ней следующая задача: требуется найти неизвестную функцию Φ , для которой взятый по всей области двойной интеграл

$$\chi = \iint \left[\frac{1}{2} \{k_{x} (\frac{\partial \Phi}{\partial x})^{2} + k_{y} (\frac{\partial \Phi}{\partial y})^{2}\} - \Omega \Phi \right] dxdy, (k_{x} > 0, k_{y} > 0)$$
(2)

принимает минимальное значение, при условии, что Ф удовлетворяет граничным условиям рассматриваемой частной задачи.

Рассмотрим двумерную область, которая разделена на $s \in \overline{N} = \{1, 2, ..., \overline{n}\}$ конечных элементов треугольной формы с узлами i, j, m. Узловые значения функции Φ для s-го конечного элемента зададим вектором $\Phi^s = (\Phi^s_i, \Phi^s_j, \Phi^s_m)^T$. Тогда для функции Φ внутри элемента имеем [3]

$$\Phi = (N_i, N_j, N_m) \Phi^s, \qquad (3)$$

где

$$N_{i} = (a_{i} + b_{i}x + c_{i}y)/2\Delta$$
, (4)

$$a_{i} = x_{j}y_{m} - x_{m}y_{j}, \quad b_{i} = y_{j} - y_{m}, \quad c_{i} = x_{m} - x_{j},$$
 (5)

 $\Delta-$ площадь треугольника ijm .

Остальные величины, входящие в (3), можно получить циклической перестановкой индексов ijm в выражениях (4) и (5).

Так как векторы Φ^{s} ($s \in \overline{N}$) однозначно определяют функцию во всей области, функционал χ может быть минимизирован по отношению к этим величинам [3].

Обозначим через χ^s величину функции (2) для s — го элемента. Принимая k_x , k_y и Ω за постоянные величины внутри элемента и произведя интегрирование, выражение (2) перепишем в виде

$$\chi^{s} = \frac{1}{2} (\Phi^{s})^{\mathrm{T}} \mathbf{h}^{s} \Phi^{s} + (\Phi^{s})^{\mathrm{T}} \mathbf{P}_{s}, \qquad (6)$$

где

 \mathbf{P}^{s}

$$= (\mathbf{P}_{i}^{s}, \mathbf{P}_{j}^{s}, \mathbf{P}_{m}^{s})^{\mathrm{T}} = \left(-\frac{\Omega\Delta}{3}, -\frac{\Omega\Delta}{3}, -\frac{\Omega\Delta}{3}\right)^{\mathrm{T}},$$
(7)
$$\mathbf{h}^{s} = \frac{\mathbf{k}_{x}}{4\Delta} \begin{vmatrix} \mathbf{b}_{i}\mathbf{b}_{i} & \mathbf{b}_{j}\mathbf{b}_{i} & \mathbf{b}_{m}\mathbf{b}_{i} \\ \mathbf{b}_{i}\mathbf{b}_{j} & \mathbf{b}_{j}\mathbf{b}_{j} & \mathbf{b}_{m}\mathbf{b}_{j} \\ \mathbf{b}_{i}\mathbf{b}_{m} & \mathbf{b}_{j}\mathbf{b}_{m} & \mathbf{b}_{m}\mathbf{b}_{m} \end{vmatrix} + \frac{\mathbf{k}_{y}}{4\Delta} \begin{vmatrix} \mathbf{c}_{i}\mathbf{c}_{i} & \mathbf{c}_{j}\mathbf{c}_{i} & \mathbf{c}_{m}\mathbf{c}_{i} \\ \mathbf{c}_{i}\mathbf{c}_{j} & \mathbf{c}_{j}\mathbf{c}_{j} & \mathbf{c}_{m}\mathbf{c}_{j} \\ \mathbf{c}_{i}\mathbf{c}_{m} & \mathbf{c}_{j}\mathbf{c}_{m} & \mathbf{c}_{m}\mathbf{c}_{m} \end{vmatrix} .$$
(8)

Очевидно, что для функции (2) имеет место

$$\chi = \sum_{s=1}^{n} \chi^s . \tag{9}$$

Пусть n – общее число узлов всей области; $\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, ..., \Phi_n)^T$ – вектор узловых функций; $P = (P_1, P_2, ..., P_n)^T$ – вектор внутренних распределенных нагрузок, связанных с заданной функцией Ω ; $h = \|h_{ij}\|$ – матрица (8) для всей области. Тогда из соотношений (6) и (9) находим

$$\chi = \frac{1}{2} \Phi^{\mathrm{T}} h \Phi + \Phi^{\mathrm{T}} P \,. \tag{10}$$

Введем обозначения:

$$\begin{cases} \Phi_{1} + h_{12}^{(0)} \Phi_{2} + h_{13}^{(0)} \Phi_{3} + ... + h_{1n}^{(0)} \Phi_{n} = \Phi_{n+1}, \\ \Phi_{2} + h_{23}^{(1)} \Phi_{3} + ... + h_{2n}^{(1)} \Phi_{n} = \Phi_{n+2}, \\ \\ \Phi_{n-1} + h_{(n-1)n}^{(n-1)} \Phi_{n} = \Phi_{2n-1} \end{cases}$$
(11)

и найдем произведение узловых функций. Подставив их в (10), определим

$$\chi = \frac{1}{2} (\Phi^{\mathrm{T}} \hat{D} \Phi + \overline{\Phi}^{\mathrm{T}} I \overline{\Phi}) + \Phi^{\mathrm{T}} P,$$

где $\hat{D} = \|\hat{d}_{ij}\|$ – диагональная матрица порядка n; I – единичная матрица порядка n-1; $\overline{\Phi} = (\Phi_{n+1}, \Phi_{n+2}, ..., \Phi_{2n-1})^{\mathrm{T}};$

$$\begin{cases} h_{ii}^{(0)} = h_{ii}, i \in M = \{1, 2, ..., n\}, h_{1i}^{(0)} = h_{1i}, i \in \{2, 3, ..., n\}, \\ h_{ij}^{(r)} = h_{ij}^{(r-1)} - h_{i(j-1)}^{(r-1)} h_{ij}^{(r-1)}, r \in \overline{M} = \{1, 2, ..., n-1\}, i \in \{r, ..., n\}, j \in \{r+1, ..., n\}, (12) \\ \hat{d}_{ii} = h_{ii}^{(0)} - \sum_{s=1}^{i-1} (h_{si}^{(s)})^2 - 1, i \in \overline{M}, \hat{d}_{nn} = h_{nn}^{(0)} - \sum_{i=1}^{3n-1} (h_{in}^{(n)})^2. \\ \\ \Pi_{yCTb} \qquad X = \begin{pmatrix} \Phi \\ \overline{\Phi} \end{pmatrix} \quad \text{м} \quad C = \begin{pmatrix} P \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{- векторы-столбцы порядка} \qquad 2n-1; \end{cases}$$

 $\mathbf{D} = \left\| \mathbf{d}_{ij} \right\| = \left\| \begin{array}{c} \hat{\mathbf{D}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{array} \right\| -$ диагональная матрица порядка 2n-1; A = (A₁, A₂,..., A_{2n-1}) -

матрица коэффициентов системы уравнений (11), где $A_J = (a_{1j}, a_{2j}, ..., a_{n-1})^T$. Тогда определение искомого вектора X сводится к следующей задаче квадратичного программирования:

$$\min\{\mathbf{C}^{\mathsf{T}}\mathbf{X} + \frac{1}{2}\mathbf{X}^{\mathsf{T}}\mathbf{D}\mathbf{X} \mid \mathbf{A}\mathbf{X} = 0, \text{ граничные условия}\}.$$
 (13)

Так как в задаче (13) отсутствуют условия неотрицательности искомых переменных, то ее решение сводится [2] к определению обратной матрицы $G^{-1} = ||g_{ij}||$, где $G = AD^{-1}A^{T}$.

Алгоритм нахождения обратной матрицы $\,G^{-1}\,$ дан в [2].

Зная обратную матрицу \mathbf{G}^{-1} , последовательно находим векторы

$$B = AD^{-1}C, Z = G^{-1}B, X = D^{-1}(A^{T}Z - C).$$
(14)

При решении физических задач, описываемых уравнением (1), встречаются такие задачи, в которых требуется удовлетворение дополнительных условий вида

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}(\Phi, \Phi) \le \mathbf{0}. \tag{15}$$

Как следует из (8), матрица h^s не зависит от положения внутри элемента, и поэтому для s-го конечного элемента функция $L^s = L(\Phi^s, \dot{\Phi}^s), s \in N$ постоянная. Следовательно, условие (15) перепишется в виде

$$Y \ge 0, \tag{16}$$

где

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, ..., \mathbf{y}_{\overline{n}})^{\mathrm{T}}, \mathbf{y}_i = -\sum_{\mathrm{r}} \mathbf{L}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}, i \in \overline{\mathrm{N}}.$$
 (17)

Здесь знак суммы распространяется на все соединяемые в узле стороны соответствующих конечных элементов $s \in \overline{N}$, и определение искомого вектора X сводится к следующей задаче:

$$\min\{\mathbf{C}^{\mathsf{T}}\mathbf{X} + \frac{1}{2}\mathbf{X}^{\mathsf{T}}\mathbf{D}\mathbf{X} \mid \mathbf{A}\mathbf{X} = 0, \mathbf{Y} \ge 0, \text{граничные условия}\}.$$
 (18)

Для ее решения используем следующий алгоритм.

Нулевой шаг. Решая задачу (13), находим матрицу G_0^{-1} и вектор $X^{(0)}$. В дальнейшем вычисления аналогичны вычислениям в k-ом шаге. Поэтому перейдем непосредственно к рассмотрению k-го шага. На этом шаге предполагаются заданными множества $Q^{(k)} = \{s \in \overline{N} \mid y_s^{(k)} < 0\}, \ \overline{Q}^{(k)} = \{i \in N \mid \Phi_i^{(k)} = 0\},$ матрица $G_k^{-1} = \left\|g_{ij}^{(k)}\right\|$ и векторы $X^{(k)}$, $Y^{(k)}$. Отметим, что при k = 0 $Q^{(0)} \in \emptyset, \overline{Q}^{(0)} \in \emptyset$. На основе заданных величин находим элемент q по критерию

$$y_{q}^{(k)} = \min_{i \in \overline{N} \setminus Q^{(k)}} \left\{ y_{i}^{(k)} \right\}$$

Рассмотрим два возможных случая.

 1^0 . Пусть $y_q^{(k)} \ge 0$. Тогда условие (16) выполняется, и параметры k – го шага, т. е. векторы $X^{(k)}$, $Y^{(k)}$, определяют решение задачи (18).

 2^{0} . Пусть $y_{q}^{(k)} < 0$. Тогда перейдем к (k+1) – му шагу, для которого

$$Q^{(k+1)} = Q^{(k)} \cup \{q\}.$$
 (19)

На основе (19) формируем множество $\overline{Q}^{(k+1)}$ (содержит узловые значения функции Φ всех вершин треугольников, задаваемых множеством $Q^{(k+1)}$) и определяем

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \overline{\mathbf{Q}}^{(k+1)} \setminus \overline{\mathbf{Q}}^{(k)}.$$

Зафиксируем некоторый элемент $q \in R^{(k+1)}$, в соответствии с которым последовательно найдем вектор \overline{A}_q и матрицу $G_{k+1,q}^{-1}$ по формулам [2]

$$\overline{\mathbf{A}}_{q} = \mathbf{G}_{k}^{-1} \mathbf{d}_{qq}^{-1} \mathbf{A}_{q}, \quad \mathbf{g}_{ij}^{(k,q)} = \mathbf{g}_{ij}^{(k)} + \frac{\overline{\mathbf{A}}_{q}^{i} \overline{\mathbf{A}}_{q}^{j}}{1 - \mathbf{A}_{q}^{\top} \overline{\mathbf{A}}_{q}}, \mathbf{i} \in \overline{\mathbf{M}}, \mathbf{j} \in \overline{\mathbf{M}}.$$
(20)

Эту процедуру повторим для всех векторов $A_j, j \in R^{(k+1)}$, при этом для каждого нового элемента q, начиная со второго, в рекуррентных соотношениях (20) вместо матрицы G_k^{-1} нужно взять предыдущую матрицу $G_{k,q}^{-1}$. Очевидно, что в последнем шаге этой процедуры получим $G_{k+1}^{-1} = G_{k,q}^{-1}$.

Зная обратную матрицу G_{k+l}^{-1} , по формулам (14) находим вектор $X^{(k+l)}$. Далее из равенств (17) определим значения величин $y_i^{(k+l)}, i \in Q^{(k)}$ и сформируем множества $Q^{(k+l)}, \ \overline{Q}^{(k+l)}.$

Как следует из соотношения (19), при переходе от k – го шага к (k+1) – му увеличивается количество элементов множества $Q^{(k+1)}$. Однако такое увеличение возможно до выполнения условия $Q^{(k+1)} = \overline{N}$, при котором не выполняется условие (16) и задача (18) не имеет решения. Таким образом, для решения (18) необходимо выполнить не более \overline{n} шагов.

Отметим, что данный алгоритм можно использовать только для необратимых процессов.

Как известно, дифференциальное уравнение, описывающее кручение призматических стержней, имеет вид [1]

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + 2\mathbf{G}\Theta = 0,$$

где Φ – функция напряжения; G – модуль сдвига; Θ – угол закручивания на единицу длины стержня.

В качестве примера рассмотрим эту задачу для стержня с поперечным сечением, состоящим из четырех треугольников: *AOB*, *BOC*, *COD* и *DOA* (см. рис.). При этом треугольник *AOB* изготовлен из чугуна, *BOC* - из стали, *COD* - из меди, а *DOA* - из дюралюминия. Соответствующие модули сдвига для них следующие: $G_{AOB} = 5 \cdot 10^5$, $G_{BOC} = 8 \cdot 10^5$, $G_{COD} = 4 \cdot 10^5$, $G_{DOA} = 3 \cdot 10^5$. Составим таблицу координат вершин треугольников. Учитывая, что площадь всех треугольников равна $\Delta = a^2$, и исходя из соотношений (5), (7) и (8), для всех элементов I, II ,...,XV,XVI находим соответствующие матрицы жесткостей и компоненты вектора нагрузок. Учитывая, что на внешней границе необходимо, чтобы $\Phi = 0$, граничные условия будут иметь вид

$$\Phi_6 = \Phi_7 = \Phi_8 = \Phi_9 = \Phi_{10} = \Phi_{11} = \Phi_{12} = \Phi_{13} = 0$$
.



426

Формируем матрицу жесткости и вектор Р для всей области . Имеем

Рис.

$$h = \begin{bmatrix} 0,65 & 0 & 0 & 0 & -0,1625 \\ 0 & 0,75 & 0 & 0 & -0,1875 \\ 0 & 0 & 0,916667 & 0 & -0,291667 \\ 0 & 0 & 0 & 1,066667 & -0,266667 \\ -0,1625 - 0,1875 - 0,291667 - 0,266667 & 0,908333 \end{bmatrix},$$

$$P = (-2 - 2 - 2 - 2 - 1,3333)^{\mathsf{T}} \omega,$$

где $\omega = 10^5 \Theta a^2$.

Используя формулы (12) и обозначения (11), находим матрицы A и D . На основе этих величин вычисляем обратную матрицу:

$$G^{-1} = \begin{vmatrix} -0,550038 & -0,00826891 & -0,00350801 & 0,00220506 \\ -0,00826891 & -0,33924 & -0,00250572 & 0,00157504 \\ -0,00350801 & -0,00250572 & -0,0919717 & 0,000668196 \\ 0,00220506 & 0,00157504 & 0,000668196 & 0,0620803 \end{vmatrix}$$

Далее по формулам (14) поочередно находим векторы

$$B = (6,02803 \ 8,36201 \ 24,5632 \ -29,485)^{\mathsf{T}} \omega,$$

$$Z = (-3,53597 \ -2,99456 \ -2,32092 \ -1,78756)^{\mathsf{T}} \omega,$$

$$\Phi = (4,38849 \ 3,97824 \ 3,85109 \ 3,18657 \ 5,24628)^{\mathsf{T}} \omega.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Арутюнян Н.Х., Абрамян Б.Л. Кручение упругих тел. М.: Гос.изд-во физ.-мат. лит, 1963. 686 с.
- 2. Геворкян Г.А. Об одном методе расчета усилий в элементах ферм // Изв. НАН РА. Механика. 2002. Т. 55, №. 2. С. 56-62.
- 3. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред. М.: Недра, 1974. 240 с.

ЕрГУАС. Материал поступил в редакцию 10.06.2003.

Գ.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Վ.Ռ. ՄԱՆՈՒՍԱՋՅԱՆ

ԴԱՇՏԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ԵՐԿՉԱՓ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՏԱՐՐԵՐԻ ՄԵԹՈԴԻ ՄԵԿ ՏԱՐԲԵՐԱԿԻ ՄԱՍԻՆ

Առաջարկվում է եռանյունաձև վերջավոր տարրերի մեթոդի տարբերակ, որում դաշտերի տեսության երկչափ խնդիրների լուծումը հանգեցվում է քառակուսային ծրագրավորման խնդիրների։ Բերվում է լուծման ալգորիթմը։

G.A. GEVORGYAN, V.R. MANUSAJYAN

A MODIFIED FINITE - ELEMENT METHOD FOR SOLVING TWO-DIMENSIONAL FIELD THEORY PROBLEMS

A modified triangle-form finite-element method is proposed where two – dimensional field theory problem solutions are reduced to quadratic programming. The algoritm of their solution is given.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

*Հ*SԴ 321.311.22

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

Ո.Չ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Ա.Ռ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Մ.Գ. ՂԱՉԱՐՅԱՆ

ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐՈՒՄ ԱՇԽԱՏՈՂ ԳԱԶԱՄԱԶՈՒԹԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈԿՆԵՐԻ ՎՆԱՍԱԿԱՐ ԱՐՏԱՆԵՏՈՒՄՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ԱՆՀՐԱԺԵՇՏՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Կատարվել է դեպի մթնոլորտ վնասակար նյութերի արտանետումների քանակական վերլուծություն՝ կախված էներգաբլոկների էլեկտրական բեռնվածքից և վառելիքի տեսակից։ Փորձնական և տեսական տվյալների մոտարկման միջոցով ստացված առնչությունները բնապահպանական տեսանկյունից կիրառելի են բեռնվածքի ներկայանային բաշխման լավարկման համար։

Առանցքային բառեր. մասնակի բեռնվածք, վնասակար միացություններ, գումարային արտանետում, վառելիքի տեսակարար ծախս, ռեգրեսիոն (հետընթաց) վերլուծություն։

Ժամանակակից ՋԷԿ-երի էներգաբլոկները, որպես կանոն, աշխատում են բեռնվածքների տարբեր ռեժիմներում, որոնցից յուրաքանչյուրին համապատասխանում են տեղակայանքի պարամետրերի որոշակի արժեքներ։ Էներգաբլոկների բեռնվածության կարգավորվող միջակայքը հիմնականում կախված է կաթսայական ագրեգատի տեսակից և շահագործման տեխնիկական պայմաններից, ինչպես նաև այրվող վառելիքի տեսակից և որակից։

Էներգաբլոկի բեռնաթափման ռեժիմի կիրառման նպատակահարմարությունը որոշվում է հիմնականում մասնակի բեռնվածքների պայմաններում այս կամ այն էներգաբլոկի աշխատանքի շահավետությամբ, որը բնութագրվում է էլեկտրական բեռնվածքից վառելիքի բացարձակ (B) և տեսակարար (Ե₀) ծախսերի կախվածությամբ [1]։

Շահագործման պայմաններում, հարմարության տեսանկյունից, էներգաբլոկների բոլոր տեսակների համար էլեկտրական բեռնվածքից վառելիքի ծախսի կախվածությունը ներկայացվում է գծային կամ հատվածագծային կախվածության տեսքով՝ բեկվածքի մեկ կամ մի քանի կետերով։ Էներգետիկայում առավել տարածում են գտել բլոկների B=f(N_է) էներգետիկական բնութագրերը։

Այս կարգի կախվածությունները սովորաբար Ճիշտ են տվյալ կոնկրետ բլոկի համար բեռնվածքի որոշակի միջակայքերում և պահանջում են պարբերական Ճշգրտումներ նրա շահագործման գործառույթում։ K-200-130 և K-300-240 տուրբիններով էներգաբլոկների համար փորձնական հետազոտությունների բազայի հիման վրա առաջարկված են համապատասխանաբար (1) և (2) առնչությունները [2].

$$B = 4,83 + 0,2958 \cdot N_{\rm t} + 0,0000792 \cdot N_{\rm t}^2, \qquad (1)$$

~

$$B = 6,54 + 0,30057 \cdot N_{t} + 0,0000212 \cdot N_{t}^{2}:$$
⁽²⁾

Մասնավորապես՝ ունենալով Հրազդանի ՋԷԿ-ի բլոկային մասի էներգաբլոկների մասնակի բեռնվածքներով աշխատանքի պայմաններում վառելիքի ծախսի իրական տվյալները՝ կատարվել են վերը նշված Ճշգրտումները, ընդ որում դիտարկվել է նաև մասնակի բեռնվածքների դեպքում սեփական կարիքների կարգավորվող էլեկտրաշարժաբերների ազդեցությունը վառելիքի ծախսի վրա։ Արդյունքում K-200-130 էներգաբլոկի B=f(N_E) էներգետիկական բնութագիրը ստացել է հետևյալ գրաֆիկական տեսքը.



Նկ. 1. Վառելիքի ծախսի փոփոխությունը` կախված էներգաբլոկի հզորությունից

Բերված տվյալների ռեգրեսիոն (հետընթաց) վերլուծության միջոցով ստացվել են հետևյալ ֆունկցիոնալ առնչությունները։ Հարկ է նշել, որ առավել Ճշգրիտ արդյունքներ ստանալու համար, կարգավորվող էլեկտրաշարժաբերի առկայության պարագայում B=f(N_E) էներգետիկ բնութագիրը նպատակահարմար է ներկայացնել 3-րդ կարգի բազմանդամի տեսքով.

$$\mathsf{B} = 8,343 + 0,267 \cdot \mathsf{N}_{\mathsf{h}} + 0,0003 \cdot \mathsf{N}_{\mathsf{h}}^{2}, \tag{3}$$

$$\mathsf{B} = 5,189 + 0,3155 \cdot \mathsf{N}_{\mathsf{t}} + 0,00000063 \cdot \mathsf{N}_{\mathsf{t}}^3 : \tag{4}$$

Շրջակա միջավայրի պաշտպանության տեսանկյունից էներգաբլոկի շահավետությունը (հետևաբար նաև բեռնաթափման նպատակահարմար ռեժիմը) բնութագրող գործոն է դառնում արտանետվող վնասակար միացությունների քանակությունը ևս։

Մասնակի բեռնվածքների պայմաններում միավոր ժամանակահատվածում վնասակար միացությունների քանակությունը որոշելու համար, օգտագործելով գրականությունում առկա հաշվարկային մեթոդները [3,4] և վերը բերված շահագործման տվյալները մոտարկելով, K-200-130 և K-300-240 տուրբիններով էներգաբլոկների համար ռեգրեսիոն վերլուծությամբ ստացվել են M= $f(N_t, S^r, Q^p_u)$ ֆունկցիայի՝ ստորև բերվող բնութագրերը։



Նկ. 2. Ազոտի և ծծմբի օքսիդների գումարային արտանետումների կախվածությունը էներգաբլոկի հզորությունից

Տարբեր տեսակի և որակի վառելիքների այրման պարագայում K-200-130 և K-300-240 տուրբիններով կահավորված էներգաբլոկների համար մասնակի բեռնվածքների դեպքում ազոտի և ծծմբի օքսիդների գումարային արտանետումները հաշվելու համար առաջարկվում են համապատասխանաբար (5) և (6) արտահայտությունները.

$$M_{\Sigma} = 1,704 \cdot S^{P} \cdot N_{t} + 0,00006 \cdot N_{t}^{2} \cdot Q_{u}^{P^{0.33}} \cdot (1 + S^{P})^{0.6} + 0,011 \cdot N_{t}^{0.6} \cdot Q_{u}^{P^{0.8}} - 266,14,$$
(5)

$$\begin{split} \mathsf{M}_{\Sigma} &= 1,716 \cdot \mathsf{S}^{\mathsf{p}} \cdot \mathsf{N}_{\mathsf{t}} + 0,000042 \cdot \mathsf{N}_{\mathsf{t}}^{2} \cdot \mathsf{Q}_{\mathsf{u}}^{\mathsf{p}^{0.33}} \cdot \left(1 + \mathsf{S}^{\mathsf{p}}\right)^{0.44} + \\ &+ 0,0125 \cdot \mathsf{N}_{\mathsf{t}}^{0.6} \cdot \mathsf{Q}_{\mathsf{u}}^{\mathsf{p}^{0.8}} - 368,6, \end{split}$$
(6)

որտեղ M_Σ-ն ազոտի և ծծմբի օքսիդների գումարային արտանետումն է՝ վերահաշվարկված ծծմբի երկօքսիդի, q/q, N_t-ն՝ տվյալ աշխատանքային ռեժիմում էներգաբլոկի էլեկտրական հզորությունը, *ՄՎտ*, S^F-ն՝ ծծմբապարունակությունը վառելիքի բանվորական կազմում, %, $\mathbf{Q}_{u}^{\mathrm{p}}$ -ն՝ վառելիքի բանվորական զանգվածի այրման ստորին ջերմությունը, *կՋ/կգ*.

Քանի որ (5) և (6) արտահայտությունների գումարային արտանետումներում ազոտի օքսիդների քանակությունը բերված է ծծմբի օքսիդների [3], ապա գազային վառելիք օգտագործելու դեպքում, որի կազմում բացակայում է ծծումբը, վերը նշված արտահայտություններում առաջին բաղադրիչն ընդունում է զրոյական արժեք, իսկ մթնոլորտ արտանետվող ազոտի օքսիդների քանակությունը կարելի է որոշել

$$M_{NO_2} = M_{\Sigma} \cdot \frac{U\partial W_{NO_2}}{U\partial W_{SO_2}}$$
(7)

արտահայտությամբ, որտեղ UO v_{NO_2} -ը (0,085 dq/d^3) և UO v_{SO_2} -ը (0,5 dq/d^3), համապատասխանաբար, ազոտի երկօքսիդի և ծծմբի երկօքսիդի սահմանային թույլատրելի խտություններն են։

Ինչպես երևում է նկար 2-ից, իզորության անկմանը զուգընթաց տեղի է ունենում վնասակար միացությունների գումարային արտանետումների նվազում, սակայն էներգաբլոկների բեռնաթափման ժամանակ ագրեգատների շահավետության նվազումը հանգեցնում է վառելիքի տեսակարար ծախսի մեծացման, հետևաբար նաև 1 *կՎագժ* էլեկտրաէներգիայի արտադրմանը բաժին ընկնող տեսակարար գումարային արտանետումների աՃի։ Այսինքն, էներգաբլոկի թերբեռնվածության պարագայում ոչ միայն նվազում է ջերմային շահավետությունը, այլն մեծանում է միավոր քանակությամբ էլեկտրական էներգիա արտադրելու էկոլոգիական վտանգը։ Օրինակ, 1*%* ծծմբայնությամբ և 38129 *կՁ/կգ* այրման ջերմությամբ վառելիքով աշխատող 200 *ՄՎա* և 300 *ՄՎա* հզորությամբ էներգաբլոկների համար տեսակարար արտանետումները, կախված էլեկտրական բեռնվածքից, փոփոխվում են ստորև բերվող օրինաչափությամբ։



Նկ. 3. Տեսակարար գումարային արտանետումների կախվածությունը էներգաբլոկի բեռնվածքից

Էներգաբլոկի թերբեռնված աշխատանքի ժամանակ տեսակարար գումարային արտանետումների աձով պայմանավորված գումարային արտանետումների քանակությունը (M'_{Σ} , *գրամ*), կախված բլոկի շահավետությունից, վառելիքի որակից և թերբեռնված ռեժիմում աշխատելու ժամանակահատվածից, կարելի է որոշել

$$\mathbf{M}_{\Sigma}^{\prime} = 10^{-3} \cdot \tau \cdot \mathbf{b}_{o} \cdot \left(\overline{\mathbf{N}} - 1\right) \cdot \left(83 \cdot \mathbf{M}_{\Sigma}^{1.2} + 0.01 \cdot \mathbf{N}_{t}^{3}\right)$$
(8)

արտահայտությամբ, որտեղ τ -ն թերբեռնված ռեժիմում էներգաբլոկի աշխատանքի ժամերի թիվն է, *d*, bo-ն՝ էներգաբլոկի վառելիքի տեսակարար ծախսը, *կգ/կՎտգd*, \overline{N} -ը՝ անվանական և ընթացիկ հզորությունների հարաբերությունը, M_{Σ} -ը՝ տվյալ ռեժիմում վնասակար միացությունների քանակությունը, որը, կախված բլոկի հզորությունից, որոշվում է համապատասխանաբար (5) և (6) արտահայտություններով։ Ելնելով վերը շարադրվածից՝ ՋԷԿ-երում բնապահպանական տեսանկյունից ներկայանային ռեժիմների լավարկումն առաջարկվում է իրականացնել

$$\sum_{i=1}^{n}M_{\Sigma i}^{\prime}\big(N_{t\,i}\,\big) \to min$$

պայմանի պահպանմամբ, որտեղ ո-ը կայանում տեղակայված տուրբատեղակայանքների թիվն է։

ԳՐԱԿԱՆՈւԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. **Մարուխյան Ո.Չ.** ՋԷԿ-ի աշխատանքային ռեժիմները և շահագործումը։ Ուսումնական ձեռնարկ, 1985.–Երևան. 144 էջ։
- 2. Маневренные характеристики оборудования тепловых электростанций / Д.П. Елизаров, Э. К. Аракелян. М.: МЭИ, 1989. 128 с.
- Մարուխյան Ո.Չ. Շրջակա միջավայրի պաշտպանությունը ՋԷԿ-երի և ԱԷԿ-ների արտանետումներից։ Ուսումնական ձեռնարկ։ Մաս I / Հայաստանի Պետական Ճարտարագիտական Համալսարան. - Եր.։ Ճարտարագետ, 2002 - 116 էջ։
- 4. Расчет вредных выбросов ТЭС в атмосферу: Учебное пособие. 2-е издание / Под ред. **П. В.** Рослякова. М.: МЭИ, 2002. 81 с.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.07.2004։

В.З. МАРУХЯН, А.Р. ГЕВОРГЯН, М.Г. КАЗАРЯН О НЕОБХОДИМОСТИ ОЦЕНКИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ГАЗОМАЗУТНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ, РАБОТАЮЩИХ В ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Проведен количественный анализ вредных выбросов в атмосферу в зависимости от электрических нагрузок энергоблоков и типа топлива. Полученные способом аппроксимации экспериментальных и теоретических данных функциональные соотношения могут быть использованы для оптимизации распределения внутристанционных нагрузок с точки зрения охраны окружающей среды.

V. Z. MARUKHYAN, A.R. GEVORGYAN, M.G. GHAZARYAN ON THE NECESSITY OF ESTIMATING HARMFUL EMISSIONS INTO THE GAS-OIL POWER BLOCKS OPERATING AT ALTERNATING REGIMES

A quantitative analysis of harmful emissions into the atmosphere depending on electrical loadings of powerblocks and the fuel type is carried out. By means of approximating the experimental and theoretical data, the obtained functional relation can be used to optimize the distribution of intraplant loading from the ecologic standpoint.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.311

ЭНЕРГЕТИКА

В.С. ХАЧАТРЯН, Е.А. ГЛАДУНЧИК, М.А. МНАЦАКАНЯН, А.Р. ТОХУНЦ

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваются вопросы минимизации потерь активной мощности в сетях электроэнергетической системы прямым методом оптимизации.

Ключевые слова: матрица, система, функция, формула, потеря, сеть, узел, режим, модель, уравнение.

В связи с созданием современных сложных и больших электроэнергетических систем (ЭЭС) кибернетического типа важное экономическое значение принимают вопросы минимизации потерь активной мощности в электрических сетях [1-6].

Разработка метода минимизации потерь активной мощности в электрических сетях имеет большой теоретический и практический интерес, чему и посвящается настоящая работа.

Принимается следующая система индексов:

- для станционных узлов: m(n)=0, 1, 2, . . ., Г, где Г число независимых станционных узлов. Станционный узел с индексом "0" выбирается базисным (Б) по напряжениям и балансирующим по мощностям;
- для нагрузочных узлов: k(ℓ)=Г+1, Г+2, ..., Г+Н, где Н число нагрузочных узлов;
- для произвольных узлов, в состав которых входят как станционные, так и нагрузочные узлы: i(j)=0, 1, 2, ..., Г, Г+1, Г+2, Г+Н.

Введем обозначения Г+Н=М, где М - число независимых узлов рассматриваемой электроэнергетической системы.

Матричное уравнение состояния ЭЭС при Z-форме задания состояния сети имеет вид

$$\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{F}} + Z\dot{\mathbf{I}},\tag{1}$$

где Ú, Í - многомерные векторы комплексных напряжений и токов независимых узлов или столбцовые матрицы; Ú_Б - комплексное напряжение базисного (балансирующего) узла; Z - неособенная квадратная матрица комплексных сопротивлений независимых узлов или матрица узловых сопротивлений.

Матричное уравнение состояния (1) в алгебраической форме представляется в виде

$$\dot{U}_{i} = \dot{U}_{b} + \sum_{j=1}^{M} Z_{ij} \dot{I}_{j}$$
 (2)

Для перехода из формы " \dot{U} - \dot{I} " к форме " \dot{S} " необходимо обе части уравнения (2) умножить на комплексно-сопряженное значение тока \hat{I}_i . В результате получим

$$\dot{S}_{i} = \dot{U}_{b}\hat{I}_{i} + \sum_{j=1}^{M} Z_{ij}\hat{I}_{i}\dot{I}_{j}.$$
 (3)

Принимая, что $\dot{\mathbf{U}}_{\mathrm{E}} = \mathbf{U}_{\mathrm{E}}$, можем написать

$$\mathbf{P}_{i} = \operatorname{Re}\left(\mathbf{U}_{\mathrm{B}}\hat{\mathbf{I}}_{i} + \sum_{j=1}^{M} \mathbf{Z}_{ij}\hat{\mathbf{I}}_{i}\dot{\mathbf{I}}_{j}\right),\tag{4}$$

$$Q_{i} = Jm \left(U_{B} \hat{I}_{i} + \sum_{j=1}^{M} Z_{ij} \hat{I}_{i} \dot{I}_{j} \right)$$
(5)

или

$$P_{i} = U_{B}I'_{i} + \sum_{j=1}^{M} \left[\left(I'_{i}I'_{j} + I''_{i}I''_{j} \right) R_{ij} - \left(I'_{i}I''_{j} - I''_{i}I'_{j} \right) X_{ij} \right],$$
(6)

$$Q_{i} = -U_{B}I_{i}'' + \sum_{j=1}^{M} \left[\left(I_{i}'I_{j}' + I_{i}''I_{j}'' \right) X_{ij} + \left(I_{i}'I_{j}'' - I_{i}''I_{j}' \right) R_{ij} \right],$$
(7)

где

$$I'_{j} = \operatorname{Re}(\dot{I}_{j}), \qquad I''_{j} = J_{m}(\dot{I}_{j}),$$

$$R_{ij} = \operatorname{Re}(Z), \qquad X_{ij} = J_{m}(Z).$$
(8)

Если обозначить потери активной мощности через Π_a , то она определится как алгебраическая сумма активных мощностей всех независимых узлов и базисного (балансирующего) узла. В результате функция потерь активной мощности принимает следующий вид:

$$\Pi_{a} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} \left(I'_{i} I'_{j} + I''_{i} I''_{j} \right) R_{ij} .$$
(9)

Как известно,

$$I'_{i(j)} = \frac{1}{U_{i(j)}} \left(P_{i(j)} \cos \Psi_{ui(j)} + j Q_i \sin \Psi_{ui(j)} \right),$$

$$I''_{i(j)} = \frac{1}{U_{i(j)}} \left(P_{i(j)} \sin \Psi_{ui(j)} - j Q_i \cos \Psi_{ui(j)} \right).$$
(10)

Подставив выражение (10) в (6) и (7), получим

$$P_{i} = \frac{U_{E}}{U_{i}} \left(P_{i} \cos \Psi_{ui} + Q_{i} \sin \Psi_{ui} \right) + \sum_{j=1}^{M} \left(R_{ij} A_{ij} + X_{ij} B_{ij} \right),$$
(11)

$$Q_{i} = -\frac{U_{\rm B}}{U_{i}} \left(P_{i} \sin \Psi_{ui} - Q_{i} \cos \Psi_{ui} \right) + \sum_{j=1}^{M} \left(X_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij} \right),$$
(12)

где

$$A_{ij} = \frac{1}{U_{i}U_{j}} \Big[\Big(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j} \Big) \cos \Big(\Psi_{ui} - \Psi_{uj} \Big) + \Big(Q_{i}P_{j} + P_{i}Q_{j} \Big) \sin \Big(\Psi_{ui} - \Psi_{uj} \Big) \Big], \quad (13)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{U_i U_j} \Big[\Big(P_i P_j + Q_i Q_j \Big) \sin \Big(\Psi_{ui} - \Psi_{uj} \Big) - \Big(Q_i P_j - P_i Q_j \Big) \cos \Big(\Psi_{ui} - \Psi_{uj} \Big) \Big].$$
(14)

При этом функция потерь активной мощности принимает вид

$$\Pi_{a} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} \left\{ \frac{R_{ij}}{U_{i}U_{j}} \left[\left(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j} \right) \cos\left(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}\right) + \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j} \right) \sin\left(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}\right) \right] \right\}.$$
(15)

Представим функции (11) и (12) в следующем виде:

$$\Phi_{pi} = P_{i} - \left[\frac{U_{E}}{U_{i}} (P_{i} \cos \Psi_{ui} + Q_{i} \sin \Psi_{ui}) + \sum_{j=1}^{M} (R_{ij}A_{ij} + X_{ij}B_{ij})\right] = 0,$$

$$\Phi_{qi} = Q_{i} - \left[-\frac{U_{E}}{U_{i}} (P_{i} \sin \Psi_{ui} - Q_{i} \cos \Psi_{ui}) + \sum_{j=1}^{M} (X_{ij}A_{ij} - R_{ij}B_{ij})\right] = 0.$$
(16)

Если ввести следующие обозначения:

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}}{U_i U_j} \cos(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}),$$

$$b_{ij} = \frac{R_{ij}}{U_i U_j} \sin(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}),$$
(17)

то функция Π_a примет вид

$$\Pi_{a} = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{M} \left\{ \left[\left(P_{i} P_{j} + Q_{i} Q_{j} \right) a_{ij} + \left(Q_{i} P_{j} - P_{i} Q_{j} \right) b_{ij} \right] \right\}.$$
(18)

Таким образом, как функции потерь Π_a , так и функции (16) зависят от режимных параметров. В результате задачу можно сформулировать следующим образом.

Требуется найти

$$\min \Pi_{a} = \min \Pi_{a} \left(P_{i}, Q_{i}, U_{i}, \Psi_{ui} \right)$$
(19)

при условии

 $\Phi_{pi}(P_{i}, Q_{i}, U_{i}, \Psi_{ui}) = 0,$ $\Phi_{qi}(P_{i}, Q_{i}, U_{i}, \Psi_{ui}) = 0.$ (20)

Необходимое условие минимума функции (19) по активным мощностям имеет вид

$$\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial P_{m}} = \left(\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial P_{m}}\right) + \sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial U_{i}} \frac{\partial U_{i}}{\partial P_{m}} + \sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_{m}} = 0$$
(21)

или

$$\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial P_{m}} + \sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial U_{i}} \frac{\partial U_{i}}{\partial P_{m}} + \sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_{m}} = 0.$$
(22)

Частные производные, входящие в (22), определяются на основании следующих выражений:

$$\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial P_{m}} = 2 \sum_{j=1}^{M} \left(a_{mj} P_{j} - b_{mj} Q_{j} \right), \qquad (23)$$

$$\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial U_{i}} = -\frac{2}{U_{j}} \sum_{j=1}^{M} \left[\left(P_{i} P_{j} + Q_{i} Q_{j} \right) a_{ij} + \left(Q_{i} P_{j} - P_{i} Q_{j} \right) b_{ij} \right],$$
(24)

$$\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial \Psi_{ui}} = -2\sum_{j=1}^{M} \left[\left(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j} \right) b_{ij} + \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j} \right) a_{ij} \right].$$
(25)

Частные производные $\partial U_j / \partial P_m$, $\partial \Psi_{uj} / \partial Q_m$ определяются на основании уравнений связи (20):

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_{m}} + \sum_{j=1}^{M} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_{j}} \frac{\partial U_{j}}{\partial P_{m}} + \sum_{j=1}^{M} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_{m}} = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_{m}} + \sum_{j=1}^{M} \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_{j}} \frac{\partial U_{j}}{\partial P_{m}} + \sum_{j=1}^{M} \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_{m}} = 0.$$
(26)

В матричной форме систему уравнений (26) можно представить в виде

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_{j}} \frac{\partial U_{j}}{\partial P_{m}} + \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_{m}} = -\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_{m}},$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_{j}} \frac{\partial U_{j}}{\partial P_{m}} + \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \frac{\partial \Psi_{uj}}{\partial P_{m}} = -\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_{m}}.$$
(27)

Система (27) в виде матричного уравнения имеет вид

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_{j}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{qi}} \\ \frac{\partial \overline{\Phi}_{qi}}{\partial U_{j}} & \frac{\partial \overline{\Phi}_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial U_{j}}{\partial \overline{P}_{m}} \\ \frac{\partial \overline{\Psi}_{uj}}{\partial \overline{P}_{m}} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \overline{P}_{m}} \\ \frac{\partial \overline{\Phi}_{qi}}{\partial \overline{P}_{m}} \end{bmatrix}.$$
 (28)

Пользуясь матричным уравнением (28), можно установить столбцовую матрицу искомых частных производных:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial U_{j}}{\partial P_{m}}\\ \frac{\partial \overline{\Psi}_{uj}}{\partial P_{m}} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_{j}} & \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \overline{\Psi}_{uj}}\\ \frac{\partial \overline{\Phi}_{qi}}{\partial U_{j}} & \frac{\partial \overline{\Phi}_{qi}}{\partial \overline{\Psi}_{uj}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_{m}}\\ \frac{\partial \overline{\Phi}_{qi}}{\partial \overline{\Phi}_{qi}}\\ \frac{\partial \overline{\Phi}_{qi}}{\partial P_{m}} \end{bmatrix}.$$
(29)

Частные производные, входящие в матричное выражение (29), определяются в виде: - при одинаковых индексах, т.е. когда j=i:
$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_{i}} &= \frac{U_{E}}{U_{i}^{2}} \left(P_{i} \cos \Psi_{ui} + Q_{i} \sin \Psi_{ui} \right) + \frac{1}{U_{i}} \sum_{j=1}^{M} \left(R_{ij} A_{ij} + X_{ij} B_{ij} \right), \end{aligned} \tag{30} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_{i}} &= \frac{U_{E}}{U_{i}^{2}} \left(P_{i} \sin \Psi_{ui} - Q_{i} \cos \Psi_{ui} \right) + \frac{1}{U_{i}} \sum_{j=1}^{M} \left(X_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij} \right), \end{aligned} \tag{31} \\ \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{ui}} &= \frac{U_{E}}{U_{i}} \left(P_{i} \sin \Psi_{ui} - Q_{i} \cos \Psi_{ui} \right) + \\ &+ \sum_{j=1}^{M} \left[\left(P_{i} P_{j} + Q_{i} Q_{j} \right) (b_{ij} - c_{ij}) - \left(Q_{i} P_{j} - P_{i} Q_{j} \right) (a_{ij} - d_{ij}) \right], \end{aligned} \tag{32} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{ui}} &= \frac{U_{E}}{U_{i}} \left(P_{i} \cos \Psi_{ui} + Q_{i} \sin \Psi_{ui} \right) + \\ &+ \sum_{j=1}^{M} \left[\left(P_{i} P_{j} + Q_{i} Q_{j} \right) (a_{ij} + d_{ij}) - \left(Q_{i} P_{j} - P_{i} Q_{j} \right) (b_{ij} + c_{ij}) \right], \end{aligned} \tag{32}$$

$$c_{ij} = \frac{X_{ij}}{U_{i}U_{j}} \cos(\Psi_{ui} - \Psi_{uj}), \qquad d_{ij} = \frac{X_{ij}}{U_{i}U_{j}} \sin(\Psi_{ui} - \Psi_{uj});$$
(33)

- при разных индексах, т.е. когда ј≠ i:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial U_{j}} &= \frac{1}{U_{j}} \left(R_{ij} A_{ij} + X_{ij} B_{ij} \right), \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial U_{j}} &= \frac{1}{U_{j}} \left(X_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij} \right), \end{aligned}$$
(34)
$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \Psi_{uj}} &= -\left[\left(P_{i} P_{j} + Q_{i} Q_{j} \right) \left(b_{ij} - c_{ij} \right) - \left(Q_{i} P_{j} - P_{i} Q_{j} \right) \left(a_{ij} - d_{ij} \right) \right], \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \Psi_{uj}} &= -\left[\left(P_{i} P_{j} + Q_{i} Q_{j} \right) \left(a_{ij} + d_{ij} \right) - \left(Q_{i} P_{j} - P_{i} Q_{j} \right) \left(b_{ij} + c_{ij} \right) \right]. \end{aligned}$$
(35)

Затем определяем частные производные $\partial \Phi_{pi} / \partial P_m$, $\partial \Phi_{qi} / \partial P_m$, входящие в правую часть матричного выражения (29). При этом удобнее функции Φ_{pi} и Φ_{qi} представить в следующем виде:

$$\Phi_{pi} = P_{i} - \left[\frac{U_{E}}{U_{i}}(P_{i}\cos\Psi_{ui} + Q_{i}\sin\Psi_{ui})\right] + \sum_{j=l}^{M} \left\{ \left[(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j})a_{ij} + (Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j})b_{ij}\right] + \left[(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j})d_{ij} + (Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j})c_{ij}\right] \right\} = 0,$$
(36)

$$\Phi_{qi} = Q_{i} - \left[-\frac{U_{E}}{U_{i}} (P_{i} \sin \Psi_{ui} - Q_{i} \sin \Psi_{ui}) \right] + \sum_{j=1}^{M} \{ [(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j})c_{ij} + (Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j})d_{ij}] + [(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j})b_{ij} + (Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j})a_{ij}] \} = 0$$
(37)

или

$$\begin{split} \Phi_{pi} &= P_{i} - \left[\frac{U_{B}}{U_{i}}\left(P_{i}\cos\Psi_{ui} + Q_{i}\sin\Psi_{ui}\right)\right] + \left(P_{i}^{2} + Q_{i}^{2}\right)a_{ij} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{M}\left\{\left[\left(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j}\right)a_{ij} + \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j}\right)c_{ij}\right]\right\} = 0, \end{split}$$

$$&+ \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j}\right)b_{ij}\right] + \left[\left(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j}\right)d_{ij} + \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j}\right)c_{ij}\right]\right] = 0, \end{split}$$

$$\Phi_{qi} = Q_{i} - \left[-\frac{U_{B}}{U_{i}}\left(P_{i}\sin\Psi_{ui} - Q_{i}\sin\Psi_{ui}\right)\right] + \left(P_{i}^{2} + Q_{i}^{2}\right)c_{ij} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{M}\left\{\left[\left(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j}\right)c_{ij} + \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j}\right)a_{ij}\right]\right\} = 0. \end{split}$$

$$(39) \\ + \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j}\right)d_{ij}\right] + \left[\left(P_{i}P_{j} + Q_{i}Q_{j}\right)b_{ij} + \left(Q_{i}P_{j} - P_{i}Q_{j}\right)a_{ij}\right] = 0.$$

Определим следующие типы частных производных:

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_{i}} = -\frac{U_{\rm B}}{U_{i}}\cos\Psi_{ui} + 2P_{i}a_{ij} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{M} \left[\left(P_{j}a_{ij} - Q_{j}b_{ij} \right) + \left(P_{j}d_{ij} - Q_{j}c_{ij} \right) \right], \tag{40}$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_{i}} = \frac{U_{E}}{U_{i}} \sin \Psi_{ui} + 2P_{i}c_{ij} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{M} \left[\left(P_{j}c_{ij} - Q_{j}d_{ij} \right) + \left(P_{j}b_{ij} - Q_{j}a_{ij} \right) \right]$$
(41)

или

$$\frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_{i}} = -\frac{U_{B}}{U_{i}}\cos\Psi_{ui} + \frac{2P_{i}}{U_{i}^{2}}R_{ii} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{M} \left[P_{j}\left(a_{ij} + d_{ij}\right) - Q_{j}\left(b_{ij} + c_{ij}\right)\right], \tag{42}$$

$$\frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_{i}} = \frac{U_{E}}{U_{i}} \sin \Psi_{ui} + \frac{2P_{i}}{U_{i}^{2}} R_{ii} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{M} \left[P_{j} \left(c_{ij} - b_{ij} \right) + Q_{j} \left(a_{ij} - d_{ij} \right) \right].$$
(43)

Заменив индекс "i" на "m", получим выражения искомых производных:

$$\frac{\partial \Phi_{\rm pi}}{\partial P_{\rm m}} = -\frac{U_{\rm E}}{U_{\rm m}}\cos\Psi_{\rm um} + \frac{2P_{\rm m}}{U_{\rm m}^2}R_{\rm mm} + \sum_{\substack{j=l\\j\neq m}}^{M} \left[P_{\rm j}\left(a_{\rm mj} + d_{\rm mj}\right) - Q_{\rm j}\left(b_{\rm mj} + c_{\rm mj}\right)\right], \quad (44)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_{m}} = \frac{U_{B}}{U_{m}} \sin \Psi_{um} + \frac{2P_{m}}{U_{m}^{2}} R_{mm} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq m}}^{M} \left[P_{j} \left(c_{mj} - b_{mj} \right) + Q_{j} \left(a_{mj} - d_{mj} \right) \right].$$
(45)

Теперь рассмотрим выражение (22), представляя его в следующем виде:

$$\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial P_{m}} = -\left(\sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial U_{i}} \frac{\partial U_{i}}{\partial P_{m}} + \sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_{m}}\right).$$
(46)

При этом

$$\frac{\partial \Pi_{a}}{\partial P_{m}} = a_{m},$$

где

$$a_{m} = -\left(\sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial U_{i}} \frac{\partial U_{i}}{\partial P_{m}} + \sum_{i=1}^{M} \frac{\partial \Pi_{a}}{\partial \Psi_{ui}} \frac{\partial \Psi_{ui}}{\partial P_{m}}\right).$$
(47)

С другой стороны,

$$2\sum_{j=1}^{M} \left(a_{mj} P_{j} - b_{mj} Q_{j} \right) = a_{m}$$

или

$$2\sum_{n=l}^{\Gamma} (a_{mn}P_n - b_{mn}Q_n) + 2\sum_{k=\Gamma+l}^{M} (a_{mk}Q_k + b_{mk}P_k) = a_m.$$

Затем

$$2\sum_{n=1}^{\Gamma} a_{mn} P_n = a_m + 2\sum_{n=1}^{\Gamma} b_{mn} Q_n - 2\sum_{k=\Gamma+1}^{\Gamma} (a_{mk} Q_k + b_{mk} P_k) = a_m.$$
(48)

Полученное выражение (48) представим в следующем виде:

$$\sum_{n=1}^{\Gamma} a_{mn} P_n = b_m, \qquad (49)$$

где

$$b_{mn} = \frac{1}{2}a_{m} + \sum_{n=1}^{\Gamma} b_{mn}Q_{n} - \sum_{k=\Gamma+1}^{M} (a_{mk}Q_{k} + b_{mk}P_{k}).$$
(50)

Первое слагаемое в (50) является переменной, и его численное значение устанавливается по ходу расчета установившегося режима. Второе слагаемое является известной величиной, поскольку станционные узлы являются узлами типа P-Q. Третье слагаемое относится к нагрузочным узлам и, следовательно, также является известным.

Таким образом, численное значение величины b_m устанавливается по ходу расчета установившегося режима рассматриваемой ЭЭС.

Представим выражение (49) в следующей развернутой форме:

$$\begin{cases} a_{11}P_{1} + a_{12}P_{2} + \dots + a_{1\Gamma}P_{\Gamma} = b_{1}, \\ a_{21}P_{1} + a_{22}P_{2} + \dots + a_{2\Gamma}P_{\Gamma} = b_{2}, \\ \dots \\ a_{\Gamma 1}P_{1} + a_{\Gamma 2}P_{2} + \dots + a_{\Gamma \Gamma}P_{\Gamma} = b_{\Gamma}. \end{cases}$$
(51)

Относительно искомых активных мощностей независимых станционных узлов получим систему линейных алгебраических уравнений.

Представим систему линейных алгебраических уравнений (51) в матричной форме:

a ₁₁	a ₁₂	÷	$a_{1\Gamma}$	$\left[P_1 \right]$		$\begin{bmatrix} b_1 \end{bmatrix}$			
a ₂₁	a ₂₂	÷	$a_{2\Gamma}$	P ₂	_	b ₂		(52)
•••	•••	÷	•••				•	(32)
$a_{\Gamma 1}$	$a_{\Gamma 2}$	÷	a _{rr} _	P_{Γ}		b _r			

Обращая матрицу постоянных, получим

$$\begin{bmatrix} P_{1} \\ P_{2} \\ \cdots \\ P_{\Gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \vdots & a_{1\Gamma} \\ a_{21} & a_{22} & \vdots & a_{2\Gamma} \\ \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ a_{\Gamma 1} & a_{\Gamma 2} & \vdots & a_{\Gamma\Gamma} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_{1} \\ b_{2} \\ \cdots \\ b_{\Gamma} \end{bmatrix}.$$
 (53)

Как видно из вышеприведенных выражений, для их формирования требуются численные значения режимных параметров установившегося режима исследуемой ЭЭС.

В связи с этим требуется осуществить расчет установившегося режима, т.е. решить систему нелинейных алгебраических уравнений (16). Соответствующее рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона-Рафсона, имеет вид

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{j} \\ --- \\ \mathbf{\Psi}_{uj} \end{bmatrix}^{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{j} \\ --- \\ \mathbf{\Psi}_{uj} \end{bmatrix}^{\mathbf{N}-1} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial \mathbf{U}_{j}} & | & \frac{\partial \mathbf{\Phi}_{pi}}{\partial \mathbf{\Psi}_{uj}} \\ \frac{\partial \overline{\mathbf{\Phi}}_{qi}}{\partial \mathbf{U}_{j}} & | & \frac{\partial \overline{\mathbf{\Phi}}_{qi}}{\partial \mathbf{\Psi}_{uj}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{pi} \\ --- \\ \mathbf{\Phi}_{qi} \end{bmatrix}.$$
(54)

Частные производные, входящие в квадратную матрицу Якоби, определяются выражениями (30)-(35).

На основании предложенного метода минимизации потерь активной мощности в сетях ЭЭС предложен соответствующий вычислительный алгоритм, сущность которого заключается в следующем:

- Осуществляется расчет установившегося режима при заданных активных и реактивных мощностях станционных узлов и напряжении базисного (балансирующего) узла. В результате для каждого узла имеем четыре режимных параметра - активную, реактивную мощности, модули и аргументы комплексных напряжений.
- 2. Устанавливаются численные значения a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} и d_{ij} , а также частные производные $\partial \Pi_a / \partial U_i$ и $\partial \Pi_a / \partial \Psi_{uj}$.
- 3. На основе численных значений матрицы Якоби в (29) и численных значений $\partial \Phi_{\rm pi} / \partial P_{\rm m}$, $\partial \Phi_{\rm pi} / \partial P_{\rm n}$ устанавливаются численные значения величины $b_{\rm m}$ согласно (50).
- Формируется система линейных алгебраических уравнений (51) и устанавливаются предварительные численные значения оптимальных активных мощностей независимых станционных узлов.
- 5. Имея численные значения активных мощностей независимых станционных узлов, в результате первой итерации при постоянном значении реактивных мощностей необходимо проверить следующее условие сходимости:

$$\left| \mathbf{P}_{\mathbf{m}}^{\mathcal{U}+1} - \mathbf{P}_{\mathbf{m}}^{\mathcal{U}} \right| \le \Delta \mathbf{P}_{\mathbf{m}} = \Delta \mathbf{P} \,, \tag{55}$$

где ΔP - положительная величина, характеризующая точность данного решения.

Если это условие не удовлетворяется, то решение задачи необходимо повторить, начиная с первого пункта. Следует отметить, что новая итерация осуществляется при использовании активных мощностей независимых станционных узлов, численные значения которых получены из условия их оптимальности.

Таким образом, решение задачи минимизации потерь активной мощности в сетях ЭЭС считается завершенным, если обеспечивается условие (55), т.е. условие сходимости.

В результате решения задачи минимизации потерь активной мощности в сетях устанавливаются численные оптимальные значения активных мощностей станционных узлов и значения параметров установившегося режима исследуемой ЭЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Хачатрян В. С.** Метод расчета потерь мощности в сетях энергосистемы // Изв. АН СССР. Сер. ТН.-1962.- №1.-С. 13-24.
- 2. **Хачатрян В.С.** Минимизация потерь активной мощности в электрических сетях // Изв. АН СССР. Сер. ТН.-1962.- №5.-С. 33-42.
- 3. **Хачатрян В.С.** К вопросу об определении потерь мощности в высоковольтных сетях энергосистемы // Изв. АН СССР. Сер. ТН.-1963.- №5.- С. 31-40.
- 4. **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.
- 5. **Хачатрян В.С.** Метод и алгоритм оптимизации режимов больших энергосистем // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1976.- №5.-С. 24-34.
- 6. Хачатрян В.С., Ибрахим А.И. Оптимизация режима электроэнергетической системы по реактивным мощностям прямым методом оптимизации при Z форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1997.-Т. 50, №2.-С.89-95.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.05.2004.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ե.Ա. ԳԼԱԴՈՒՆՉԻԿ, Մ.Ա. ՄՆԱՑԱԿԱՆՅԱՆ, Ա.Ռ. ԹՈԽՈՒՆՑ ԱԿՏԻՎ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՍՏԻ ՆՎԱԶԱՐԿՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑՈՒՄ

Դիտարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի էլեկտրական ցանցում ակտիվ հզորության կորստի նվազարկման խնդրի լուծումը լավարկման ուղղակի մեթոդով։

V. S. KHACHATRYAN, E.A. GLADUNCHIK, M.A. MNATSAKANYAN, A. R. TOKHUNTS MINIMIZATION OF ACTIVE POWER LOSSES IN POWER SUPPLY MAINS

Mininimzation problems of active power losses in powder supply mains by a direct optimization method are considered.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 620.91

ЭНЕРГЕТИКА

А.В. СТЕПАНЯН, Ж.Р. ПАНОСЯН

РАЗРАБОТКА НОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Описаны конструкции новых фотоэлектрических модулей, включающих концентрирующие линзы Френеля и DLC-инкапсулированные фотоэлектрические преобразователи. В данных конструктивных решениях не используются стеклянные защитные покрытия и EVA ламинирующие слои. Эти модули обладают рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогами, главными из которых являются экономичность, конкурентоспособность, простота и технологичность. Разработанные конструкции имеют двойную функцию, т.е. одновременно снабжают как электроэнергией, так и тепловой энергией.

Ключевые слова: солнечная энергия, преобразователь, фотоэлектрический модуль, концентратор, линза Френеля.

Ведение. В настоящее время к полезному использованию солнечной энергии привлечено внимание большого числа исследователей во всем мире. Резко возрос интерес как к теоретическим, так и к прикладным разработкам в области преобразования солнечного излучения. Высокие результаты, достигнутые в фотоэлектрическом методе преобразования, открывают возможность широко использовать на Земле полупроводниковые солнечные батареи, которые в течение вот уже 40 лет служат надежным источником электроэнергии на борту космических аппаратов.

Ha сегодняшний день широкомасштабному распространению солнечных электростанций на Земле препятствует высокая себестоимость фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Существуют многочисленные пути снижения их себестоимости, но самым эффективным и надежным методом является использование дешевых концентраторов солнечного излучения, так как в этом случае большая поверхность полупроводниковых ФЭП заменяется линзами И зеркалами. Использование концентрического света приводит к увеличению выходной мощности установки приблизительно прямо пропорционально степени концентрации и к некоторому увеличению КПД преобразования. При больших степенях концентрации требуется эффективное охлаждение рабочей поверхности ФЭП, что можно легко осуществить проточной водой, если созданы ФЭП, надежно работающие в водной среде [1, 2].

В стандартной технологии изготовления фотоэлектрического модуля для защиты поверхности ФЭП стеклом в процессе ламинации используются полимерные клеи, например, из этиленвинилацетата (EVA), которые со временем теряют свою прозрачность.

Целью данной работы является разработка новой конструкции фотоэлектрического модуля с использованием концентрического света без стеклянного покрытия и EVA ламинирующего слоя. В данном модуле используются ФЭП, инкапсулированные алмазоподобной углеродной (DLC) пленкой, которая обеспечивает надежную и бесперебойную работу ФЭП в водной среде.

Технология инкапсуляции ФЭП. Разработана низкотемпературная технология выращивания DLC пленок при температуре не более, чем 100 \mathcal{C} на поверхности ФЭП из кристаллического Si (c-Si). DLC пленки были получены ионноплазменным методом из газовой смеси, включающей углеводороды. Чтобы осуществить этот процесс, в качестве базового устройства использовалась вакуумная установка УВН-71П-3, в которой был смонтирован радиальный ионный источник. Подробное описание технологии, а также исследование характеристик полученных DLC пленок приведены в [3, 4].

Образцы DLC пленок на поверхности с-Si, выращенных при помощи данной технологии, имеют оптимальные оптические, электрические и механические параметры: коэффициенты отражения ~1% и пропускания ~98% (в фоточувствительной области Si), удельное сопротивление в пределах (8,5·3,5)·10⁻³ *Ом·см*, а также микротвердость ~3200 *кг·с/мм*² и стабильность к внешним воздействиям окружающей среды. Благодаря своим уникальным свойствам данное покрытие при нанесении на рабочую поверхность ФЭП защищает его от внешних воздействий и повышает КПД преобразования.

Для осаждения DLC пленки на поверхность ФЭП с площадью 100 *см*² из с-Si с разбросом параметров не более 5% по всей поверхности ФЭП было специально разработано новое технологическое устройство со сложным трехосевым вращением ФЭП [5].

Фотоэлектрические характеристики ФЭП были определены при помощи нового измерительного устройства [6]. Управление данной системой осуществляется при помощи специально созданной программы, которая производит построение световых вольтамперных характеристик ФЭП, определяет из графика максимальную мощность и, в конечном итоге, рассчитывает КПД ФЭП по следующему выражению:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{c} \cdot S} \cdot 100\% = \frac{f \cdot U_{xx} \cdot I_{K3}}{P_{c} \cdot S} \cdot 100\%$$

где P_{max} – максимальная выработанная мощность ФЭП; P_c – мощность светового потока на единичной освещенной поверхности; S – площадь освещаемой поверхности ФЭП; U_{xx} – напряжение холостого хода; I_{x3} – ток к.з.; f – коэффициент заполнения.

Из световых вольт-амперных характеристик (рис. 1) следует, что вследствие осаждения DLC пленки на освещаемую поверхность ФЭП ток короткого замыкания увеличился до 45%. Зависимости мощности ФЭП от напряжения (рис. 2) показывают среднее увеличение мощности на 35(45%, что в итоге приблизительно настолько же повышает КПД преобразования.

Для эффективной работы ФЭП под концентрированным солнечным излучением необходимо, чтобы инкапсулирующее покрытие имело не только требуемые оптические и механические свойства, но также высокую стабильность к внешним воздействиям, особенно к влаге. Проведенные ускоренные испытания показали, что DLC пленки стабильны к воздействиям температуры, влаги, химически агрессивных сред и ультрафиолетового облучения. Результаты измерений свидетельствуют о защитных свойствах DLC пленок и высоких характеристиках ФЭП [7].





Разработка конструкции фотоэлектрического модуля с использованием концентраторов солнечного излучения. В настоящее время в гелиотехнике большое внимание уделяется линзовым концентрирующим системам, особенно с применением линз Френеля. Можно отметить следующие достоинства этих линз по сравнению с другими концентраторами:

- дешевизна материала и технологии изготовления;
- достаточно удовлетворительные светостабильные свойства при защите линз от ультрафиолетового облучения;
- легкость и простота устройства самой линзы, обладающей конструктивной компактностью;
- система слежения за Солнцем может быть более грубой, чем для отражательной системы, что упрощает ее и делает более надежной.

Конструкция фотоэлектрического модуля с линзой Френеля является одним из самых экономичных и практических методов для концентрирования солнечного излучения в сфере использования солнечной энергии.

Как было отмечено выше, срок службы фотоэлектрического модуля сильно сокращается из-за потери прозрачности полимерной пленки, используемой в процессе ламинации для прикрепления Φ ЭП к внутренней поверхности защитного термообработанного стекла толщиной 3 *мм*. В процессе работы модуля, вследствие ультрафиолетового облучения Солнца, полимерный клей теряет свою прозрачность в среднем на ~0,5% в год. А при использовании концентрического света скорость потери прозрачности клея составляет 1...2% в год [8].

В разработанных конструкциях фотоэлектрического модуля не используются защитное стекло и, следовательно, полимерный слой клея. Стекло составляет 75...80% веса фотоэлектрического модуля, и применение тонкопленочных защитных слоев из DLC пленки (толщиной ~100 *нм*) позволит существенно снизить вес модуля, а также упростить

конструкцию. Кроме того, как было отмечено выше, DLC пленка обладает просветляющими свойствами и увеличивает КПД преобразования ФЭП.

В данной работе рассмотрены два варианта конструкции фотоэлектрического модуля. В обоих случаях используются концентрирующие линзы Френеля и ФЭП, инкапсулированные DLC пленкой. Существует несколько видов таких линз: например, плоские и параболоцилиндрические, которые имеют кольцевые и продолговатые канавки (фасеты).

На рис. 3 приведен общий вид конструкции фотоэлектрического модуля с продолговатой параболоцилиндрической линзой Френеля. Конструкция включает в себя: 1 - ФЭП, расположенный параллельно линии апекса конструкции и направленный лицевой стороной к световому потоку; 2 - двумерная продолговатая линза Френеля, завершающая конструкцию с верхней стороны; 3 - боковые стенки модуля, представляющие собой отражающие поверхности; 4 - каркас конструкции, выполненный из алюминиевого профиля; 5 - ввод и выход проточной воды, необходимой для охлаждения рабочей поверхности ФЭП; 6 - электрический выход, служащий для подсоединения электрической нагрузки или для подключения к другим модулям; 7 - прозрачный слой из стекла, расположенный между линзой Френеля и ФЭП, разделяющий внутреннее пространство конструкции на две секции; 8 - промежуточная перегородка, имеющая двусторонние отражательные поверхности.



Рис. 3. Общий вид конструкции фотоэлектрического модуля с продолговатой параболоцилиндрической линзой Френеля

Другой вариант конструкции фотоэлектрического модуля приведен на рис. 4. В данном конструктивном исполнении используются плоские кольцевые линзы Френеля. Обозначенные номера элементов данной конструкции совпадают с номерами элементов, приведенных на рис. 3.

Солнечные лучи, попадая на поверхность линзы 2, преломляются в направлении рабочей поверхности ФЭП 1, расположенного выше фокусного расстояния линзы. Внутри конструкции солнечные лучи преломляются боковыми отражательными поверхностями 3 так же, как и промежуточной двусторонней отражательной перегородкой 8 по направлению ФЭП, пока все поступающие в конструкцию лучи не будут облучать рабочую поверхность.

Концентрированная солнечная энергия преобразуется в электрическую энергию при помощи ФЭП и в тепловую энергию при помощи жидкости-носителя, циркулирующей через секцию между прозрачным стеклянным слоем 7 и ФЭП 1. Жидкий теплоноситель (в данном случае вода) нагревается как вследствие парникового эффекта, обеспеченного стеклянным слоем 7, так и от поверхности ФЭП, нагретой солнечными лучами.

Для оценки экономической эффективности нового модуля сравним требуемые затраты на 1 *Вт* установочной мощности для обычного фотоэлектрического модуля и для разработанной конструкции.

В традиционной конструкции модуля основную часть затрат составляет стоимость ФЭП. Вследствие использования концентрического света становится возможным сократить количество дорогостоящих ФЭП на единицу площади, а стоимость полимерного концентратора в 20..30 раз ниже стоимости полупроводникового ФЭП.

При высоких степенях концентрации солнечного излучения усложняется применяемая система охлаждения рабочей поверхности ФЭП. Предложенный способ охлаждения элементов проточной водой не приводит к значительному повышению себестоимости модуля, а также к его конструктивному усложнению.



Рис. 4. Схематическое изображение конструкции фотоэлектрического модуля с плоскими кольцевыми линзами Френеля

В качестве примера приводятся результаты приблизительного расчета стоимости 1 *Вт* установочной мощности для стандартного модуля (без использования концентраторов) и для разработанной конструкции (с использованием концентрического света ~100Х), приведенной на рис. 4. В таблице приведены стоимости отдельных элементов двух модулей. В конечной себестоимости модулей не учитываются затраты на зарплату и прибыль.

Таблица

No	Наименование компонентов	Сравниваемый	Разработанный	
14-	Паименование компонентов	модуль	модуль	
1	Фотоэлектрический элемент,	\$27,6	\$27,6	
	S=78 см ² , P=1,1 Вт/шт	(12 <i>шт</i> .x\$2,3)*	(12 шт.х\$2,3)	
2	Защитное стекло, 15х40 см	\$10,0		
3	Френель линзы, 12 <i>шт</i> , 100х100 <i>см</i>		\$220,0	
4	Алюминиевый профиль	\$3,0	\$40,0	
5	Ламинирующие слои (EVA и Tedlar)	\$2,0		
6	Прочие расходы	\$5,0	\$70,0	
	Итого	\$47,6	\$357,6	

 * - рыночная цена ФЭП, предлагаемая одним из ведущих производителей в этой области, ОКБ завода "Красное Знамя".

В прочие расходы включены: 1) для разработанного модуля - стоимости боковых отражательных стенок конструкции и прозрачного слоя из стекла, стоимость охлаждающей системы, стоимость процесса инкапсуляции DLC пленкой и др.; 2) для сравниваемого модуля - стоимость процесса ламинации и др.

В модулях используются фотоэлектрические элементы мощностью 1,1 *Вт/шт.* На единицу площади модулей приходится одинаковое количество солнечной энергии. Следовательно, электрическая мощность первого модуля будет ~13,2 *Вт*, а второго:

$12 \times 1, 1 \times 100 = 1320$ BT.

Принимая потери мощности ~10%, выработанная электрическая мощность разработанного модуля составит ~1188 *Br*. Данный модуль одновременно вырабатывает и тепловую энергию. Экспериментальным путем было определено, что тепловая энергия составляет ~4000 *Br*. С использованием теплоносителя с более высокой теплопроводностью, чем у воды, станет возможным повысить количество выработанной тепловой энергии. При грубом расчете можно принять суммарную эффективную мощность нового модуля ~5188 *Br*. В данном случае для определения себестоимости 1 *Br* установочной мощности рассмотрена только электрическая составляющая суммарной мощности. В итоге, стоимость 1 Вт каждого модуля будет

$$C_1 = 3_1 / P_2 = $47,6/13,2BT = 3,61$/BT,$$

 $C_2 = 3_2 / P_2 $357,6/1,188BT = 0,3$/BT,$

где C₁ – стоимость 1 *Вт* установочной мощности сравниваемого модуля; З₁ – затраты на изготовление данного модуля; Р₁ – мощность модуля; С₂, З₂ и Р₂ - соответственно аналогичные параметры для разработанного модуля.

Итак, приведенные в данной работе конструкции фотоэлектрического модуля имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими на сегодняшний день аналогами, а именно: во-первых, данные конструкции не требуют высокой степени точности и четкости в геометрии и в изготовлении. Результатом этого является высокая экономичность и легкий вес модуля с концентратором солнечных лучей. Во-вторых, данный модуль преобразует солнечную энергию в электрическую при концентрации света, следовательно, уменьшается необходимая поверхность ФЭП, что приводит к радикальному снижению стоимости выработанной электроэнергии приблизительно в 10...15 раз. А если принять во внимание и тепловую составляющую суммарной мощности, то снижение стоимости выработанной электроэнергии будет приблизительно в 45...55 раз. В-третьих, данные конструкции фотоэлектрического модуля снабжают как электроэнергией, так и тепловой энергией; двойная функция модуля обеспечивает более высокий КПД преобразования солнечной энергии и низкую первоначальную капитальную стоимость, высокое удобство в использовании, широкую область его применения и улучшенную эксплуатационную эффективность фотоэлектрического модуля. Разработанный модуль является универсальным устройством для использования как в коммунально-бытовом секторе, так и в различных индустриальных применениях. Следует отметить, что возможно модифицировать конструкцию фотоэлектрического модуля согласно требованиям потребителя.

Заключение. Основные выводы данной работы сводятся к следующему:

- На основе с-Si ФЭП с площадью 100 см², инкапсулированные разработанной DLC пленкой, обеспечивающей не только требуемые оптические, электрические и механические характеристики, но и полностью сохраняющей их при длительном воздействии температуры, влаги, химически агрессивных сред, ультрафиолетового облучения и при других воздействиях окружающей среды, созданы новые фотоэлектрические модули, надежно работающие при высоких концентрациях солнечного излучения в водной среде.
- 2. Новые конструкции фотоэлектрического модуля с использованием полимерных линз Френеля, без EVA ламинирующего слоя и защитного стекла отличаются своей простотой, технологичностью, экономичностью и другими положительными свойствами. Фотоэлектрические модули имеют двойную функцию, т.е. одновременно снабжают как электроэнергией, так и тепловой энергией, что делает их универсальным устройством для использования в различных отраслях.
- Разработанные конструкции фотоэлектрического модуля позволят снизить себестоимость устройства, в результате чего электроэнергия, произведенная из солнечного излучения, станет конкурентоспособной для электроэнергии, выработанной традиционными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Panosyan Zh., Arakelova E., Voskanyan S., Voskanyan A., Yengibaryan Y., Stepanyan A., Torosyan G., Shaboyan A. Obtaining and Investigation of Silicone Carbide Films and Diamond-Like Carbon on Silicone Surfaces// Proceedings of ISTC International Seminar "Conversion Potential of Armenia and ISTC Programs", October 2-7. - 2000. - Yerevan, 2000. - Part 2.- P. 207-210.
- Kassabian K., Panosyan Zh., Stepanyan A., Torosyan G., Yengibaryan Y. Low-temperature Technology of Obtaining the Protecting Layer from Diamond-Like Films// Proceedings of the Sixth Applied Diamond Conference/Second Frontier Carbon Technology Joint Conference, Auburn, AL, USA, August 6-10. - 2001.- P. 431-435.
- Енгибарян Е., Восканян С., Восканян А., Степанян А., Паносян Ж. Выращивание алмазоподобной углеродной пленки на поверхности кремниевого солнечного элемента// Материалы 3-й Нац. конф. «Полупроводниковая микроэлектроника», Севан, Сентябрь 10-12. - 2001. - Ереван, 2001.- С. 267-271.
- 4. Паносян Ж., Восканян С., Енгибарян Е., Степанян А. Получение и исследование тонкопленочных инкапсулирующих алмазоподобных углеродных пленок для фотоэлектрических преобразователей // Алмазные пленки и пленки родственных материалов: Сб. тр. 15-го Межд. симп. "Тонкие пленки в электронике".- Украина, Харьков. - 2003.- С. 213-216.
- Արտոնագրի հայտ P20030059, H01L31/02, C23C016/26, 28.04.2003/ Ժ. Փանոսյան, Ե. Ենգիբարյան, U. Ոսկանյան, U. Ստեփանյան, U. Բերբերյան, ՝՝Ալմաստանման ածխածնային թաղանթով պատման սարը[¬], Գյուտերի հայտեր, 11.07.2003.- №36.- էջ. 5-6:
- 6. Степанян А. Воздействие ультрафиолетового облучения на устойчивость солнечного фотоэлемента и измерение его КПД// Сб. матер. Год. науч. конф., ГИУА.- Ереван, 2002.- Т. 1.- С. 158-160.
- Паносян Ж., Восканян С., Енгибарян Е., Степанян А., Туманян А. Изучение стабильности алмазоподобных углеродных пленок к воздействиям окружающей среды// Материалы 4-й Нац. конф. «Полупроводниковая микроэлектроника", Цахкадзор, Май 29-31, 2003.- Ереван, 2003.- С. 196-199.
- 8. **Pern F.J., Glick S.H.** Photothermal Stability of Encapsulated Si Solar Cells and Encapsulation Materials upon Accelerated Exposures// Solar Energy Materials and Solar Cells.- 2000.- V.61.- P. 153-188.
- ГИУА. Материал поступил в редакцию 02.09.2003.

Ա.Վ. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Ժ.Ռ. ՓԱՆՈՍՅԱՆ

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆԻ ՆՈՐ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄՈԴՈՒԼԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄ

Աշխատանքում նկարագրվում են նոր ֆոտոէլեկտրական (ՖԷ) մոդուլների կոնստրուկցիաններ, որտեղ կիրառված են խտացուցիչ Ֆրենելային ոսպնյակներ և DLC թաղանթով պատված ՖԷ կերպափոխիչներ։ Այս կոնստրուկցիաներում չեն օգտագործված ապակե պաշտպանիչ ծածկույթներ և EVA լամինացիոն թաղանթներ։ Տվյալ մոդուլները ունեն մի շարք առավելություններ, որոնցից կարևորագույններն են` խնայողականությունը, մրցունակությունը, պարզությունը և տեխնոլոգիականությունը։ Մշակված կոնստրուկցիանները կատարում են կրկնակի ֆունկցիա, այսինքն` միաժամանակ մատակարարում են ինչպես էլեկտրական, այնպես էլ ջերմային էներգիա։

A.V. STEPANYAN, ZH.R. PANOSYAN

DEVELOPMENT OF THE NEW PHOTOVOLTAIC MODULE FOR SOLAR POWER STATIONS

The constructions of the photovoltaic (PV) modules utilizing the concentrating Frenel lenses and DLC-encapsulated PV cells are described. The modules have neither any protective glazing nor EVA laminar layers. These constructions offer a series of advantages over existing analogs, the main ones being effectiveness, competitiveness, simplicity, and fabricability. The worked out modules have double functionality, that is, they simultaneously provide both electric energy and thermal energy.

ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

*Հ*SԴ 620.91

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱ

Գ.Շ. ՇՄԱՎՈՆՅԱՆ

ԵՐԿԿՈՂՄԱՆԻ ՈՒՂՂՈՐԴՎԱԾ ՆՈՐ ԵՐԵՎՈՒՅԹ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐԻ ԹԵՔ ԱԼԻՔԱՏԱՐՈՒՄ

Ուսումնասիրվել է բազմակի ոչ հավասարաչափ քվանտային հորեր ունեցող կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարի թեք ալիքատարով անցնող լույսի օպտիկական ձանապարհի ազդեցությունը ձառագայթման սպեկտրերի վրա տարբեր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում։ Հայտնաբերվել է նոր երկկողմանի ուղղորդված երևույթ. լայնաշերտ կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարի թեք ալիքատարով անցնող լույսի օպտիկական ձանապարհը մեծ ազդեցություն ունի կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարի ձառագայթման բնութագրերի վրա՝ ինքնակամ և հարկադրված ձառագայթումների շնորհիվ։

Առանցքային բառեր. կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարար, բազմակի քվանտային հորեր, երկկողմանի ուղղորդված երևույթ, լայնաշերտ բնութագրեր։

Հայնաշերտ կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարները (ԿՕՈւ) որպես ուժեղացնող միջավայր կարող են կիրառվել օպտիկական մանրաթելային հաղորդակցությունում՝ համալարվող լազերներում, օպտիկական անջատիչներում և ալիքային փոխանջատիչներում։ Հայնաշերտ ԿՕՈւ կարելի է ստանալ բազմակի քվանտային հորերի (ՔՀ) տեխնիկայի միջոցով` բազմաշերտ կիսահաղորդչային կառուցվածքներից ստեղծելով պոտենցիալային քվանտային հորերի համակարգ [1]։

Աշխատանքում ցույց է տրվում, որ լայնաշերտ ԿՕՈւ-ի թեք ալիքատարով անցած լույսի օպտիկական ձանապարհը մեծ ազդեցություն ունի լայնաշերտ ԿՕՈւ-ի բնութագրերի վրա։

Բազմակի ՔՀ-եր ունեցող ԿՕՈւ-ները նախագծվել են բազմակի ՔՀ-երի տեխնիկայի միջոցով և պատրաստել մետաղ-օրգանական գոլորշու նստեցման եղանակով, իսկ ԿՕՈւի թեք ալիքատարը՝ ռեակտիվ իոնային խածատման եղանակով։ ԿՕՈւ-ն ունի լայնաշերտ բնութագրեր [2-5]։ ԿՕՈւ-ի երկարությունը և լայնությունը համապատասխանաբար հավասար են 500 *մկմ-*ի ու 300 *մկմ-*ի (նկ. 1)։ ԿՕՈւ-ի ալիքատարն ունի 200 *մկմ* թեքված մաս, իսկ երկարությունը և լայնությունը համապատասխանաբար ու 5 *մկմ-*ի (նկ. 1)։ Նկ. 1-ում պատկերված է մանրադիտակով նկարահանված, թեք ալիքատար ունեցող ԿՕՈւ։



ԿՕՈւ-ի քվանտային կառուցվածքն ունի հետևյալ դասավորությունը՝ 6,0 uu'լայնությամբ Ino,67Gao,33Aso,72Po,28 եռակի ՔՀ-երը (ՔՀ1) գտնվում են ո ծածկութային շերտին մոտ, իսկ 8,7 uu' լայնությամբ Ino,53Gao,47As երկակի ՔՀ-երը (ՔՀ2)՝ թ-ծածկութային շերտին մոտ (նկ. 2, աղ.)։ Նկ. 2-ում և աղյ. 1-ում համապատասխանաբար բերված են թեք ալիքատար ունեցող ԿՕՈւ-ի ակտիվ շերտի քվանտային կառուցվածքը և պարամետրերը։



Աղյուսակ

Քվանտային	Կիսահաղորդչային	₽Հ-ի	Անցման ալիքի
կառուցվածք	նյութ	լայնություն, <i>նմ</i>	երկարություն, <i>նմ</i>
₽Հ1	In _{0,67} Ga _{0,33} As _{0,72} P _{0,28}	6,0	1300 և 1240
<u> </u>	In _{0,53} Ga _{0,47} As	8,7	1550, 1460, 1180
ዲቢ	In _{0,86} Ga _{0,14} As _{0,3} P _{0,7}	15	
いしえて	In _{0,86} Ga _{0,14} As _{0,3} P _{0,7}	120	

6,0 *նմ* և 8,7 *նմ* լայնությամբ ՔՀ-երը առանձնացված են 15 *նմ* լայնությամբ Ino,86Gao,14Aso,3Po,7 քվանտային արգելքներով (ՔԱ)։ 120 *նմ* լայնությամբ առանձնացված սահմանափակման հետերոանցում (ԱՍՀՇ) առաջանում է 6,0 *նմ* և 8,7 նմ լայնությամբ ՔՀ-երի միացման արդյունքում (նկ. 2)։ 6,0 *նմ* և 8,7 *նմ* լայնությամբ ՔՀ-երը համապատասխանաբար ունեն էներգիայի երեք՝ 1550 *նմ*, 1460 *նմ* և 1180 *նմ* և երկու՝ 1300 *նմ* և 1240 *նմ* քվանտացված մակարդակներ (աղ. 1)։

150 *dԱ* ինժեկցիոն հոսանքի դեպքում ԿՕՈՒ-ի թեք ալիքատարով լույս անցնելիս ԿՕՈՒ-ի օպտիկական ուժեղացումը և աղմուկը համապատասխանաբար կազմում են 28 *Դբ* և 7 *Դբ*.

ԿՕՈւ-ների Ճառագայթման սպեկտրերը չափվել են թեք ալիքատարի ուղիղ (1-ին դեպք) և թեք (2-րդ դեպք) մասերից տարբեր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում (նկ. 1)։ Չափվել են նաև միևնույն ԿՕՈւ-ի թեք ալիքատարի թեք մասից Ճառագայթման պեկտրերը, որոնք համապատասխանում են ԿՕՈւ-ի ալիքատարից արձակված լույսի ուղիղ տարածման ուղղությանը (3-րդ դեպք) (նկ. 1)։

Ցածր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում 1-ին դեպքին համապատասխանող Ճառագայթման ալիքի երկարությունը 1550 *նմ* է և համապատասխանում է 8,7 *նմ* յայնությամբ ՔՀ-ի ո=1 անցման Ճառագայթմանը (նկ. 3)։

Նկ. 3-ում պատկերված են ԿՕՈւ-ի 1-ին դեպքին համապատասխանող Ճառագայթման սպեկտրերը` տարբեր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում։



0,05 *U* ինժեկցիոն հոսանքի դեպքում սպեկտրի լայնությունը 180 *նմ* է։ Ինժեկցիոն հոսանքի մեծացմանը զուգընթաց ձառագայթման սպեկտրը նախ լայնանում է ի հաշիվ 8,7 *նմ* լայնությամբ ՔՀ-ի n=1 և n=2 անցումների հարկադրված ձառագայթման, իսկ 0,8 *U* ինժեկցիոն հոսանքի դեպքում՝ նաև ի հաշիվ 6,0 *նմ* լայնությամբ ՔՀ-ի հարկադրված ձառագայթման։ 1,2 *U* ինժեկցիոն հոսանքի դեպքում սպեկտրը ի հաշիվ 8,7 *նմ* և 6,0 *նմ* լայնությամբ ՔՀ-երի լայնանում է մինչև 235 *նմ* և միաժամանակ տեղաշարժվում դեպի կարձ այիքներ։

Նկ. 4-ում պատկերված են ԿՕՈւ-ի 2-րդ դեպքին, իսկ նկ. 5-ում՝ 3-րդ և 2-րդ դեպքերին համապատասխանող Ճառագայթման սպեկտրերը՝ տարբեր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում։









Տածր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում 1-ին (նկ. 3) և 2-րդ (նկ. 4 և նկ. 5, կորեր 2, 4, 6 և 8) դեպքերին համապատասխանող ԿՕՈւ-ների Ճառագայթման սպեկտրերի վարքերն իրար նման են։ 3-րդ դեպքին համապատասխանող Ճառագայթման սպեկտրերը (նկ. 5, կորեր 1, 3, 5 և 7) տարբերվում են 1-ին և 2-րդ դեպքերի Ճառագայթման սպեկտրերից. ավելի լայն են և ունեն համարյա հարթ հորիզոնական մաս։ 3-րդ դեպքում ԿՕՈւ-ից արձակված լույսի ինտենսիվությունը 10 անգամ փոքր է 1-ին և 2-րդ դեպքերի լույսի ինտենսիվությունը 3-րդ (նկ. 5, կորեր 1, 3, 5 և 7) և 2-րդ (նկ. 5, կորեր 2, 4, 6 և 8) դեպքերի արդյունքները համեմատելու համար 3-րդ դեպքի արդյունքները մեծացվել են 10 անգամ և ներկայացվել միննույն նկարում (նկ. 5)։

Այսպիսով, փորձնական արդյունքները ցույց են տալիս, որ ԿՕՈւ-ով անցնող լույսի օպտիկական ձանապարհը մեծ ազդեցություն ունի ձառագայթման սպեկտրերի վրա։ Դա կարելի է բացատրել հետևյալ կերպ. ԿՕՈւ-ի թեք ալիքատարով անցնող լույսը այիքատարի թեքված մասում բաժանվում է երկու մասի. մի մասը դուրս է գայիս ալիքատարից (2-րդ դեպք), իսկ մյուս մասը, թեք ալիքատարի թեքված մասից դուրս գալով, ուղիղ գծով տարածվելով և ԿՕՈւ-ում մասամբ կլանվելով դուրս է գալիս ԿՕՈւ-ից (3-րդ դեպք)։ Ալիքատարի ուղիղ մասից (1-ին դեպք) արձակվող լույսր դուրս է գալիս ալիքատարի ուղիղ մասից՝ առանց բաժանվելու։ Թեք ալիքատարի թեք մասից արձակված լույսի ելքային հզորությունը (նկ. 6, կոր 2) ավելի մեծ է, քան թեք այիքատարի ուղիղ մասից արձակված լույսի ելքային հզորությունը (նկ. 6, կոր 1) տարբեր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում։ Բացի այդ, թեք այիքատարի թեք մասից արձակված յույսի ինտենսիվությունը մեծ է ալիքատարի ուղիղ մասից արձակված լույսի ինտենսիվությունից (նկ. 5), քանի որ յույսը կյանվում է ԿՕՈւ-ում։ ԿՕՈւ-ի Ճառագայթման սպեկտրերի (նկ. 3, 4 և 5) տարբերությունը բացատրվում է ԿՕՈւ-ի ինքնակամ և հարկադրված Ճառագայթման տարբերությամբ, րնդ որում ԿՕՈւ-ից արձակված յույսի 3-րդ դեպքին համապատասխանող Ճառագայթումը հիմնականում ինքնակամ Ճառագայթման արդյունք է։ Այդ պատմառով, վերջին դեպքում մառագայթված լույսի ինտենսիվությունը շատ փոքր է, սպեկտրը՝ լայն, իսկ ազդանշանը՝ աղմկոտ (նկ. 5, կորեր 1, 3, 5 և 7)։

Նկ. 6-ում պատկերված են ԿՕՈւ-ի 1-ին և 2-րդ դեպքերին համապատասխանող ելքային հզորությունները տարբեր ինժեկցիոն հոսանքների դեպքում։





Այսպիսով, օգտագործելով բազմակի ՔՀ-երի տեխնիկան հաջողվեց պատրաստել լայնաշերտ ԿՕՈւ, որի արդյունքում հայտնաբերվեց երկկողմանի ուղղորդված նոր երևույթ [6, 7], այն է. լայնաշերտ ԿՕՈւ-ի թեք ալիքատարով անցնող լույսի օպտիկական Ճանապարհը մեծ ազդեցություն ունի կիսահաղորդչային օպտիկական ուժեղարարի Ճառագայթման բնութագրերի վրա՝ ինքնակամ և հարկադրված Ճառագայթումների շնորհիվ։

Աշխատանքն իրականացվել է ՆԱՏՕ-ի FEL.RIG980772 վերամիավորման դրամաշնորհի շրջանակներում։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. Semenov A.T., Shidlovski V.R., Safin S.A. // Electron. Lett. 1993. V. 29. P. 854 856.
- 2. Lin C.-F., Wu B.-R., Laih L.-W., Shih T.-T. // Opt. Lett. 2001.- V. 26. P. 1099 1102.
- Lin C.-F., Tsai C.-W., Chang Y.-C., Chen C.-H., Shmavonyan G.Sh., Su Y.-S. Extremely broadband superluminescent diodes/Semiconductor Optical Amplifiers in Optical Communication band // SPIE Proceedings, San Jose, USA. – 2003. - V. 4989. – P. 69-77.
- Lin C.-F., Tsai C.-W., Chang Y.-C., Chen C.-H., Shmavonyan G.Sh., Su Y.-S. Semiconductor lasers/optical amplifiers in optical communication band with very broadband property // IEEE Proceedings, Australia. – 2003. - P. 299 – 304.

- 5. Tsai C.-W., Shmavonyan G.Sh. Lin C.-F. Extremely broadband InGaAsP/InP superluminescent diodes // Proceedings of OPTO'2003, Taipei, Taiwan. 2002. P. 567-571.
- 6. Shmavonyan G.Sh. Bi-directional guided effect in a shallow-etched bending ridge waveguide // IOP Condensed Matter and Materials Physics Conference, Paper SOP. 105, Coventry, UK, April 4-7, 2004.- P.105.
- 7. Shmavonyan G.Sh. Novel bi-directional guided effect of lasing mode // APS Bulletin, Paper H39.008, Montreal, Quebec, Canada. 2004.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 17.05.2004։

Г.Ш. ШМАВОНЯН

ДВУСТОРОННЕ НАПРАВЛЕННОЕ НОВОЕ ЯВЛЕНИЕ В КРИВОМ ВОЛНОВОДЕ ШИРОКОЗОННОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Исследовано влияние оптического пути света на излучательных спектрах полупроводниковых оптических усилителей с кривым волноводом и неодинаковыми многочисленными квантовыми ямами при разных инжекционных токах. Обнаружено новое двусторонне направленное явление - оптический путь света, проходящего через кривой волновод широкозонного полупроводникового оптического усилителя, который сильно зависит от излучательных характеристик вследствие разных спонтанных и стимулированных излучений.

G.SH. SHMAVONYAN

NOVEL BIDIRECTIONAL GUIDED EFFECT IN BENT-WAVEGUIDE OF BROADBAND SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER

The influence of the optical path on emission spectra of bent-waveguide semiconductor optical amplifier with non-identical multiple quantum wells at different injection current levels is investigated. A new bidirectional guided effect has been discovered the optical path of light passing through bent waveguide of broadband semiconductor optical amplifier greatly influencing the emission characteristics due to different spontaneous and stimulated emissions.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.311

ЭНЕРГЕТИКА

К.В. ХАЧАТРЯН

КОРРЕКЦИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИАКОПТИКИ

Предлагается метод коррекции установившегося режима сложной ЭЭС с применением метода диакоптики. Рассматривается случай, когда изменяются только компоненты вектора возмущений или активные и реактивные мощности нагрузочных узлов.

Ключевые слова: матрица, мощность, узел, режим, диакоптика, электроэнергетическая система, нагрузка, электрическая станция, элемент.

В настоящее время для расчета установившегося режима сложной электроэнергетической системы (ЭЭС) широко применяется идея диакоптики [1-6], которая обеспечивает не только уменьшение общего объема расчета, но и объем памяти вычислительной машины. Исследования показывают, что идею диакоптики одновременно можно успешно использовать также для коррекции установившегося режима сложной ЭЭС, не решая полную задачу расчета установившегося режима. Задача коррекции возникает в двух случаях, когда изменение исходной информации происходит как по активным параметрам [4], так и по пассивным [5].

Настоящая статья посвящена коррекции установившегося режима, когда изменение происходит по активным параметрам ЭЭС, с применением идеи диакоптики или декомпозиции.

Удаляя определенное количество ветвей [3], можно представить заданную сложную ЭЭС как совокупность радиально связанных подсистем [1], при которой матричное уравнение видоизмененной по структуре ЭЭС представляется в следующем виде:

где $\dot{U}_{i_1}, \dot{U}_{i_2}, ..., \dot{U}_{i_N}$ - векторы комплексных узловых напряжений отдельных подсистем; $\dot{I}_{j_1}, \dot{I}_{j_2}, ..., \dot{I}_{j_N}$ - векторы комплексных узловых токов отдельных подсистем; $\dot{U}_{Ei_1}, \dot{U}_{Ei_2}, ..., \dot{U}_{Ei_N}$ - величины, связывающие отдельные подсистемы; $Z_{i_1j_1}, Z_{i_2j_2}, ..., Z_{i_Hj_H}$ - неособенные квадратные матрицы узловых сопротивлений отдельных подсистем.

Величины $\dot{U}_{\rm Bi_1}, \dot{U}_{\rm Bi_2}, ..., \dot{U}_{\rm Bi_N}$ определяются на основании соответствующих выражений, приведенных в [3]. Следует отметить, что в настоящей статье применяется та же система индексов, что и в [3].

На основании (1) матричное уравнение сложной ЭЭС можно представить как совокупность матричных уравнений отдельных подсистем:

$$\begin{cases} \dot{U}_{i_{1}} \Box \dot{U}_{Bi_{1}} \Box Z_{i_{1},j_{1}} \dot{I}_{j_{1}}, \\ \dot{U}_{i_{2}} \Box \dot{U}_{Bi_{2}} \Box Z_{i_{2},j_{2}} \dot{I}_{j_{2}}, \\ \dots \\ \dot{U}_{i_{N}} \Box \dot{U}_{Bi_{N}} \Box Z_{i_{N},j_{N}} \dot{I}_{j_{N}}, \end{cases}$$
(2)

где

$$\dot{\mathbf{U}}_{i} \Box \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{i_{1}}, \dot{\mathbf{U}}_{i_{2}}, \dots, \dot{\mathbf{U}}_{i_{N}} \end{bmatrix}, \qquad \dot{\mathbf{I}}_{j} \Box \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{j_{1}}, \dot{\mathbf{I}}_{j_{2}}, \dots, \dot{\mathbf{I}}_{j_{N}} \end{bmatrix} - (3)$$

векторы комплексных напряжений и токов отдельных подсистем сложной ЭЭС;

$$\dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{b}i} \Box \bigsqcup \dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{b}i_{1}}, \, \dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{b}i_{2}}, \, \dots, \, \dot{\mathbf{U}}_{\mathbf{b}i_{N}} \bigsqcup -$$
(4)

вектор, связывающий отдельные подсистемы.

На основании (2) строятся системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима.

Умножив систему уравнений (2) соответственно на $\hat{I}_{i_1}, \hat{I}_{i_2}, \ldots, \hat{I}_{i_N}$, получим системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\Phi_{pi_{1}}\prod_{i_{1}}, I_{i_{1}}\prod_{i_{1}}P_{i_{1}} = \left\{P_{Bi_{1}} = \sum_{j_{1}}\mathbb{R}_{i_{1},j_{1}}\prod_{i_{1}}\prod_{j_{1}}P_{i_{1}} = I_{i_{1}}\prod_{j_{1}}\prod_{i_{1}}I_{i_{1}}\prod_{j_{1}}P_{i_{1}} = I_{i_{1}}\prod_{j_{1}}P_{i_{1}} = I_{i_{1}}\prod_{j_{2}}P_{i_{2}} = I_{i_{2}}\prod_{j_{2}}P_{j_{2}} = I_{$$

Величины $P_{\text{Бi}_1}, Q_{\text{Бi}_1}, \dots, P_{\text{Бi}_N}, Q_{\text{Бi}_N}$ определяются на основании соответствующих выражений, приведенных в [3].

Для решения поставленной задачи дается понятие вектора состояния X, компонентами которого является совокупность зависимых переменных:

$$\begin{bmatrix} X_{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{0} \\ Q_{0} \end{bmatrix}$$
 для базисного (балансирующего) станционного узла
типа U – Ψ_U;
$$\begin{bmatrix} I' \\ I'' \end{bmatrix}$$
 для станционных и нагруз. узлов типа P – Q. (8)

Вектор управления обозначается через U, компонентами которого является совокупность независимых переменных:

$$\begin{bmatrix} U_{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{y} \\ \Psi_{u} \end{bmatrix}$$
для базисного (балансирующего) станционного узла

$$\begin{bmatrix} \Psi_{u} \end{bmatrix}$$
типа U – Ψ_{U} ;
P
Q
Для независимых станционных узлов типа P – Q.
(9)

Дается также понятие вектора возмущения W, компонентами которого являются заданные режимные параметры нагрузочных узлов:

$$\begin{bmatrix} W_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$$
 для нагруз. узлов типа P – Q. (10)

При традиционной постановке задачи расчета установившегося режима ЭЭС считаются заданными векторы U_Z и W_Z и необходимо определить вектор X_Z .

Представляя (5)-(7) в виде

$$\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{I}', \mathbf{I''}) \stackrel{\scriptscriptstyle \Delta}{=} \begin{cases} \Phi_{\mathrm{pi}}(\mathbf{P}, \mathbf{I}', \mathbf{I''}) = 0; \\ \Phi_{\mathrm{qi}}(\mathbf{Q}, \mathbf{I}', \mathbf{I''}) = 0, \end{cases}$$
(11)

где

$$i = (i_1, i_2, \dots, i_N),$$
 (12)

следует

$$\Phi(\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{I}', \mathbf{I}'') = 0.$$
(13)

Пользуясь обозначениями (8)-(10), уравнение (11) можно представить в виде

$$\Phi\left(\mathbf{X}_{Z},\mathbf{U}_{Z}^{0},\mathbf{W}_{Z}^{0}\right)=0.$$
⁽¹⁴⁾

Полученное уравнение (14) является нелинейным векторным уравнением установившегося режима. Как было отмечено, при традиционной постановке задачи расчета установившегося режима ЭЭС искомым вектором является X_Z . Предположим, что векторы U_Z и W_Z получили соответствующие приращения ΔU_Z и ΔW_Z , тогда приращение получит также вектор состояния X_Z на величину ΔX_Z .

В силу этого векторное уравнение (14) примет следующий вид:

$$\Phi \left(X_{Zi} + \Delta X_{Zi}, U_{Zi}^{0} + \Delta U_{Zi}, W_{Zi}^{0} + \Delta W_{Zi} \right) = 0.$$
 (15)

Разлагая (15) в ряд Тейлора вокруг точки решения X_{Zi}^{P} , получим

$$\Phi \left(X_{Z_{i}}^{P} + \Delta X_{Z_{i}}, U_{Z_{i}}^{0} + \Delta U_{Z_{i}}, W_{Z_{i}}^{0} + \Delta W_{Z_{i}} \right) = 0 =$$

$$= \Phi \left(X_{Z_{i}}^{P}, U_{Z_{i}}^{0}, W_{Z_{i}}^{0} \right) + \frac{\partial \Phi}{\partial X_{Z_{i}}} \bigg|_{X_{Z_{i}}^{P}, U_{Z_{i}}^{0}, W_{Z_{i}}^{0}} \Delta X_{Z_{i}} +$$

$$+ \frac{\partial \Phi}{\partial U_{Z_{i}}} \bigg|_{X_{Z_{i}}^{P}, U_{Z_{i}}^{0}, W_{Z_{i}}^{0}} \Delta U_{Z_{i}} + \frac{\partial \Phi}{\partial W_{Z_{i}}} \bigg|_{X_{Z_{i}}^{P}, U_{Z_{i}}^{0}, W_{Z_{i}}^{0}} \Delta W_{Z_{i}} + \Phi_{H3},$$
(16)

где $\, \Phi_{\rm H \Im}\,$ - сумма нелинейных элементов ряда Тейлора.

Пренебрегая $\Phi_{\rm H\! 3}$ и решая (16) относительно $\Delta\,X_{Zi}$, получим

$$\Delta X_{Zi} = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial X_{Zi}}\right)^{-1} \frac{\partial \Phi}{\partial U_{Zi}} \Delta U_{Zi} - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial W_{Zi}}\right)^{-1} \frac{\partial \Phi}{\partial W_{Zi}} \Delta W_{Zi}.$$
 (17)

Если ввести обозначения:

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}_{\mathbf{Z}_{i}} \mathbf{U}_{\mathbf{Z}_{i}}} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{X}_{\mathbf{Z}_{i}}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{U}_{\mathbf{Z}_{i}}}\right), \tag{18}$$

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}_{\mathbf{Z}_{i}} \mathbf{W}_{\mathbf{Z}_{i}}} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{X}_{\mathbf{Z}_{i}}}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{W}_{\mathbf{Z}_{i}}}\right), \tag{19}$$

то выражение (17) примет вид

$$\Delta X_{Z_{i}} = S_{X_{Z_{i}} U_{Z_{i}}} \Delta U_{X_{Z_{i}}} + S_{X_{Z_{i}} W_{Z_{i}}} \Delta W_{Z_{Z_{i}}}.$$
 (20)

Полученное выражение (20) является общим и показывает изменение ΔX_{Zi} при одновременном изменении ΔU_{Zi} и ΔW_{Zi} .

В настоящей работе рассматривается случай, когда приращения получают только элементы возмущения ΔW_{z_i} , при котором выражение (17) принимает вид

$$\Delta X_{Zi} = S_{X_{Zi} U_{Zi}} \Delta W_{Z_{Zi}}.$$
(21)

Анализ выражений (18) и (19) показывает, что первый множитель является матрицей Якоби при решении нелинейного вектора уравнения (14) методом Ньютона-Рафсона или методом первого порядка.

Пользуясь обозначениями (11), рекуррентное выражение для решения систем нелинейных алгебраических уравнений (5)-(7) можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{i} \\ \mathbf{I}''_{i} \end{bmatrix}^{\mathbf{H}+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}'_{i} \\ \mathbf{I}''_{i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial \mathbf{I}'_{j}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \mathbf{I}'_{j}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial \mathbf{I}''_{j}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{pi} \left(\mathbf{I}'_{i}, \mathbf{I}''_{i} \right) \\ \Phi_{qi} \left(\mathbf{I}'_{i}, \mathbf{I}''_{i} \right) \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где

$$\mathbf{i}, \mathbf{j} = (\mathbf{i}_1, \mathbf{j}_1; \mathbf{i}_2, \mathbf{j}_2; \dots; \mathbf{i}_N, \mathbf{j}_N).$$
 (23)

Как видно из (23), рекуррентное выражение, аналогичное (22), можно написать для

всех подсистем рассматриваемой ЭЭС.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби в (22), определяются соответствующими выражениями, приведенными в [3].

Расчет установившегося режима ЭЭС на основании рекуррентных выражений типа (22) отдельных подсистем является необходимым условием его коррекции.

Итерационный процесс расчета установившегося режима считается завершенным, если для отдельных подсистем осуществляется следующее условие:

$$\left|\Phi\left(\mathbf{X}_{Z_{i}}, \mathbf{U}_{Z_{i}}^{0}, \mathbf{W}_{Z_{i}}^{0}\right)\right| \leq \mathbf{\mathcal{E}}_{i}, \qquad (24)$$

где **£** - заданное положительное число, характеризующее точность вычисления численных значений режимных параметров для системы в целом.

В результате расчета установившегося режима ЭЭС определяются окончательные численные значения элементов матриц Якоби для отдельных подсистем.

Для коррекции установившегося режима ЭЭС воспользуемся выражением (21), которое в развернутой форме будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} \Delta I'_{i} \\ \overline{\Delta I''_{i}} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial I'_{j}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I'_{j}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial I''_{j}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial P_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial P_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{pi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial \Phi_{qi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{Hi}}{\partial Q_{Hi}} \\ \frac{\partial P_{Hi$$

Выражение (25) написано для общего случая, когда происходит изменение активных и реактивных мощностей во всех подсистемах.

Рассматривается случай, когда изменение активных параметров происходит только в первой подсистеме.

В той подсистеме, в которой происходит изменение величин активных и реактивных мощостей, необходимо воспользоваться выражением (25), а для остальных подсистем функционирует выражение (22).

В данном случае выражением типа (25) необходимо пользоваться только для первой подсистемы.

Определяя приращение ΔX_{zi} на основании (21), устанавливаем режимные параметры для искомого установившегося режима:

$$X_{Zi}^{H} = X_{Zi}^{\Pi} + \Delta X_{Zi}, \qquad (26)$$

где X^H_{7i}, X^D_{7i} - соответственно новый и действующий векторы состояния.

В развернутой форме (26) можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} I'_i \\ -I''_i \end{bmatrix}^{H} = \begin{bmatrix} I'_i \\ -I''_i \end{bmatrix}^{H} + \begin{bmatrix} I'_i \\ -I''_i \end{bmatrix}.$$
(27)

Имея новые численные значения составляющих комплексных токов первой подсистемы, можно установить $\dot{I}^{\rm H}_{j_1}$ и $U^{\rm H}_{{\rm bi}_1}$, а пользуясь первым уравнением системы (2),

можно определить $\dot{U}_{i_1}^{\mathrm{H}}$.

Устанавливая новое значение $U_{\text{Бi}_2}^{\text{H}}$ и имея \dot{I}_{j_1} , а также пользуясь вторым уравнением системы (2), можно установить численное значение $U_{i_2}^{\text{H}}$ и т.д.; на последнем этапе определяется $U_{i_N}^{\text{H}}$.

Имея $\dot{\mathbf{U}}_{i}^{\mathrm{H}} = (\dot{\mathbf{U}}_{i_{1}}^{\mathrm{H}}, \dot{\mathbf{U}}_{i_{2}}^{\mathrm{H}}, \dots, \dot{\mathbf{U}}_{i_{N}}^{\mathrm{H}})$, нетрудно установить $\dot{\mathbf{I}}_{j}^{\mathrm{H}} = (\dot{\mathbf{I}}_{j_{1}}^{\mathrm{H}}, \dot{\mathbf{I}}_{j_{2}}^{\mathrm{H}}, \dots, \dot{\mathbf{I}}_{j_{N}}^{\mathrm{H}})$.

В результате получается новый скорректированный установившийся режим исследуемой ЭЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Хачатрян В.С.** К методам расчета собственных и взаимных сопротивлений сложных энергосистем // Электричество.- 1964.- № 10.- С.47-51.
- 2. Хачатрян В.С. Метод и алгоритм расчета установившегося режима больших энергосистем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.-1973.-№ 4.- С.45-57.
- Хачатрян В.С. Определение установившихся режимов больших электроэнер-гетических систем с применением метода Ньютона-Рафсона // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.-1974.- № 4.-С.36-43.
- 4. Салливан Р.Р. Проектирование развития электроэнергетических систем.-М.: Энергоиздат, 1982.-357с.
- 5. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Метод коррекции установившихся режимов электрических систем // Электричество.- 1987.- № 3.- С.6-14.
- 6. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество .- 1997.- № 3.-С.6-13.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 07.05.2002.

Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

ԲԱՐԴ ԷԼԿԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱծՎԱԾ ՌԵԺԻՄԻ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱՅԻ ՄԵԹՈԴՈՎ

Առաջարկվում է բարդ էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ռեժիմի Ճշգրտում դիակոպտիկայի մեթոդով։ Դիտարկվում է այն դեպքը, երբ փոփոխվում են միայն գրգռման վեկտորները կամ բեռային հանգույցների ակտիվ և ռեակտիվ հզորությունները։

K.V. KHACHATRYAN

STEADY-STATE CONDITION CORRECTNESS OF COMPLEX POWER SYSTEM BY DIACOPTIC METHOD

A method of steady state condition for complex power system correctness by using the diacoptic method is proposed. A case is considered where only excitation vector components or active and reactive powers of loading nodes are changed.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.314

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.В. БАРЕГАМЯН

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ИНВЕРТОРЕ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ И СИНУСОИДАЛЬНЫМ ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Рассматриваются вопросы расчета потерь мощности в отдельных узлах и КПД инвертора с широтно-импульсной модуляцией и синусоидальным выходным напряжением. Приводятся расчетные выражения для случаев двухуровневой и трехуровневой модуляций. Дается пример расчета.

Ключевые слова: инвертор, широтно-импульсная модуляция, коммутатор, трансформатор, фильтр, потери мощности.

Одним из основных параметров любого электротехнического устройства является его КПД, который определяется правильным решением комплекса вопросов, начиная от выбора оптимальных структурных и схемных решений и кончая оптимизацией характеристик и параметров устройства. Рассчитать, либо оценить КПД важно на ранних стадиях проектирования, когда сравниваются разные варианты и принимаются конечные решения.

В работе рассматривается однофазный стабилизированный мостовой инвертор (рис.), преобразующий входное постоянное напряжение в выходное синусоидальное и работающий посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Расчет токов и напряжений схемы при двухуровневой (ДШИМ) и трехуровневой (ТШИМ) модуляциях проведен в работах [1, 2]. Ниже рассматриваются вопросы расчета потерь мощности в узлах инвертора и оценки его КПД.

Суммарные потери мощности складываются из пяти составляющих:

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_{\Phi,{\scriptscriptstyle \mathrm{B}}{\scriptscriptstyle \mathrm{X}}} + \Delta P_{{\scriptscriptstyle \mathrm{K}}} + \Delta P_{{\scriptscriptstyle \mathrm{T}}{\scriptscriptstyle \mathrm{P}}} + \Delta P_{\Phi,{\scriptscriptstyle \mathrm{B}}{\scriptscriptstyle \mathrm{b}}{\scriptscriptstyle \mathrm{I}}{\scriptscriptstyle \mathrm{X}}} + \Delta P_{{\scriptscriptstyle \mathrm{C}}{\scriptscriptstyle \mathrm{Y}}}$$

представляющих соответственно потери во входном фильтре, коммутаторе, трансформаторе, выходном фильтре и в системе управления (СУ). Выражения для первых четырех компонентов в относительных единицах и при ДШИМ имеют вид

$$\begin{split} \Delta \overline{P}_{\Phi,BX} &= \frac{\overline{r}_{\Phi,BX}}{\eta_{Tp}^2} \left\{ F_1^2 \left[1 - \frac{M^2}{4} \left(1 + \cos 2\alpha \right) \right] + F_4^2 + \right. \\ &+ \frac{8}{\pi\sqrt{3}} F_1 F_3 \left[1 - M^2 \left(1 + \frac{1}{3} \cos 2\alpha \right) + \frac{M^4}{120} \left(45 + 20 \cos 2\alpha - \cos 4\alpha \right) \right] \right\}, \end{split}$$
(1)
$$\Delta \overline{P}_{Tp} &\approx \frac{\sqrt{2}}{M} \left(\frac{1}{\eta_{Tp}} - 1 \right) F_2 \sqrt{F_1^2 + F_4^2}, \quad \Delta \overline{P}_{\Phi,BAX} = \overline{r}_L \left(F_1^2 + F_4^2 \right) + \overline{r}_C \left(\overline{Y}_C^2 + F_4^2 \right), \\ \Delta \overline{P}_K &= \frac{1}{\eta_{Tp}} \left[4 \left(\Delta \overline{U}_{VT} F_6 + \Delta \overline{U}_{VD} F_7 \right) + \frac{\sqrt{2}}{3} \overline{U}_{dHOM} \overline{t}_{K \max} F_1 \right], \end{split}$$

а в случае ТШИМ:

Здесь и далее в выражениях приняты обозначения: Ud - напряжение питания инвертора; $\overline{X}_L = 2\pi f L/Z_H$, $\overline{Y}_C = 2\pi f C Z_H$ - относительные сопротивление дросселя и проводимость конденсатора выходного LC-фильтра на основной (выходной) частоте; $\overline{r}_L = r_L/Z_H$, $\overline{r}_C = r_C/Z_H$ - их эквивалентные последовательные сопротивления; $\overline{r}_{\Phi.Bx} = \overline{r}_{\Phi.Bx} / n^2 Z_H$ - эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора входного фильтра; $\overline{t}_{Kmax} = f_H t_{Kmax}$ - максимальное относительное время переключения вентилей коммутатора; fH - несущая частота ШИМ; η_{TP} - КПД трансформатора; ΔU_{VT} , ΔU_{VD} - прямые падения напряжений на открытом транзисторе и возвратном диоде коммутатора; ZH, φ - сопротивление и угол активно-индуктивной нагрузки; M - максимальная глубина модуляции; α - расчетный угол; n - коэффициент трансформации (при точных расчетах в случае ДШИМ вместо Udmin можно положить Udmin ΔU_{VT} + ΔU_{VD}); F1...F9 - коэффициенты.

Рис.

Выражения для F1...F9, M, αи n имеют вид

$$\begin{split} F_{1} &= \sqrt{1 - 2\overline{Y}_{C} \sin \phi + \overline{Y}_{C}^{2}}, \quad F_{2} &= \sqrt{\left(1 - \overline{X}_{L} \overline{Y}_{C}\right)^{2} - 2\overline{X}_{L} \left(1 - \overline{X}_{L} \overline{Y}_{C}\right) \sin \phi + \overline{X}_{L}^{2}}, \\ F_{3} &= \frac{\pi i F_{2}}{2 f_{H} M \overline{X}_{L}}, \quad F_{4} &= F_{3} \sqrt{\frac{2}{3} \left(1 - M^{2} + \frac{3}{8} M^{4}\right)}, \quad F_{5} &= F_{3} \sqrt{\frac{4}{3}} M^{2} \left(1 - \frac{16}{3\pi} M + \frac{3}{4} M^{2}\right)}, \\ F_{6} &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} F_{I} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi M}{8} \cos \alpha\right) \left[1 + \frac{2 F_{3}^{2}}{F_{1}^{2}} \left(1 - M^{2} \sin^{2} \alpha\right)^{2}\right], \\ F_{7} &= \frac{\sqrt{2}}{\pi} F_{I} \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi M}{8} \cos \alpha\right) \left[1 + \frac{2 F_{3}^{2}}{F_{1}^{2}} \left(1 - M^{2} \sin^{2} \alpha\right)^{2}\right], \\ F_{8} &= \frac{1}{\pi} \left\langle \frac{F_{I}}{4\sqrt{2}} \left\{2 + \left[2 + M (\pi - |\alpha|)\right] \cos \alpha + M \sin |\alpha|\right\} + \frac{M F_{3}}{\sqrt{2}} \left[1 - \frac{2M^{2}}{3} + \left(1 - \frac{3M^{2}}{4}\right) \cos \alpha + \frac{M^{2}}{12} \cos 3\alpha\right] \left\{1 + \frac{2}{3} \left[\frac{F_{3}}{F_{1}} M \sin \alpha (1 - M \sin |\alpha|)\right]^{2}\right\}, \\ F_{9} &= \frac{1}{\pi} \left\langle \frac{F_{I}}{4\sqrt{2}} \left\{6 - \left[2 + M (\pi - |\alpha|)\right] \cos \alpha - M \sin |\alpha|\right\} - \frac{M F_{3}}{\sqrt{2}} \left[1 - \frac{2M^{2}}{3} + \left(1 - \frac{3M^{2}}{4}\right) \cos \alpha + \frac{M^{2}}{12} \cos 3\alpha\right] \left\{1 + \frac{2}{3} \left[\frac{F_{3}}{F_{1}} M \sin \alpha (1 - M \sin |\alpha|)\right]^{2}\right\}, \\ M &= \frac{\sqrt{2} F_{2}}{\overline{U}_{4}}, \quad \alpha = \arctan \left[\frac{\overline{Y}_{C} - \sin \phi - \overline{X}_{L} F_{1}^{2}}{\cos \phi}\right], \quad n \approx \frac{U_{dmin} (1 - 2 \overline{t}_{K max})}{\sqrt{2} U_{H} F_{2} |_{max(cos \phi)}}. \end{split}$$

В (3) относительные величины снабжены верхней чертой, причем в качестве базовых величин для вторичной стороны трансформатора взяты эффективные значения напряжения и тока нагрузки (UH, IH), а для первичной стороны - их приведенные значения (nUH, IH/n).

Формулы (1)-(3) получены путем трехэтапного анализа процессов в схеме инвертора: расчет составляющих токов и напряжений основной (выходной) частоты; интегральная оценка высокочастотных пульсационных составляющих; определение результирующих величин их "наложением". Данный подход является конкретизацией широко известных методов основной гармоники и переключающих функций для инверторов рассматриваемого класса [1, 2]. При анализе используется также математический аппарат "локального усреднения", что в итоге позволяет получать компактные и достаточно точные выражения для рассчитываемых токов и напряжений, а ошибка их расчета обычно не хуже 2...3%.

Потери мощности в СУ в первом приближении можно считать постоянными, т.е. $\Delta \overline{P}_{\rm CY} = {\rm const.}$, а КПД преобразователя определяется в виде

$$\eta_{\rm MHB} = \frac{\left|\cos\varphi\right|}{\left|\cos\varphi\right| + \Delta\overline{P}_{\Pi}}.$$
(4)

По заданным входным и выходным параметрам путем предварительного выбора некоторых промежуточных величин можно по приведенным формулам рассчитать потери мощности и КПД проектируемого инвертора. При этом точность расчета зависит от объема априорной информации: типа применяемых ключевых приборов и конденсаторов, параметров фильтров, трансформаторно-реакторного оборудования и пр. Если такой информации нет, либо она недостаточна, то необходимо их каким-либо образом выбрать.

Расчет проводится в следующей последовательности.

1. Исходными величинами являются входные и выходные параметры для номинального режима: UdHOM, UH, SH, f и cos ф, причем если заданы пределы изменения cos(, то следует расчет проводить для его максимального значения, при котором потери мощности максимальны.

2. Выбирается вид ШИМ и значение fн.

3. Исходя из требуемых коэффициента несинусоидальности выходного напряжения (Кнс) и динамических характеристик, выбираются параметры выходного фильтра \overline{X}_L и \overline{Y}_C . К примеру, при Кнс < 0,05 (5%) они обычно находятся в пределах 0,1...0,2 и 0,2...0,5 соответственно.

4. Исходя из заданных выходных мощности и частоты, ориентировочно выбирается КПД трансформатора п_{тр.} Следует учесть, что типовая мощность трансформатора примерно в 1,5...2 раза больше выходной мощности.

5. Прямые падения напряжения на вентилях в открытом состоянии (Uvt и (Uvd можно выбрать в пределах 0,8...1,5 *В*.

6. Исходя из типа используемых вентилей, предполагаемой схемы снабберов и режимных параметров коммутатора, оценивается tк_{max}, а по ней определяется параметр \bar{t}_{Kmax} . Обычно tк_{max} составляет (0,01...0,1)/fн. К примеру, для инвертора с выходной частотой 50 Гц и несущей частотой в 2 кГц время tк_{max} находится в пределах 5...50 *мкс*.

7. Определяются эквивалентные последовательные сопротивления элементов выходного фильтра: $\bar{r}_{\rm L} \approx (0,01...0,1) \overline{X}_{\rm L}$, $\bar{r}_{\rm C} \approx {\rm tg} \delta/\overline{Y}_{\rm C}$, где tg δ - тангенс угла потерь конденсатора.

8. Оценивается эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора входного фильтра по формуле

$$\bar{\mathbf{r}}_{\Phi_{\rm BX}} \approx \frac{\mathrm{tg}\delta}{(8...25)\pi\mathrm{fCn}^2 \mathrm{Z}_{\mathrm{H}}},\tag{5}$$

где С и tgδ - его емкость и тангенс угла потерь.

9. Рассчитываются потери мощности в отдельных узлах и ориентировочный КПД инвертора.

К примеру, при заданных Ud=60 *B* (54...75 *B*), UH=220 *B*, SH=1 κBA ,f=50 $\Gamma \mu$, cos φ =0,8...1 (индуктивный), если взять $\overline{X}_L = 0,2$, $\overline{Y}_C = 0,5$, $\overline{r}_{\Phi,BX} = 0,02$, $\overline{r}_L = 0,01$, $\overline{r}_C = 0,008$, ΔU_{VT} =1 *B*, ΔU_{VD} =1 *B*, fH=2 $\kappa \Gamma \mu$, η_{TP} =0,95, tkmax=25 *мкс* и ΔP_{CY} =10 *Bt*, суммарные потери при ДШИМ равны 227 *Bt*, так что достижимый КПД составит около 0,815...81,5%). Если при тех же параметрах в инверторе реализована ТШИМ, то суммарные потери равны 148,6 *Bt* (при ΔU_{VT} = ΔU_{VD} =0), а расчетный КПД составит около 0,87 (87%).

Входящие в формулы (1) - (3) функционалы F₁...F₉ зависят от "режимных" параметров схемы \overline{X}_L , \overline{Y}_C , $\cos \varphi$, f, f_H, U_d, U_H и др. Для интегральной оценки влияния их изменения на структуру потерь представим формулы (1) и (2) в обобщенном виде с помощью весовых коэффициентов H₁...H₇:

$$\Delta \overline{P}_{\Phi,BX} = \frac{\overline{r}_{\Phi,BX}}{\eta_{Tp}^2} H_1, \quad \Delta \overline{P}_K = \frac{1}{\eta_{Tp}} \left(\Delta \overline{U}_{VT} H_2 + \Delta \overline{U}_{VD} H_3 + \overline{U}_{dHOM} \overline{t}_{K \max} H_4 \right),$$

$$\Delta \overline{P}_{Tp} = \frac{\left(1 - \eta_{Tp} \right)}{\eta_{Tp}} H_5, \quad \Delta \overline{P}_{\Phi,BMX} = \overline{r}_L H_6 + \overline{r}_C H_7,$$
(6)

где коэффициенты H1...H7, наряду с перечисленными "режимными" параметрами, включают также постоянные величины. Эти коэффициенты достигают наибольших значений при максимальном коэффициенте мощности нагрузки. В таблицу сведены результаты расчетов пределов изменений H1...H7 при обоих видах ШИМ и параметрах $\cos\varphi=1$, fH/f=40. Параметры выходного фильтра изменялись в пределах $\overline{X}_L=0,1...0,2$ и $\overline{Y}_C=0,2...0,5$. Как следует из таблицы, при ДШИМ изменения большинства весовых коэффициентов не превышают 10...30% (H1, H2, H4...H6), а у H3 и H7 они существенно больше. Табличные данные наглядным образом иллюстрируют относительную долю каждого весового коэффициента в образовании общих потерь, указывают разработчику на "слабые" места структуры инвертора, на каких параметрах и насколько можно сэкономить мощность и т.д. По ним можно проводить также оценочные расчеты с использованием усредненных весовых коэффициентов.

Таблица

Вид ШИМ	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
ДШИМ	0,881,23	1,501,65	0,340,41	0,480,53	1,541,64	1,061,32	0,010,10
ТШИМ	0,370,45	1,691,94	0,120,25	0,480,53	1,531,69	1,101,61	0,010,07

Основным режимом работы рассматриваемых преобразователей является инверторный. Однако они способны работать и в выпрямительном режиме (например, в составе агрегатов бесперебойного питания), т.е. в режиме заряда входной аккумуляторной батареи, путем подключения сети к нагрузочным зажимам. При этом приведенные формулы и последовательность расчета остаются в силе, если в них выполнить следующие эквивалентные подстановки. Во-первых, отключением нагрузки сопротивление Zн лишается смысла и может быть формально представлено отношением номинальных значений напряжения и тока сети, (ZH=UCETь/ICETь). Во-вторых, напряжение и ток сети в режиме заряда по фазе практически совпадают, и в формулах следует положить соs ϕ =-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Барегамян Г.В. Автоматизация расчета инверторов с синусоидальным выходным напряжением и двухуровневой широтно-импульсной модуляцией // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2001. Т. 55, №3. С. 450-456.
- 2. Барегамян Г.В. Автоматизация расчета инвертора с трехуровневой ШИМ // Моделирование, оптимизация, управление: Сб. науч. тр. / ГИУА. Ереван. 2001.- Вып.4. С. 98-104.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 25.02.2004.

Գ.Վ. ԲԱՐԵՂԱՄՅԱՆ

ՍԻՆՈՒՍՈԻԴԱՅԻՆ ԵԼՔԱՅԻՆ ԼԱՐՄԱՄԲ ԵՎ ԼԱՅՆԱ-ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՄՈԴՈՒԼԱՑՄԱՄԲ ԻՆՎԵՐՏՈՐՈՒՄ ՀՉՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Դիտարկված են լայնա-իմպուլսային մոդուլացմամբ և սինուսոիդային ելքային լարմամբ ինվերտորի առանձին հանգույցներում հզորության կորուստների և ՕԳԳ-ի հաշվարկման հարցերը։ Երկմակարդակ և եռամակարդակ մոդուլացումների դեպքերի համար բերված են հաշվարկային արտահայտությունները։ Տրված է հաշվարկման օրինակ։

G.V. BAREGHAMYAN

CALCULATION OF THE POWER LOSSES IN THE INVERTER WITH THE PULSE-WIDTH MODULATION AND SINUSOIDAL OUTPUT VOLTAGE

The power loss calculation problems in the separate units and the efficency of the inverter with the pulse-width-modulated (PWM) sinusoidal output voltage are examined. The calculation expressions for the two-and three- level modulation cases are shown. An example of the calculation is presented.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

ረያጉ 621.3

ԷԼԵԿՏՐԱՏԵԽՆԻԿԱ

Վ.Կ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՇԱՐԺԱԿԱՆ ՏԻՐՈՒՅԹՆԵՐՈՒՄ

Օգտվելով օպերացիոն հաշվարկի մեթոդներից, ստացվել են իմպուլսային էլեկտրամագնիսական դաշտի վեկտոր-պոտենցիալի և մնացյալ վեկտորական մեծությունների արտահայտությունները ուղղագիծ հավասարաչափ արագությամբ շարժվող, շարժական մաս ունեցող ոչ ֆեռոմագնիսական հաղորդիչ համակարգի համար։

Առանցքային բառեր. ինդուկցիոն արագացուցիչ, իմպուլսային էլեկտրամագնիսական դաշտ, շարժվող տիրույթ, Հանկելի և Լապլասի ինտեգրալ ձևափոխություններ, դիֆերենցիալ հավասարում։

Գիտության և տեխնիկայի տարբեր ոլորտներում կիրառություն են գտել իմպուլսային էլեկտրամագնիսական արագացուցիչներ, որոնց թվին է պատկանում ինդուկցիոն արագացուցիչը։ Այս տիպի արագացուցչի աշխատանքի սկզբունքը լիցքավորված ունակային կուտակիչի լիցքաթափումն է մի քանի գալարից կազմված անշարժ մագնիսական կոՃի փաթույթների վրա, որի շնորհիվ առաջացած իմպուլսային մագնիսական դաշտը մակածում է մրրկային հոսանքներ՝ շարժմանը ենթակա պինդ հաղորդիչ մարմնում։ Մագնիսական դաշտի և նշված հոսանքի փոխազդեցության արդյունքում առաջանում է իմպուլսային ուժ, որը և արագացնում է շարժական մարմինը։ Որոշ պայմաններում հնարավոր է տվյալ խնդիրը դիտել որպես կենտրոնացված պարամետրերով համակարգ [1,2]։ Այդ դեպքում այն հնարավոր է լուծել էլեկտրական շղթաների մեթոդներով՝ ավելացնելով էլեկտրամեխանիկական ազդեցությունը։ Իրական պայմաններում պետք է հաշվի առնել դաշտի վերջավոր թափանցումը շարժական և անշարժ տիրույթներ։

Աշխատանքում նկարագրված է իմպուլսային ինդուկցիոն արագացուցչի պարզեցված մոդելը և վերլուծական ձևով հաշվարկված է ուղղագիծ հավասարաչափ V արագությամբ շարժվող, շարժական մաս ունեցող համակարգում իմպուլսային էլեկտրամագնիսական դաշտի բաշխումը։

Համակարգը կազմված է անշարժ և շարժական կիսաանվերջ հաղորդիչ ոչ ֆեռոմագնիսական տարածություններից (նկ.), որոնց միջն գոյություն ունի օդային բացակ։ Դա կարող է լինել վերջավոր չափի մեկ գալարանի ինդուկտիվ կոմ (ինդուկտոր), որի վրա լիցքաթափվում է ունակային կուտակիչը։ Որպես շարժական տիրույթ հանդես է եկել այդ դաշտում շարժվող որնէ հաղորդիչ մարմին։ Ընդ որում` փոքր տեղափոխումների դեպքում այդ տիրույթները կարելի է առաջին մոտավորությամբ համարել կիսաանվերջ։ Իմպուլսային էլեկտրամագնիսական դաշտը համարվում է քվազիստացիոնար և գրգռվում է անշարժ տիրույթում, ունի առանցքային սիմետրիա, իսկ շարժական մասը հաստատուն v արագությամբ հեռանում է առաջինի նկատմամբ։ Քանի որ տեղի ունի առանցքային սիմետրիա, ինդիրը դիտարկված է գլանային կոորդինատային համակարգում։ Անշարժ կիսաանվերջ տիրույթը (տես նկ.) սփոված է z = 0 հարթությունից դեպի $-\infty$: Շարժական կիսաանվերջ 3 տիրույթի եզրահարթությունը ժամանակի t = 0 պահին համընկնում է $z = z_0$ տիրույթի հետ և տարածվում է դեպի $+\infty$, 2 օդային բացակն ընկած է այդ երկու տիրույթների միջն։



Նկ. Համակարգի կառուցվածքային պատկերը

Մաքսվելի հավասարումների համակարգը շարժվող տիրույթների համար ունի հետևյալ տեսքը.

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_0 + \vec{v} \times \vec{B}), \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}: \end{cases}$$
(1)

էլեկտրական դաշտի լարվածությունը բաժանված է երեք բաղադրիչների՝ մրրկային, պոտենցիալային և ինդուկցիայով պայմանավորված մասեր (\vec{E}_{q} , \vec{E}_{0} և $\vec{v} \times \vec{B}$)։ Պոտենցիալային դաշտն առաջացնում է արտաքին ազդակը, որն առկա է միայն անշարժ տիրույթում և ոչ մրրկայնության շնորհիվ բաշխված է հավասարաչափ տարածության մեջ (համարվում է տրված) և կախված է միայն ժամանակից՝ $\vec{E}_{0} = E_{\theta}(t)\vec{\theta}$ ։ $E_{\theta}(t)$ -ն անկյունային բաղադրիչն է։

Մագնիսական դաշտի վեկտոր-պոտենցիալը որոշենք հետևյալ կերպ.

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}, \quad \operatorname{div} \vec{A} = 0:$$
 (2)

(1)-ի և (2)-ի համատեղ լուծումից գլանային կոորդինատային համակարգի համար կստանանք (հաշվի առնելով, որ գլանային սիմետրիկ խնդրի համար վեկտորպոտենցիալն ունի միայն մեկ՝ անկյունային կոորդինատ)՝

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial A}{\partial r}\right) - \frac{A}{r^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma\mu_0 \frac{\partial A}{\partial t} - -\sigma\mu_0 v \frac{\partial A}{\partial z} = -\sigma\mu_0 E_0(t): \quad (3)$$

A -ն մագնիսական դաշտի վեկտոր պոտենցիալի անկյունային բաղադրիչն է։

(3)-ի լուծման նախնական պայմանը հետևյալն է.

$$\begin{cases} A(z,r,t) = 0 \implies t = 0, \\ E_0(t) = 0 \implies t = 0 : \end{cases}$$

Եզրային պայմաններն են.

1-ից 2 տիրույթների անցման եզրային հարթության վրա՝
$$\begin{cases} A_1(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t}) = A_2(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t}) \Longrightarrow \mathbf{z} = 0, \\ \frac{\partial A_1(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t})}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial A_2(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t})}{\partial \mathbf{z}} \Longrightarrow \mathbf{z} = 0: \end{cases}$$
(4)

2-ից 3 անցման եզրային հարթության վրա՝

$$\begin{cases} A_{2}(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t}) = A_{3}(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t}) \Longrightarrow \mathbf{z} = \mathbf{z}_{0} + \mathbf{v} \,\mathbf{t}, \\ \frac{\partial A_{2}(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t})}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial A_{3}(\mathbf{z},\mathbf{r},\mathbf{t})}{\partial \mathbf{z}} \Longrightarrow \mathbf{z} = \mathbf{z}_{0} + \mathbf{v} \,\mathbf{t} \,; \end{cases}$$
(5)

(3)-ը երկրորդ կարգի անհամասեռ գծային դիֆերենցիալ հավասարում է՝ մասնակի ածանցյալներով։ Հետևաբար, արտաքին ազդակի ազդեցության հետ կապված հնարավոր է որոշակի պարզեցում մտցնել՝ օգտվելով Գրինի ֆունկցիայից։ Այդ դեպքում արտաքին ազդակը փոխարինվում է Դիրակի դելտա ֆունկցիայով [3]։ Հետևաբար, (3)-ը կձևափոխվի՝

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial G}{\partial r}\right) - \frac{G}{r^{2}} + \frac{\partial^{2}G}{\partial z^{2}} - \sigma\mu_{0}\frac{\partial G}{\partial t} - \sigma\mu_{0}\nu\frac{\partial G}{\partial z} = -\delta: \quad (6)$$

Այդ դեպքում մագնիսական դաշտի վեկտոր-պոտենցիալը կամայական տեսքի արտաքին ազդեցության համար կարելի է որոշել

$$A(z,r,t) = \sigma \mu_0 \int_0^t G(z,r,t) E_0(t) \partial t$$

արտահայտությամբ, որտեղ $\mathbf{G}=\mathbf{G}(\mathbf{z},\mathbf{r},t)$ -ը տվյալ խնդրի համար Գրինի ֆունկցիան է։

Եթե (6)-ի աջ և ձախ մասերի և եզրային պայմանների նկատմամբ կիրառենք նախ Հանկելի և ապա Լապլասի ինտեգրալ ձևափոխությունները [4],

$$\begin{aligned} \overline{\Phi}(z,\lambda,t) &= \int_{0}^{\infty} \Phi(z,r,t) J_{1}(\lambda r) r \partial r, \\ \overline{\overline{\Phi}}(z,\lambda,\rho) &= \int_{0}^{\infty} \overline{\Phi}(z,\lambda,t) \exp(-\rho t) \partial t, \end{aligned}$$

(3)-ը կձևափոխվի հետևալ տեսքի.

$$\frac{d^{2} \overline{\overline{G}}(\lambda,\rho,z)}{dz^{2}} + (-\mu_{0}\sigma v)\frac{d\overline{\overline{G}}(\lambda,\rho,z)}{dz} + (-\lambda^{2} - \mu_{0}\sigma \rho)\overline{\overline{G}}(\lambda,\rho,z) = -\overline{\overline{\delta}},$$
(7)

npտեղ $\overline{\overline{G}}(\lambda,\rho,z)$ -ն երկակի ձևափոխված Գրինի ֆունկցիան է (արտապատկերը), λ -ն և ρ -ն ձևափոխությունների պարամետրերը, $J_1(\lambda r)$ -ը՝ առաջին կարգի Բեսսելի ֆունկցիան։

Դելտա ֆունկցիայի պատկերը կլինի՝

$$\overline{\overline{\delta}} = 0.5 \int_{0}^{\infty} J_{1}(\lambda r) r \, \partial r = I_{1}(\lambda) :$$

Եզրային պայմանների համար կստանանք.

$$\overline{\overline{G}}_{1}(\lambda,\rho,0) = \overline{\overline{G}}_{2}(\lambda,\rho,0), \ \overline{\overline{G}}_{2}\left(\lambda,\rho,\frac{z_{0}}{\rho}+\frac{v}{\rho^{2}}\right) = \overline{\overline{G}}_{3}\left(\lambda,\rho,\frac{z_{0}}{\rho}+\frac{v}{\rho^{2}}\right),$$

$$\left(\frac{d\overline{\overline{G}}_{1}(\lambda,\rho,z)}{dz}\right)_{0} = \left(\frac{d\overline{\overline{G}}_{2}(\lambda,\rho,z)}{dz}\right)_{0}, \qquad (8)$$

$$\left(\frac{d\overline{\overline{G}}_{1}(\lambda,\rho,z)}{dz}\right)_{\frac{z_{0}}{\rho}+\frac{v}{\rho^{2}}} = \left(\frac{d\overline{\overline{G}}_{2}(\lambda,\rho,z)}{dz}\right)_{\frac{z_{0}}{\rho}+\frac{v}{\rho^{2}}t}:$$

Մասնակի ածանցյալներով գծային անհամասեռ դիֆերենցիալ (6) հավասարումը երկակի ձևափոխությունների շնորհիվ բերվեց երկրորդ կարգի մեկ փոփոխականի անհամասեռ դիֆերենցիալ (7) հավասարման, երկակի ձևափոխված Գրինի ֆունկցիայի նկատմամբ, որի լուծման մեթոդները հայտնի են [3].

$$\begin{cases} \overline{\overline{G}}_{1}(\lambda,\rho,z) = \frac{I_{1}(\lambda)}{\lambda^{2} + \mu_{0}\sigma\rho} + M_{1}^{1}\exp(\Phi_{1}^{1}z), \\ z \Rightarrow 0 \to -\infty, \\ \overline{\overline{G}}_{2}(\lambda,\rho,z) = M_{1}^{2}\exp(\Phi_{1}^{2}z) + M_{2}^{2}\exp(-\Phi_{1}^{2}z), \\ z \Rightarrow 0 \to \frac{Z_{0}}{\rho} + \frac{V}{\rho^{2}}, \\ \overline{\overline{G}}_{3}(\lambda,\rho,z) = M_{2}^{3}\exp(\Phi_{2}^{3}z), \\ z \Rightarrow \frac{Z_{0}}{\rho} + \frac{V}{\rho^{2}} \to +\infty : \end{cases}$$

$$(9)$$

Ինտեգրման հաստատունները $(M_1^1, M_1^2, M_2^2, M_2^3)$ հնարավոր է որոշել եզրային պայմաններից։ (8)-ից և (9)-ից հետևում է.

$$\begin{cases} M_{1}^{1} = \frac{I_{1}(\lambda)\lambda\left(\lambda - \frac{\eta^{2}}{50\nu}\right)}{\Gamma\eta} - \frac{I_{1}(\lambda)\lambda\left(\lambda + \frac{\eta^{2}}{50\nu}\right)\exp\left(2\lambda\left(\frac{z_{0}}{\rho} + \frac{\nu}{\rho^{2}}\right)\right)}{\Gamma\eta},\\ M_{1}^{2} = \frac{I_{1}(\lambda)\left(\lambda - \frac{\eta^{2}}{50\nu}\right)}{\Gamma},\\ M_{2}^{2} = \frac{I_{1}(\lambda)\left(\lambda + \frac{\eta^{2}}{50\nu}\right)\exp\left(2\lambda\left(\frac{z_{0}}{\rho} + \frac{\nu}{\rho^{2}}\right)\right)}{\Gamma},\\ M_{2}^{3} = \frac{2I_{1}(\lambda)\lambda\exp\left(\left(\lambda + \frac{\eta^{2}}{50\nu}\right)\left(\frac{z_{0}}{\rho} + \frac{\nu}{\rho^{2}}\right)\right)}{\Gamma}, \end{cases}$$

որտեղ

$$\begin{split} \Gamma(\lambda,\eta,\rho) &= \eta \left(\left(\eta + \lambda\right) \left(\lambda + \frac{\eta^2}{50 \nu}\right) \exp \left(2 \lambda \left(\frac{z_0}{\rho} + \frac{\nu}{\rho^2}\right)\right) - \\ &- \left(\lambda - \frac{\eta^2}{50 \nu}\right) (\lambda - \eta) \right), \\ &\eta &= \sqrt{\lambda^2 + \mu_0 \sigma \rho} \approx \sqrt{\lambda^2 + 50 \rho}, \\ &\Phi_1^1 &= \eta \quad \Phi_1^2 = \lambda \quad \Phi_2^3 \approx -\frac{\eta^2}{50 \nu} : \end{split}$$

Վեկտոր-պոտենցիալի ձևափոխված (9) արտահայտությունից իրական (օրիգինալ) արժեքին անցնելու համար պետք է կիրառել Հանկելի և Լապլասի հակադարձ ձևափոխությունները [4].

$$\begin{cases} \overline{\Phi}(z,r,\rho) = \int_{0}^{+\infty} \overline{\overline{\Phi}}(z,\lambda,\rho) J_{1}(\lambda r) \lambda \partial \lambda, \\ \Phi(z,r,t) = \int_{0}^{+\infty} \overline{\Phi}(z,r,\rho) \exp(\rho t) \partial \rho : \end{cases}$$
(10)

Հաշվի առնելով Խեվիսանդրի [3] ֆունկցիան՝ $\vartheta(z)$ -ն, կարելի է ստանալ մագնիսական դաշտի վեկտոր-պոտենցիալի արտահայտությունը։ Այդ դեպքում առաջին տիրույթի համար ունենք.

$$A_{1}(\mathbf{r},\mathbf{t},\mathbf{z}) = \sigma \mu_{0} \int_{0}^{t+\infty+\infty} \int_{0}^{0} \vartheta(-\mathbf{z}) \left(\frac{\mathbf{I}_{1}(\lambda)}{\eta^{2}} + \left(\frac{\mathbf{I}_{1}(\lambda)\lambda\left(\lambda - \frac{\eta^{2}}{50\nu}\right)}{\Gamma\eta} - \frac{\mathbf{I}_{1}(\lambda)\lambda\left(\lambda + \frac{\eta^{2}}{50\nu}\right)\exp\left(2\lambda\left(\frac{\mathbf{z}_{0}}{\rho} + \frac{\nu}{\rho^{2}}\right)\right)}{\Gamma\eta}\right) \times$$

 $\times \exp(\eta z) J_{1}(\lambda r) \lambda \exp(\rho t) E_{0}(t) \partial \lambda \partial \rho \partial t,$

երկրորդ տիրույթի համար`

$$A_{2}(\mathbf{r},\mathbf{t},\mathbf{z}) = \sigma \mu_{0} \int_{0}^{t} \int_{0}^{t \to \infty} \left(\vartheta(\mathbf{z}) - \vartheta\left(\mathbf{z} - \left(\frac{\mathbf{z}_{0}}{\rho} + \frac{\mathbf{v}}{\rho^{2}}\right)\right) \right) \times \left(\frac{\mathbf{I}_{1}(\lambda)\left(\lambda - \frac{\eta^{2}}{50\,\mathbf{v}}\right)}{\Gamma} \exp(\lambda \mathbf{z}) + \frac{\mathbf{I}_{1}(\lambda)\left(\lambda + \frac{\eta^{2}}{50\,\mathbf{v}}\right)\exp(2\lambda\left(\frac{\mathbf{z}_{0}}{\rho} + \frac{\mathbf{v}}{\rho^{2}}\right))}{\Gamma} \exp(-\lambda \mathbf{z}) \times \left(\frac{\Gamma}{\rho}\right) + \frac{\Gamma}{\Gamma}$$

$$\times J_{1}(\lambda r)\lambda \exp(\rho t)E_{0}(t)\partial t\partial \lambda \partial \rho,$$

և երրորդ տիրույթի համար`

$$A_{3}(\mathbf{r},\mathbf{t},\mathbf{z}) = \sigma \mu_{0} \int_{0}^{t + \infty + \infty} \vartheta \left(\mathbf{z} - \left(\frac{\mathbf{z}_{0}}{\rho} + \frac{\mathbf{v}}{\rho^{2}} \right) \right) \times \frac{2 \mathbf{I}_{1}(\lambda) \lambda \exp \left(\left(\lambda + \frac{\eta^{2}}{50 \mathbf{v}} \right) \left(\frac{\mathbf{z}_{0}}{\rho} + \frac{\mathbf{v}}{\rho^{2}} \right) \right)}{\Gamma} \times \frac{1}{\Gamma} \times \exp \left(-\frac{\eta^{2}}{50 \mathbf{v}} \mathbf{z} \right) \mathbf{J}_{1}(\lambda \mathbf{r}) \lambda \exp(\rho t) \mathbf{E}_{0}(t) \partial t \partial \lambda \partial \rho :$$

Ունենալով մագնիսական դաշտի վեկտոր-պոտենցիալի արտահայտությունը` հնարավոր է հաշվարկել էլեկտրամագնիսական դաշտը բնութագրող մնացյալ վեկտորական մեծությունները.

$$\begin{cases} \vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad \vec{E}_{u} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad \vec{E}_{h} = \vec{v} \times \vec{B}, \\ \vec{j} = \sigma(\vec{E}_{u} + \vec{E}_{0} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad \vec{E} = \vec{E}_{u} + \vec{E}_{0} + \vec{v} \times \vec{B} : \end{cases}$$

Վեկտոր-պոտեցիալի վերջնական ինտեգրալ արտահայտությունները հնարավոր է համակարգչի միջոցով հաշվարկել՝ Matlab, Maple, Mathcad և այլ համակարգերում։

ԳՐԱԿԱՆՈԻԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. **Мирзабекян Ж.М., Казарян В.К.** Электромагнитный импульсный ускоритель для передачи ускорения твердым немагнитным телам // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.-Т.56, №2. С. 293-300.
- 2. Андреев А.Н. Индукционное ускорение и высокоскоростной привод // Электричество. М., 1973.-№10.- С. 45-48.
- 3. Зельдович Я.Б. Элементы прикладной математики. –М.: Наука, 1967. –541 с.
- 4. **Волков И.К.** Интегральные преобразования и операционное исчисление. М.:МГТУ им. Баумана, 1999. –224 с.
- ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.02.2004։

В.К. КАЗАРЯН

РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ

Применением методов операционных исчислений получено значение векторапотенциала импульсного электромагнитного поля для неферромагнитных систем, имеющих равномерно прямолинейную движущуюся часть.

V.K. GAZARYAN

CALCULATION OF PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD FOR A MOTIONED ENVIRONMENT

By using the methods of operation calculation an expression of potential vector of pulsed electromagnetic field for nonferromagnetic system with uniform straight-line motioned part is obtained.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621-52+511.92

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

С.О. СИМОНЯН, А.Г. АВЕТИСЯН, А.В. МЕЛИКЯН

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО–ТЕЙЛОРОВСКИЙ АНАЛОГ МЕТОДА ЖИРАРА–ВИЕТА

Предложен численный метод параллельного определения всех корней алгебраических многочленов с переменными коэффициентами на основе использования дифференциальнотейлоровских преобразований.

Ключевые слова: алгебраические многочлены с переменными коэффициентами, корни, соотношения Жирара-Виета, дифференциально-тейлоровские преобразования.

Введение. Дифференциально-тейлоровские преобразования [1] имеют вид

$$X(K) = \frac{H^{k}}{K!} \cdot \frac{\partial^{K} x(t)}{\partial t^{k}}_{|t=tv}, \quad K = \overline{\underline{0}}, \infty \quad x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t-t_{v}}{H}\right)^{k} X(K), \quad (1)$$

где X(K) - изображение (дискрета) оригинала X(t) - функция целочисленного аргумента $K = \overline{0, \infty}$; H - некоторая постоянная (масштабный коэффициент); $t_v \neq 0$ - центр аппроксимации.

При $t_v = 0$ ДТ-преобразования (1) вырождаются в дифференциальномаклореновские (ДМ) преобразования:

$$X(K) = \frac{H^{k}}{K!} \cdot \frac{\partial^{K} x(t)}{\partial t^{k}}_{|t=0}, \quad K \overline{\underline{\mathbf{z}}} \overline{\mathbf{0}}, \quad x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^{k} X(K). \quad (2)$$

Математический аппарат. Рассмотрим применение этих преобразований для параллельного определения всех корней алгебраических многочленов с переменными коэффициентами.

Допустим, имеем полином

$$P(\lambda(t)) = p_0(t)\lambda^n(t) + p_1(t)\lambda^{n-1}(t) + \dots + p_{n-1}(t)\lambda(t) + p_n(t) = 0 \quad (3)$$

с бесконечно гладкими по аргументу t переменными коэффициентами $p_i(t)$, i = 0, n, имеющий корни $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, n}$. Известно, что для каждого полинома порядка n имеют место следующие соотношения Жирара-Виета [2]:

$$\begin{cases} \lambda_{1}(t) + \lambda_{2}(t) + \dots + \lambda_{n}(t) = -\frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}, \\ \lambda_{1}(t) \cdot \lambda_{2}(t) + \lambda_{1}(t) \cdot \lambda_{3}(t) + \dots + \lambda_{n-1}(t) \cdot \lambda_{n}(t) = \frac{p_{2}(t)}{p_{0}(t)}, \\ \dots \\ \lambda_{1}(t) \cdot \lambda_{2}(t) \cdot \dots \cdot \lambda_{n}(t) = (-1)^{n} \cdot \frac{p_{n}(t)}{p_{0}(t)}. \end{cases}$$
(4)

Нетрудно убедиться, что матрично-векторное представление этой симметричной системы имеет вид



$$\begin{pmatrix} \lambda_{1}(t) \\ \lambda_{2}(t) \\ \dots \\ \lambda_{m}(t) \\ \dots \\ \lambda_{n}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (-1)^{1} \cdot 1 \cdot \frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)} \\ (-1)^{2} \cdot 2 \cdot \frac{p_{2}(t)}{p_{0}(t)} \\ \dots \\ (-1)^{n} \cdot m \cdot \frac{p_{m}(t)}{p_{0}(t)} \\ \dots \\ (-1)^{n} \cdot m \cdot \frac{p_{n}(t)}{p_{0}(t)} \end{pmatrix}$$
(5)

С другой стороны, при $t = t_v$ из системы (5) имеем

$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq l}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq m}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq m}} \lambda_i(0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{\substack{i, j, \dots, k \in I, n \\ i \neq j \neq \dots, \neq k \\ i, j, \dots, k \neq l}} \lambda_i(0) \cdot \lambda_j(0) \cdot & \dots & \sum_{\substack{i, j, \dots, k \in I, n \\ i \neq j \neq \dots, \neq k \\ i, j, \dots, k \neq l}} \lambda_i(0) \cdot \lambda_k(0) & \dots & \sum_{\substack{i, j, \dots, k \in I, n \\ i \neq j \neq \dots, \neq k \\ i, j, \dots, k \neq n}} \lambda_k(0) & \dots & \sum_{\substack{i, j, \dots, k \in I, n \\ i \neq j \neq \dots, \neq k \\ i, j, \dots, k \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq j \neq \dots, \neq k \\ i, j, \dots, k \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \prod_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \\ = \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}} \lambda_i(0) & \dots & \sum_{\substack{i \in I, n \\ i \neq n}}$$

$$\begin{pmatrix} \lambda_{1}(0) \\ \lambda_{2}(0) \\ \dots \\ \lambda_{m}(0) \\ \dots \\ \lambda_{n}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (-1)^{1} \cdot 1 \cdot \frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)} \\ (-1)^{2} \cdot 2 \cdot \frac{p_{2}(t)}{p_{0}(t)} \\ \dots \\ (-1)^{2} \cdot 2 \cdot \frac{p_{2}(t)}{p_{0}(t)} \\ \dots \\ (-1)^{m} \cdot m \cdot \frac{p_{m}(t)}{p_{0}(t)} \\ \dots \\ (-1)^{n} \cdot n \cdot \frac{p_{n}(t)}{p_{0}(t)} \end{pmatrix}_{|t=t_{v}}$$
(6)

или, в компактной записи,

$$\Lambda(\lambda(0)) \cdot \lambda(0) = \left((-1)^{1} \cdot 1 \cdot \frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}, \dots, (-1)^{n} \cdot n \cdot \frac{p_{n}(t)}{p_{0}(t)} \right)_{|t=t_{v}}^{T}, \quad (7)$$

где $\lambda(0) = (\lambda_1(0), \dots, \lambda_n(0))^T$ - п-мерный вектор начальных дискрет, а $\Lambda(\lambda(0))$ - функциональная матрица порядка п.

Формальное рекуррентно-аналитическое решение системы (7) имеет вид:

если rang $\Lambda(\lambda(0)_p) = n$, то

$$\lambda(0)_{p+1} = \Lambda^{-1} \left(\lambda(0)_{p} \right) \cdot \left(\left(-1 \right)^{1} \cdot 1 \cdot \frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}, \dots \left(-1 \right)^{n} \cdot n \cdot \frac{p_{n}(t)}{p_{0}(t)} \right)_{|t=t_{v}}^{T}, \quad (8)$$

если rang $\Lambda(\lambda(0)_p) < n$, то

$$\lambda(0)_{p+1} = \Lambda^{+} \left(\lambda(0)_{p} \right) \cdot \left(\left(-1 \right)^{1} \cdot 1 \cdot \frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}, \dots \left(-1 \right)^{n} \cdot n \cdot \frac{p_{n}(t)}{p_{0}(t)} \right)_{|t=t_{v}}^{1}, \quad (9)$$

где p – номер итераций (заметим, что для решения нелинейной системы (7) могут быть использованы также численные методы нелинейной алгебры).

Имея значения векторов начальных дискрет $\lambda(0)$ (заметим, что из-за нелинейности системы (6) (или (7)), в общем случае, она может иметь несколько решений (см. пример 1)), систему (7) переведем из области оригиналов $\lambda(t)$ в область ДТ-изображений $\lambda(K)$, $K = \overline{1, \infty}$ при центре аппроксимации $t = t_v$. Имеем следующую систему:

$$\Lambda(\lambda(0)) \cdot \lambda(K) + \Lambda(\lambda(0), \dots, \lambda(K)) \cdot \lambda(0) = -\sum_{m=1}^{K-1} \Lambda(\lambda(m)) \cdot \lambda(K-m) + \frac{H^{K}}{K!} \cdot \left(\frac{\partial^{K}}{\partial t^{K}} \left((-1)^{1} \cdot 1 \cdot \frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}\right), \dots, \frac{\partial^{K}}{\partial t^{K}} \left((-1)^{n} \cdot n \cdot \frac{p_{n}(t)}{p_{0}(t)}\right)\right)_{|t=t_{v}}^{T}, K = \overline{1, \infty}, \quad (10)$$

где $\Lambda(\lambda(0))$, $\Lambda(\lambda(0), \dots, \lambda(K))$, $\Lambda(\lambda(m))$ – матрицы начальных, m-ых $(m = \overline{0, K})$ и m-ых $(m = \overline{1, K - 1})$ дискрет порядка n, порожденных матрицей системы (5), а $\lambda(K) = (\lambda_1(K), \dots, \lambda_n(K))^T$, $\lambda(K-m) = (\lambda_1(K-m), \dots, \lambda_n(K-m))^T$ -векторы K-ых и (K-m)-ых дискрет с размерами $n \times 1$.

Раскрыв систему (10) и суммируя подобные члены, содержащие компоненты $\lambda_i(0)$, $i = \overline{1,n}$ вектора $\lambda(0)$, убеждаемся, что она может быть представлена в виде следующей, линейной относительно вектора дискрет $\lambda(K)$ алгебраической системы уравнений:

$$\begin{split} \Lambda(\lambda(0)) \cdot \lambda(\mathbf{K}) &= -\left(1^{-1}, 2^{-1}, 3^{-1}, \cdots, n^{-1}\right)^{\mathrm{T}} \circ \\ \circ \left[\sum_{m=1}^{K-1} \Lambda(\lambda(m)) \cdot \lambda(\mathbf{K} - m) + F(\lambda(0), \lambda(1), \cdots, \lambda(\mathbf{K} - m))\right] + \\ &+ \frac{\mathrm{H}^{\mathrm{K}}}{\mathrm{K}!} \cdot \left((-1)^{\mathrm{I}} \cdot \frac{\partial^{\mathrm{K}}}{\partial t^{\mathrm{K}}} \left(\frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}\right), \cdots, (-1)^{\mathrm{n}} \cdot \frac{\partial^{\mathrm{K}}}{\partial t^{\mathrm{K}}} \left(\frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}\right)\right)_{|t=t_{v}}^{\mathrm{T}}, \end{split}$$
(11)

где знак \circ указывает на прямое (покомпонентное) произведение двух п-мерных векторовстолбцов [1], а $F(\lambda(0), \lambda(1), \dots, \lambda(K-m))$ - п-мерный вектор, порожденный от произведения $\Lambda(\lambda(0), \dots, \lambda(K)) \cdot \lambda(0)$. Отсюда рекуррентно можно вычислить все дискреты $\lambda(K)$, $K = \overline{1, \infty}$, начиная с начального вектора дискрет $\lambda(0)$. В соответствии с (11) будем иметь

$$\begin{split} \lambda(\mathbf{K}) &= -\Lambda^{-1}(\lambda(0)) \cdot \left(\mathbf{1}^{-1}, 2^{-1}, 3^{-1}, \cdots, \mathbf{n}^{-1}\right)^{\mathrm{T}} \circ \\ & \circ \left[\sum_{m=1}^{K-1} \Lambda(\lambda(m)) \cdot \lambda(\mathbf{K} - \mathbf{m}) + F(\lambda(0), \lambda(1), \cdots, \lambda(\mathbf{K} - \mathbf{m}))\right] + \\ & + \frac{\mathbf{H}^{\mathrm{K}}}{\mathrm{K}!} \cdot \left((-1)^{1} \cdot \frac{\partial^{\mathrm{K}}}{\partial t^{\mathrm{K}}} \left(\frac{\mathbf{p}_{1}(t)}{\mathbf{p}_{0}(t)}\right), \cdots, (-1)^{\mathrm{n}} \cdot \frac{\partial^{\mathrm{K}}}{\partial t^{\mathrm{K}}} \left(\frac{\mathbf{p}_{1}(t)}{\mathbf{p}_{0}(t)}\right)\right)_{|t=t_{v}}^{\mathrm{T}}, \quad (12)$$

если rang $\Lambda(\lambda(0)_p) = n$,

$$\begin{split} \lambda(\mathbf{K}) &= -\Lambda^{+}(\lambda(0)) \cdot \left(\mathbf{1}^{-1}, 2^{-1}, 3^{-1}, \cdots, \mathbf{n}^{-1}\right)^{\mathrm{T}} \circ \\ & \circ \left[\sum_{m=1}^{K-1} \Lambda(\lambda(m)) \cdot \lambda(\mathbf{K} - \mathbf{m}) + F(\lambda(0), \lambda(1), \cdots, \lambda(\mathbf{K} - \mathbf{m}))\right] + \\ & \quad + \frac{\mathbf{H}^{\mathrm{K}}}{\mathrm{K}!} \cdot \left(\left(-1\right)^{1} \cdot \frac{\partial^{\mathrm{K}}}{\partial t^{\mathrm{K}}} \left(\frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}\right), \cdots, \left(-1\right)^{\mathrm{n}} \cdot \frac{\partial^{\mathrm{K}}}{\partial t^{\mathrm{K}}} \left(\frac{p_{1}(t)}{p_{0}(t)}\right)\right)_{|t=t_{v}}^{\mathrm{T}}, \quad (13) \end{split}$$

если rang $\Lambda(\lambda(0)_p) < n.$

Ввиду того, что обычная обратная матрица является частным случаем псевдообратной матрицы (при квадратных полноранговых матрицах), в дальнейших выкладках можно ограничиться лишь вычислительной схемой (13).

Исходя из практических соображений, представим также матрицы $\Lambda(\lambda(0))$ и $\Lambda^{-1}(\lambda(0))$ для n=2,3,4. Нетрудно убедиться, что:

при n=2:

$$\Lambda(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_2(0) & \lambda_1(0) \end{bmatrix}, \ \Lambda^{-1}(\lambda(0)) = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1(0) & -1 \\ -\lambda_2(0) & 1 \end{bmatrix},$$
$$\Delta = \lambda_1(0) - \lambda_2(0);$$

при n=3:

$$\Lambda(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ (\lambda_2(0) + \lambda_3(0)) & (\lambda_1(0) + \lambda_3(0)) & (\lambda_1(0) + \lambda_2(0)) \\ (\lambda_2(0) \cdot \lambda_3(0)) & (\lambda_1(0) \cdot \lambda_3(0)) & (\lambda_1(0) \cdot \lambda_2(0)) \end{bmatrix},$$

$$\begin{split} \Lambda^{-1}(\lambda(0)) &= \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} (\lambda_2(0) - \lambda_3(0)) & 0 & 0 \\ 0 & (\lambda_3(0) - \lambda_1(0)) & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda_1(0) - \lambda_2(0)) \end{bmatrix} \\ & \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1^2(0) & -\lambda_1(0) & 1 \\ \lambda_2^2(0) & -\lambda_2(0) & 1 \\ \lambda_3^2(0) & -\lambda_3(0) & 1 \end{bmatrix}, \\ \Delta &= \lambda_1^2(0) \cdot (\lambda_2(0) - \lambda_3(0)) + \lambda_2^2(0) \cdot (\lambda_3(0) - \lambda_1(0)) + \lambda_3^2(0) \cdot (\lambda_1(0) - \lambda_2(0)); \end{split}$$

при n=4:

$$\Lambda(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \lambda_{2}(0) + \\ +\lambda_{3}(0) + \\ +\lambda_{4}(0) & \lambda_{1}(0) + \\ +\lambda_{2}(0) + \\ +\lambda_{3}(0) + \\ +\lambda_{2}(0) + \\ +\lambda_{2}(0) + \\ +\lambda_{1}(0) + \\ +\lambda_{1}(0) + \\ +\lambda_{3}(0) + \\ +\lambda_{3}(0)$$

$$\Lambda^{-1}(\lambda(0)) = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1^3(0) & -\lambda_1^2(0) & \lambda_1(0) & -1 \\ \lambda_2^3(0) & -\lambda_2^2(0) & \lambda_2(0) & -1 \\ \lambda_3^3(0) & -\lambda_3^2(0) & \lambda_3(0) & -1 \\ \lambda_4^3(0) & -\lambda_4^2(0) & \lambda_4(0) & -1 \end{bmatrix},$$

 $\Delta = \lambda_1^3(0) \cdot \mathbf{a} + \lambda_2^3(0) \cdot \mathbf{b} + \lambda_3^3(0) \cdot \mathbf{c} + \lambda_4^3(0) \cdot \mathbf{d},$

где

$$\begin{split} \mathbf{a} &= \lambda_2^2(0) \cdot (\lambda_3(0) - \lambda_4(0)) + \lambda_3^2(0) \cdot (\lambda_4(0) - \lambda_2(0)) + \lambda_4^2(0) \cdot (\lambda_2(0) - \lambda_3(0)), \\ \mathbf{b} &= \lambda_1^2(0) \cdot (\lambda_4(0) - \lambda_3(0)) + \lambda_3^2(0) \cdot (\lambda_1(0) - \lambda_4(0)) + \lambda_4^2(0) \cdot (\lambda_3(0) - \lambda_1(0)), \\ \mathbf{c} &= \lambda_1^2(0) \cdot (\lambda_2(0) - \lambda_4(0)) + \lambda_2^2(0) \cdot (\lambda_4(0) - \lambda_1(0)) + \lambda_4^2(0) \cdot (\lambda_1(0) - \lambda_2(0)), \\ \mathbf{d} &= \lambda_1^2(0) \cdot (\lambda_3(0) - \lambda_2(0)) + \lambda_2^2(0) \cdot (\lambda_1(0) - \lambda_3(0)) + \lambda_3^2(0) \cdot (\lambda_2(0) - \lambda_1(0)). \end{split}$$

После вычисления дискрет $\lambda_i(K)$, $K = \overline{0, \infty}$, $\forall i = \overline{1, n}$ оригиналы-корни $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ восстанавливаются в соответствии с разложениями

$$\lambda_{i}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t - t_{\nu}}{H}\right)^{k} \lambda_{i}(K), \quad \forall i = \overline{1, n}.$$
(14)

<u>Пример 1</u> (матрица с отличными друг от друга собственными значениями при действительных начальных дискретах). Рассмотрим матрицу [3]

$$\mathbf{A}(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} 1+\mathbf{t} & 1-\mathbf{t} \\ -\mathbf{t} & \mathbf{t}^2 \end{bmatrix},$$

для которой

$$\begin{split} P(t) &= \lambda^2(t) - (1+t+t^2)\lambda(t) + t(1+t^2) = 0 \,, \\ p_0(t) &= 1, \qquad p_1(t) = -1 - t - t^2 \,, \qquad p_2(t) = t + t^3 \,. \\ \text{Очевидно, что } \lambda_1(t) = 1 + t^2 \,, \qquad \lambda_2(t) = t \,. \end{split}$$

Примем центр аппроксимации $t_v = 0$, т.е. воспользуемся дифференциальномаклореновскими преобразованиями (2). Тогда: при K = 0:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_2(0) & \lambda_1(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(0) \\ \lambda_2(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

откуда имеем следующие два решения:

a)
$$\lambda_1(0) = 0$$
, $\lambda_2(0) = 1$, $\Lambda(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $\Lambda^{-1}(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$;
6) $\lambda_1(0) = 1$, $\lambda_2(0) = 0$, $\Lambda(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\Lambda^{-1}(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Для случая а) получим:

при
$$K = 1$$
:
 $\begin{cases} \lambda_1(1) + \lambda_2(1) = 1 \cdot H, \\ \lambda_1(1) = 1 \cdot H, \end{cases}$

откуда $\lambda_1(1)=1\cdot H,\qquad \lambda_2(1)=0\,;$ при K=2:

$$\begin{cases} \lambda_1(2) + \lambda_2(2) = 1 \cdot H^2, \\ \lambda_1(2) = 0, \end{cases}$$
откуда $\lambda_1(2) = 0, \quad \lambda_2(2) = 1 \cdot H^2;$ при K = 3:
$$\begin{cases} \lambda_1(3) + \lambda_2(3) = 0, \\ \lambda_1(3) = 0, \end{cases}$$

откуда $\lambda_1(3) = 0, \quad \lambda_2(3) = 0.$

Можно убедиться, что $\forall K \geq 4\,$ дискреты $\,\lambda_1(K)=0,\,\,\lambda_2(K)=0\,.$ Таким образом, окончательно имеем

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = 0 + 1 \cdot t + 0 \cdot t^2 + 0 \cdot t^3 = t, \\ \lambda_2(t) = 1 + 0 \cdot t + 1 \cdot t^2 + 0 \cdot t^3 = 1 + t^2, \end{cases}$$

что полностью совпадает с точными результатами, полученными в [3].

Для случая б) соответственно имеем:

при K = 1: $\begin{cases} \lambda_1(1) + \lambda_2(1) = 1 \cdot H, \\ \lambda_2(1) = 1 \cdot H, \end{cases}$

откуда $\lambda_1(1) = 0, \quad \lambda_2(1) = 1 \cdot H;$ при K = 2: $\begin{cases} \lambda_1(2) + \lambda_2(2) = 1 \cdot H^2, \\ \lambda_2(2) = 0, \end{cases}$

откуда $\lambda_1(2) = 1 \cdot H^2$, $\lambda_2(2) = 0$; при K = 3:

$$\begin{cases} \lambda_1(3) + \lambda_2(3) = 0, \\ \lambda_1(3) = 0, \end{cases}$$

откуда $\lambda_1(3) = 0$, $\lambda_2(3) = 0$.

В этом случае также $\forall K \ge 4$ дискреты $\lambda_1(K) = 0$, $\lambda_2(K) = 0$.

Поэтому

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = 1 + 0 \cdot t + 1 \cdot t^2 + 0 \cdot t^3 = 1 + t^2, \\ \lambda_2(t) = 0 + 1 \cdot t + 0 \cdot t^2 + 0 \cdot t^3 = t, \end{cases}$$

что и следовало ожидать.

<u>Пример 2</u> (матрица с отличными друг от друга собственными значениями при комплексно-сопряженных начальных дискретах). Рассмотрим еще одну матрицу [3], для которой также была решена полная проблема собственных значений:

$$\mathbf{A}(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} 1+\mathbf{t} & 1-\mathbf{t} \\ -1 & \mathbf{t} \end{bmatrix}.$$

Имеем

$$\begin{split} P(t) &= \lambda^2(t) - (1+2 \cdot t)\lambda(t) + (1+t^2) = 0, \\ p_0(t) &= 1, \qquad p_1(t) = -1 - 2 \cdot t, \qquad p_2(t) = 1+t^2 \\ \text{и, следовательно,} \end{split}$$

$$\lambda_{1,2}(t) = \frac{(1+2t) \pm \sqrt{4t-3}}{2},$$

откуда при $t_v = 0$ получим $\lambda_{1,2}(0) = \frac{1}{2} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Последовательность решения этой задачи такова: при K = 0:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \lambda_2(0) & \lambda_1(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(0) \\ \lambda_2(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_{1,2}(0) = \frac{1}{2} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2},$

$$\Lambda(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & 1\\ \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{6}\right) & \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{6}\right) \end{bmatrix}, \ \Lambda^{-1}(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{6}\right) & j\frac{\sqrt{3}}{3}\\ \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{6}\right) & -j\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix};$$

при K = 1:

$$\begin{cases} \lambda_1(1) + \lambda_2(1) = 2 \cdot \mathrm{H}, \\ \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \lambda_1(1) + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \lambda_2(1) = 0, \\ \text{откуда } \lambda_1(1) = \left(1 - j\frac{\sqrt{3}}{3}\right) \cdot \mathrm{H}, \quad \lambda_2(1) = \left(1 + j\frac{\sqrt{3}}{3}\right) \cdot \mathrm{H}; \end{cases}$$

при K = 2 :

$$\begin{cases} \lambda_1(2) + \lambda_2(2) = 0, \\ \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \lambda_1(2) + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \lambda_2(2) = -\frac{H^2}{3}, \end{cases}$$

откуда
$$\lambda_1(2) = -j \frac{\sqrt{3}}{9} \cdot H^2$$
, $\lambda_2(2) = j \frac{\sqrt{3}}{9} \cdot H^2$;

при К = 3:

$$\begin{cases} \lambda_{1}(3) + \lambda_{2}(3) = 0, \\ \left(\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \lambda_{1}(3) + \left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \lambda_{2}(3) = \frac{1}{9} \cdot H^{2}, \\ \lambda_{1}(3) = -j\frac{2\sqrt{3}}{2} H^{3} \rightarrow (3) = j\frac{2\sqrt{3}}{2} H^{3} = 0. \end{cases}$$

откуда $\lambda_1(3) = -j \frac{2\sqrt{3}}{27} \cdot H^3$, $\lambda_2(3) = j \frac{2\sqrt{3}}{27} \cdot H^3$ и т.д.

Следовательно, для $\lambda_{1,2}(t)$ имеем

$$\lambda_{1,2}(t) = \left(\frac{1}{2} + t\right) \pm j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{3}t - \frac{\sqrt{3}}{9}t^2 - \frac{2\sqrt{3}}{27}t^3 - \dots\right),$$

что также полностью совпадает с результатами, полученными в [4].

<u>Пример 3</u> (матрица с отличными друг от друга собственными значениями при действительных начальных дискретах). Пусть

$$A = \begin{bmatrix} 3 - t^2 & 0 & 2t - 1 \\ 1 & 2 + t - t^2 & 0 \\ t & 0 & 1 + t^2 \end{bmatrix}.$$

Для этой матрицы имеем

$$\begin{split} P(t) &= -\lambda^3(t) - (-6 - t + t^2)\lambda^2(t) - (11 + 5t - 4t^2 - t^4)\lambda(t) - \\ &- (-6 - 5t + 2t^2 + t^3 + 2t^4 + t^5 - t^6) = 0, \\ p_0(t) &= -1, \quad p_1(t) = 6 + t - t^2, \quad p_2(t) = -11 - 5t + 4t^2 + t^4, \\ p_3(t) &= 6 + 5t - 2t^2 - t^3 - 2t^4 - t^5 + t^6. \end{split}$$

Собственные значения матрицы следующие:

$$\begin{split} \lambda_1(t) &= 2 + t - t^2, \qquad \lambda_2(t) = 2 + \sqrt{1 - t + t^4}, \qquad \lambda_3(t) = 2 - \sqrt{1 - t + t^4} \,. \\ \text{ При } t_v &= 0 \text{ имеем} \\ \begin{cases} \lambda_1(0) + \lambda_2(0) + \lambda_3(0) = 6, \\ \lambda_1(0) \cdot \lambda_2(0) + \lambda_1(0) \cdot \lambda_3(0) + \lambda_2(0) \cdot \lambda_3(0) = 11, \\ \lambda_1(0) \cdot \lambda_2(0) \cdot \lambda_3(0) = 6, \end{cases} \end{split}$$

откуда $\lambda_1(0) = 2$, $\lambda_2(0) = 3$, $\lambda_3(0) = 1$. Следовательно,

$$\Lambda(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 5 \\ 3 & 2 & 6 \end{bmatrix},$$

а также

$$\Lambda^{-1}(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} -4 & 2 & -1 \\ 4,5 & -1,5 & 0,5 \\ 0,5 & -0,5 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

Тогда при **K** = 1 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 5 \\ 3 & 2 & 6 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(1) \\ \lambda_2(1) \\ \lambda_3(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot H \\ 5 \cdot H \\ 5 \cdot H \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_1(1) = 1 \cdot H$, $\lambda_2(1) = -1/2 \cdot H$, $\lambda_3(1) = 1/2 \cdot H$;

при K = 2 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 5 \\ 3 & 2 & 6 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(2) \\ \lambda_2(2) \\ \lambda_3(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1^{-1} \\ 2^{-1} \\ 3^{-1} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 0 \\ 1/2 \cdot H^2 \\ -1 \cdot H^2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/2 \cdot H^2 \end{pmatrix} + \frac{H^2}{2!} \cdot \begin{pmatrix} -2 \\ -8 \\ -4 \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_1(2) = -1 \cdot H^2$, $\lambda_2(2) = -1/8 \cdot H^2$, $\lambda_3(2) = 1/8 \cdot H^2$;

при K = 3:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 5 \\ 3 & 2 & 6 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(3) \\ \lambda_2(3) \\ \lambda_3(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1^{-1} \\ 2^{-1} \\ 3^{-1} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 0 \\ 1/8 \cdot H^3 \\ 1 \cdot H^3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ -1/8 \cdot H^3 \\ -7/4 \cdot H^3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -H^3 \end{pmatrix} + \frac{H^3}{3!} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -6 \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_1(3) = 0, \qquad \lambda_2(3) = -1/16 \cdot H^3, \qquad \lambda_3(3) = 1/16 \cdot H^3$ и т.д.

Следовательно, $\begin{cases} \lambda_1(t) = 2 + t - t^2, \\ \lambda_2(t) = 3 - 0.5t - 0.125t^2 - 0.0625t^3... \approx 2 + \sqrt{1 - t + t^4}, \\ \lambda_3(t) = 1 + 0.5t + 0.125t^2 + 0.0625t^3... \approx 2 - \sqrt{1 - t + t^4}. \end{cases}$

<u>Пример 4</u> (случай кратных собственных значений с различными, в общем случае, начальными дискретами). Пусть дана матрица

$$\begin{split} A(t) = \begin{bmatrix} 1-t & 0 & 0 \\ t & 1-t & t^2 \\ t^3 & 0 & 2+t^2 \end{bmatrix}, \\ \text{для которой} \\ P(t) = -\lambda^3(t) + (4-2t+t^2)\lambda^2(t) + (1-5+6t-3t^2+2t^3)\lambda(t) + \\ &+ (2-4t+3t^2-2t^3+t^4) = 0, \\ p_0(t) = -1, \quad p_1(t) = 4-2t+t^2, \quad p_2(t) = -5+6t-3t^2+2t^3, \\ p_3(t) = 2-4t+3t^2-2t^3+t^4. \end{split}$$

Корни этого полинома следующие:

 $\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = 1 - t, \qquad \lambda_3(t) = 2 + t^2 \ . \label{eq:lambda_1}$

При $t_v = 0$ имеем

$$\begin{cases} \lambda_1(0) + \lambda_2(0) + \lambda_3(0) = 4, \\ \lambda_1(0) \cdot \lambda_2(0) + \lambda_1(0) \cdot \lambda_3(0) + \lambda_2(0) \cdot \lambda_3(0) = 5, \\ \lambda_1(0) \cdot \lambda_2(0) \cdot \lambda_3(0) = 2, \end{cases}$$

откуда $\lambda_1(0) = \lambda_2(0) = 1, \qquad \lambda_3(0) = 2$, при которых

det
$$\Lambda(\lambda(0)) = det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} = 0$$
, rang $\Lambda(\lambda(0)) = 2$.

Следовательно, $\Lambda^{-1}(\lambda(0))$ не существует. Поэтому воспользуемся псевдообратной матрицей $\Lambda^{+}(\lambda(0))$, которая имеет следующий вид:

$$\Lambda^{+}(\lambda(0)) = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & 0.5 \\ -0.5 & 0 & 0.5 \\ 5/3 & 1/3 & -4/3 \end{bmatrix}.$$

Тогда при К = 1:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(1) \\ \lambda_2(1) \\ \lambda_3(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \cdot H \\ -6 \cdot H \\ -4 \cdot H \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_1(1) = \lambda_2(1) = -1 \cdot H$, $\lambda_3(1) = 0$; при K = 2 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(2) \\ \lambda_2(2) \\ \lambda_3(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1^{-1} \\ 2^{-1} \\ 3^{-1} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \cdot H^2 \\ -4 \cdot H^2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \cdot H^2 \end{pmatrix} + \frac{H^2}{2!} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_1(2) = \lambda_2(2) = 0, \quad \lambda_3(2) = 1 \cdot \mathrm{H}^2.$

Можно убедиться, что $\forall K \geq 3$ дискреты $\lambda_{1,2,3}(K) = 0$, следовательно, имеем

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = 1 - 1 \cdot t - 0 \cdot t^2 = 1 - t, \\ \lambda_2(t) = 1 - 1 \cdot t - 0 \cdot t^2 = 1 - t, \\ \lambda_3(t) = 2 + 0 \cdot t + 1 \cdot t^2 = 2 + t^2 \end{cases}$$

которые полностью совпадают с вышеприведенными точными результатами.

Пример 5 (случай кратных собственных значений с одинаковыми начальными дискретами). Пусть дана следующая матрица:

$$A(t) = \begin{bmatrix} 1-2t & 0 & 0 \\ t^3 & 1-2t & t \\ t^2 & 0 & 1+t^2 \end{bmatrix},$$

для которой

$$\begin{split} P(t) &= -\lambda^3(t) + (3 - 4t + t^2)\lambda^2(t) + (-3 + 8t - 6t^2 + 4t^3)\lambda(t) + \\ &+ (1 - 4t + 5t^2 - 4t^3 + 4t^4) = 0, \\ p_0(t) &= -1, \quad p_1(t) = 3 - 4t + t^2, \quad p_2(t) = -3 + 8t - 6t^2 + 4t^3, \\ p_3(t) &= 1 - 4t + 5t^2 - 4t^3 + 4t^4. \end{split}$$

При этом корнями полинома являются λ (t) - λ (t) - 1 - 2t λ (t) - 1 + t²

$$\begin{split} \lambda_{1}(t) &= \lambda_{2}(t) = 1 - 2t, \qquad \lambda_{3}(t) = 1 + t \quad . \\ \text{При } t_{\nu} &= 0 \text{ имеем} \\ \begin{cases} \lambda_{1}(0) + \lambda_{2}(0) + \lambda_{3}(0) = 3, \\ \lambda_{1}(0) \cdot \lambda_{2}(0) + \lambda_{1}(0) \cdot \lambda_{3}(0) + \lambda_{2}(0) \cdot \lambda_{3}(0) = 3, \\ \lambda_{1}(0) \cdot \lambda_{2}(0) \cdot \lambda_{3}(0) = 1, \end{cases} \end{split}$$

откуда $\lambda_1(0) = \lambda_2(0) = \lambda_3(0) = 1$, с учетом которых

det
$$\Lambda(\lambda(0)) = det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = 0, \quad \operatorname{rang} \Lambda(\lambda(0)) = 1.$$

Следовательно,

$$\Lambda^{+}(0) = \begin{bmatrix} 1/18 & 1/9 & 1/18\\ 1/18 & 1/9 & 1/18\\ 1/18 & 1/9 & 1/18 \end{bmatrix}$$

Тогда при **K** = 1 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(1) \\ \lambda_2(1) \\ \lambda_3(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4 \cdot H \\ -8 \cdot H \\ -4 \cdot H \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_1(1) = \lambda_2(1) = -2 \cdot H$, $\lambda_3(1) = 0$; при K = 2 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1(2) \\ \lambda_2(2) \\ \lambda_3(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1^{-1} \\ 2^{-1} \\ 3^{-1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -8 \cdot H^2 \\ -8 \cdot H^2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \cdot H^2 \end{pmatrix} + \frac{H^2}{2!} \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 12 \\ 10 \end{pmatrix},$$

откуда $\lambda_1(2) = \lambda_2(2) = 0, \quad \lambda_3(2) = 1 \cdot H^2.$

Можно убедиться, что $\forall K \geq 3$ дискреты $\lambda_{1,2,3}(K) = 0$, следовательно, окончательно имеем

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = 1 - 2 \cdot t - 0 \cdot t^2 = 1 - 2 \cdot t, \\ \lambda_2(t) = 1 - 2 \cdot t - 0 \cdot t^2 = 1 - 2 \cdot t, \\ \lambda_3(t) = 1 + 0 \cdot t + 1 \cdot t^2 = 1 + 1 \cdot t^2, \end{cases}$$

что и должно быть.

Вычислительная схема. Таким образом, для решения полной проблемы собственных значений неавтономных матриц (или определения корней алгебраических многочленов с переменными коэффициентами) необходимо реализовать нижеприведенные этапы вычислительных операций.

<u>Первый этап:</u> составить характеристическое уравнение матрицы.

<u>Второй этап:</u> вычислить вектор $\lambda(0) = (\lambda_1(0), ..., \lambda_n(0))^T$ каким-либо численным методом в соответствии с (12) или (13) и матрицей $\Lambda^{-1}(\lambda(0))$ или $\Lambda^+(\lambda(0))$, которые остаются постоянными на всех шагах итерационных процедур.

<u>Третий этап:</u> вычислить необходимое количество дискрет $\lambda_i(K)$, i = 1, n в соответствии с процедурой (12) или (13).

<u>Четвертый этап:</u> восстановить оригиналы $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ в соответствии с обратными ДТ-преобразованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. Киев: Наукова думка, 1984. 420 с.
- 2. **Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р.** Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высшая школа, 1998. 574 с.
- 3. Симонян С.О., Аветисян А.Г. Решение полной проблемы собственных значений неавтономных матриц // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2002.-Т. 55, №3.-С. 426-434.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 07.04.2004.

Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա.Վ.ՄԵԼԻՔՅԱՆ ԺԻՐԱՐ-ՎԻԵՏԻ ՄԵԹՈԴԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ-ԹԵՅԼՈՐՅԱՆ ՆՄԱՆԱԿԸ

Առաջարկված է փոփոխական գործակիցներով հանրահաշվական բազմանդամների բոլոր արմատների զուգահեռ որոշման թվային մեթոդ՝ հիմնված դիֆերենցիալ-թեյլորյան ձևափոխությունների վրա։

S.H.SIMONYAN, A.G. AVETISSYAN, A.V.MELIKYAN DIFFERENTIAL-TAYLOR ANALOGUE OF THE JIRAR-VIET METHOD

A numerical method of parallel definition of all roots of algebraic polynomials with floating factors by applying differential-taylor transformations is proposed.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 658.564:519.83

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

С.Г. КЮРЕГЯН, Б.М. МАМИКОНЯН, С.В. АБГАРЯН, С.Ш. БАЛАСАНЯН, В.Г. ДАЛЛАКЯН, Г.С. КЮРЕГЯН

ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

Рассмотрено математическое моделирование непрерывных технологических процессов методом группового учета аргументов (МГУА). Предложен итерационный алгоритм применения МГУА, на основе которого получаются новые альтернативные модели, позволяющие осуществлять выбор наилучшей.

Ключевые слова: случайный процесс, переменные, модель, итерация, селекция.

Введение. Сложные производственные технологические процессы характеризуются входными, выходными переменными и параметрами, определяющими внутреннее состояние объекта, и зависят от многочисленных, зачастую трудно учитываемых, случайных факторов. Поэтому получение адекватного математического описания таких процессов представляет собой сложную исследовательскую работу.

Для описания стохастических процессов применяют статистические методы, позволяющие извлекать нужные результаты при неполной информации о механизмах процесса. Одним из наиболее приемлемых методов для решения комплекса задач, связанных с управлением технологических процессов, является известный метод группового учета аргументов (МГУА) [1,2], реализующий на основании селекции переменных многорядную модель оптимальной сложности.

Предлагается применение итерационного МГУА, на основе которого получаем оптимальные альтернативные модели, позволяющие осуществлять выбор наилучших по ряду показателей.

Краткое описание МГУА. Принципиальное отличие МГУА от обычного регрессионного анализа заключается в том, что целью первого является достижение минимума целесообразно выбранного критерия селекции, а целью второго – достижение минимума среднеквадратической ошибки (СКО) на всех экспериментальных точках при заранее заданном виде уравнения регрессии, что зачастую носит субъективный характер. Поэтому МГУА предписывает разбивать данные наблюдений на две части: проверочную и обучающую последовательности. Причем обучающая последовательность используется для оптимизации коэффициентов уравнения регрессии, как и в обычном регрессионном анализе, а проверочная – для оценки степени регулярности по величине относительного значения СКО:

$$\Box = \Box \left(100 N_{np} \Box^2 / \sum_{j \Box l}^{Nnp} y_j^2 \right)^{1/2} \% , \qquad (1)$$

где $\delta^2 = \sum_{j=1}^{Nnp} \left(y_j - y_j^* \right)^2 / N_{np}$, N_{np} – длина проверочной последовательности; y_j , y_j^* –

значения прогноза и наблюдения в ј-й точке соответственнуо.

Рассмотрим построение модели с помощью квадратичных полиномов. На каждом vом уровне (v=1,2,...,m) составляется rv моделей из пар $\mathbf{y}_{v-1,k} = \begin{bmatrix} y_{(v-1,k),p}, y_{(v-1,k),q} \end{bmatrix}^T$ предыдущего уровня:

$$y_{\nu k} = y_{\nu-1,k} Q_{\nu k} y_{\nu-1,k} + b_{\nu k} y_{\nu-1,k} + c_{\nu k}, \qquad (2)$$

где для первого уровня (v =1) $\mathbf{y}_{0,k} = [\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_q]^{\mathrm{T}}$; p=1, 2,..., n-1; q=p+1, p+2,...,n; x_p, X_q – независимые существенные переменные наблюдений – компоненты вектора $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_i\}$, i=1, 2,...,n; $\mathbf{Q}_{v\,k} = \{\mathbf{q}_{ab}\}$ – симметричная матрица (2x2); $\mathbf{b}_{v\,k} = [\mathbf{b}_{k1}, \mathbf{b}_{k2}]^{\mathrm{T}}$ – матрица коэффициентов линейных слагаемых; с_v - свободный член; k=1, 2,...,r_v; $\mathbf{r}_v = \mathbf{Cr}_{v-1}^2$ – количество комбинаций пар ($\mathbf{y}_{(v-1,k),p}$, $\mathbf{y}_{(v-1,k),q}$) на v – ом уровне (на первом уровне $\mathbf{r}_1 = \mathbf{C}_n^2$).

Из г_∨ моделей на каждом уровне отбираются n существенных по критерию минимума (1). Селекция продолжается до тех пор, пока СКО (1) от уровня к уровню уменьшается, а в случае ее возрастания осуществляется останов и возврат к предыдущему уровню, где выбирается та единственная модель у_m из (2), СКО которой минимальная. Таким образом, получаем иерархическую модель оптимальной сложности, зависящую от n1< n переменных X₁ (некоторые переменные могли отпасть в результате селекции), погрешность Δ_1 которой минимальна. Обозначим набор переменных, полученных в результате селекции, вектором Xm.

Описание итерационного МГУА. Принимая во внимание, что при построении модели МГУА из первоначальных п переменных в результате селекции отбирается п наиболее существенных, поставим новую задачу. Примем компоненты вектора **x**m за исходные переменные и снова построим модель МГУА. В результате получим вторую иерархическую модель с числом переменных n2 ≤ n1 и погрешностью Δ_2 . Будем строить новые модели, вводя каждый раз в качестве исходных переменные х_т, полученные в результате селекции предыдущей модели, продолжая эти циклы (итерации) до тех пор, пока набор исходных переменных не сохранится после селекции. Сходимость подобных итераций обосновывается сходимостью алгоритма МГУА к оптимальному (в смысле минимума остаточной СКО) решению при любом заданном начальном наборе случайных переменных и доказана в [1,2]. Построенные таким образом М модели будут отличаться друг от друга количеством ns переменных (s=1,2,...,M), количеством уровней иерархий и значением минимальной погрешности Δ_s . Действительно, каждая переменная хі входит в n-1 пару с другими переменными. При переходе в следующий ряд иерархии, если он не последний, в результате селекции алгоритма МГУА могут сохраниться либо все п переменные, либо может быть исключена только одна переменная. Аналогично обстоит дело и с переменными ук любого v - го ряда. В последнем ряду иерархии выделяется одна у_{mk}=f_k(у_{m-1,p}, у_{m-1,q}), в результате чего исключаются все переменные переменная предпоследнего ряда, кроме ут-1, и ут-1, Итак, в обратном направлении иерархии

определяются те переменные x_i, отобранные алгоритмом МГУА в результате селекции, которые наиболее существенны для описания данного процесса y_{mk}=f_k(x_m). Из сказанного следует, что если изначально из набора исходных переменных x_i исключить хотя бы одну или же ввести приоритет хотя бы на одну, то в результате получим совершенно иную модель с меньшим или таким же, как в предыдущей модели, набором переменных x_m, таким же или новым количеством уровней и СКО, которая может быть как больше, так и меньше значения СКО предыдущей модели, что, по-видимому, зависит от свойств описываемого процесса и определяется с помощью самоорганизующегося алгоритма МГУА.

Поскольку все модели строятся на одной и той же обучающей последовательности, а погрешности определяются на одной и той же проверочной последовательности данных наблюдений, то полученные модели сопоставимы по погрешности Δ_s , т.е. имеется возможность выбора наиболее приемлемой модели как с точки зрения минимальной погрешности, так и количества существенных переменных.

Пример. Проиллюстрируем предложенный подход на примере моделирования флотационного процесса обогащения молибденовой руды. В качестве исходных использовались среднесменные данные наблюдений за следующими четырьмя выходными показателями процесса в зависимости от n=12 существенных входных и режимных переменных х, определенных экспертными оценками:

- процентное содержание молибдена в концентрате y1=f1(**x**);
- массовый выход концентрата у2=f2(**x**);
- процентное извлечение молибдена в концентрат уз=f3(x);
- прибыль производства от реализации продукции у₄=f₄(x).

Программная реализация алгоритма решения задачи и отыскания математической модели оптимальной сложности по алгоритму МГУА с полиномами первой и второй степени выполнена на языке C++ в среде Microsoft Visual C++.

Для построения модели использовалась выборка из данных наблюдений. Как известно [2, 3], число точек интерполяции должно быть на единицу больше, чем число коэффициентов Ll аппроксимирующего полинома. Для обеспечения достаточной надежности расчетов необходимо принять объем выборки не менее трехкратного значения числа точек интерполяции. В соответствии с этим в нашем случае (Ll=6 для квадратичного полинома) объем выборки принят N=40. Как показали предварительные расчеты [4, 5], СКО на проверочной последовательности достигала минимума при разбиении числа точек наблюдений в обучающей и проверочной последовательностях в соотношении N_{of}/N_{np} =30/10.

В таблице приведены результаты построения моделей четырех выбранных выходных параметров флотационного процесса с использованием последовательных итераций МГУА, откуда следует, что:

- процедура итераций сходится;
- в процессе итераций продолжается фильтрация переменных и построение новых моделей;
- полученные модели отличаются от предыдущих количеством переменных, уровней и значением СКО.

Таблица

Результаты построения моделей итерационным МГУА

	_	_				
N⁰	Вектор исходных	Вектор переменных	Колич.	CKO,		
модели,	переменных,	после селекции,	уровней, v	Δ_{Pmin}		
S	x	Xm				
«Содержание молибдена в концентрате» (у1)						
1	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₆ ,	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₆ ,	5	1,37		
	x ₇ , x ₈ , x ₉ , x ₁₀ , x ₁₁ , x ₁₂ .	x ₇ , x ₈ , x ₉ , x ₁₂ .				
2	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₆ ,	x ₁ , x ₂ , x ₄ , x ₆ , x ₇ , x ₈ ,	5	1,50		
	x ₇ , x ₈ , x ₉ , x ₁₂ .	X9.				
3	x ₁ , x ₂ , x ₄ , x ₆ , x ₇ , x ₈ , x ₉ .	x ₁ , x ₂ , x ₄ , x ₆ , x ₇ , x ₈ ,	6	1,50		
		X9.				
	«Выход і	концентрата» (у2)				
1	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₆ ,	x ₁ , x ₂ , x ₆ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	5	8,42		
	x ₇ , x ₈ , x ₉ , x ₁₀ , x ₁₁ , x ₁₂ .					
2	x ₁ , x ₂ , x ₆ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	x ₁ , x ₂ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	5	10,1		
3	x ₁ , x ₂ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	x ₁ , x ₂ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	4	8,44		
«Извлечение» (уз)						
1	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₆ ,	x ₁ , x ₃ , x ₄ , x ₇ , x ₈ , x ₉ ,	5	6,45		
	x ₇ , x ₈ , x ₉ , x ₁₀ , x ₁₁ , x ₁₂ .	x ₁₁ , x ₁₂ .				
2	x ₁ , x ₃ , x ₄ , x ₇ , x ₈ , x ₉ ,	x ₁ , x ₄ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ ,	5	6,87		
	x ₁₁ , x ₁₂ .	x ₁₂ .				
3	x ₁ , x ₄ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ , x ₁₂ .	x ₄ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	4	8,06		
4	x ₄ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	x ₄ , x ₇ , x ₈ , x ₁₁ .	3	8,36		
«Прибыль» (у4)						
1	$x_1, x_2, \overline{x_3, x_4, x_5, x_6},$	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₇ , x ₉ .	5	8,77		
	x ₇ , x ₈ , x ₉ , x ₁₀ , x ₁₁ , x ₁₂ .					
2	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₇ , x ₉ .	x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₇ , x ₉ .	5	8,22		

Как видно из таблицы, среди моделей, построенных итерационным МГУА, имеются варианты, альтернативные первоначальным (первым). Так, например, в моделях «Содержание молибдена в концентрате» (у1) и «Извлечение» (у3) вторые модели обладают несколько большей СКО по сравнению с первыми, однако они проще по количеству содержащихся переменных. В моделях «Выход концентрата» (у2) первой модели можно противопоставить третью, в которой количество переменных и число уровней не единицу меньше. В модели «Прибыль» (у4) однозначно вторая модель предпочтительнее первой.

После выбора соответствующей модели программа представляет ее в среде Excel, где в третьей строке приводятся текущие значения переменных x_i, а в клетке 14С – значение соответствующей им выходной переменной y_j. Выбор среды Excel обусловлен удобством проведения всевозможных вычислительных процедур, включая и оптимизационные, построения таблиц и графиков.

Таким образом, в отличие от известного алгоритма МГУА [1], предложенный итерационный алгоритм предоставляет лицу, принимающему решение, возможность выбора наилучшей модели как с точки зрения простоты (количество переменных и число уровней), так и значения СКО, которая обуславливает точность построенной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Ивахненко А.Г., Юрачковский А.А.** Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1981. 120 с.
- Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.П., Дмитров В.Д. Принятие решения на основе самоорганизации. М.: Сов. радио, 1976. – 280 с.
- 3. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
- Абгарян С.В. Построение математической модели процесса флотации методом группового учета аргументов // Автоматика и вычислительная техника: Межв. сб. научн. тр.– Ереван / ЕрПИ. Серия XV. - 1980. - Вып. 5. – С. 6 – 9.
- Кюрегян С.Г., Мамиконян Б.М., Абгарян С.В., Баласанян С.В. Разработка автоматизированной системы управления флотационным процессом обогащения руды // Доклады Международного семинара «Конверсионный потенциал Армении и программы МНТЦ». Ч.2. – Ереван, 2000. - С. 181 – 184.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 20.03.2003.

Ս.Գ. ԿՅՈՒՐԵՂՅԱՆ, Բ.Մ. ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ, Ս.Վ. ԱԲԳԱՐՅԱՆ, Ս.Շ. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Վ.Գ.ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ, Գ.Ս. ԿՅՈՒՐԵՂՅԱՆ

ԱՐԳՈՒՄԵՆՏՆԵՐԻ ԽՄԲԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՆ ԻՏԵՐԱՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴ

Դիտարկված է անընդհատ տեխնոլոգիական գործընթացների մաթեմատիկական մոդելավորումը արգումենտների խմբային հաշվառման մեթոդով (ԱԽՀՄ). Առաջարկված է ԱԽՀՄ-ի օգտագործման իտերացիոն ալգորիթմ, ինչի արդյունքում ստացվում են նոր այլընտրանքային մոդելներ, որոնք թուլլ են տալիս կատարել լավագույնի ընտրությունը։

S.G. KYUREGHYAN, B.M. MAMIKONYAN, S.V. ABGARYAN, S.Sh. BALASSANYAN, V.G. DALLAQYAN, G.S. KYUREGHYAN

ITERATIVE METHOD OF THE GROUP REGISTRATION OF ARGUMENTS

Mathematical modeling of continuous technological processes by the method of the group registration of arguments (MGRA) is considered. The iterative application algorithm of the MGRA, which results in new alternative models allowing to realize a choice of the best one is proposed.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 681.326

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Р.А. АВЕТИСЯН, Р.А. ГЕВОРКЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТИЗАЦИИ В IP СЕТЯХ ПУТЕМ ЗАДАНИЯ СООТВЕТСТВУЮЩИХ МЕТРИК КАНАЛОВ

Рассмотрены различные концепции оптимизации маршрутизации в IP сетях. Задача определения оптимальных метрик каналов для однометрических и двухметрических протоколов маршрутизации решается с применением генетического алгоритма.

Ключевые слова: концепции маршрутизации в IP сетях, оптимизация маршрутизации, метрики каналов.

Методы оптимизации маршрутизации описывают процесс повышения производительности сети путем выявления и внедрения оптимальных моделей распределения нагрузки (трафика) без нарушения/изменения принятой структуры сети. В случаях, когда наращение нагрузок или временные колебания трафика вызывают перегрузки каналов связи, эти методы применяются для полного или частичного разрешения проблем производительности сети. Суть оптимизации заключается в "подстраивании" маршрутизации к сложившейся нагрузке в целях лучшей утилизации сетевых ресурсов, что, в свою очередь, повышает качество предоставляемых услуг (QoS -Quality of Service). Проблема оптимизации маршрутизации может быть сформулирована следующим образом: на заданных структуре сети и матрице спроса трафика необходимо найти такое решение для маршрутизации трафика, которое приведет к оптимальному QoS в сети. Под мерой QoS могут подразумеваться разные параметры производительности сети. Большинство определений в литературе основаны на утилизации каналов связи, что объясняется ее влиянием на задержку и потерю пакетов между маршрутизаторами [1]. Объектом оптимизации настоящей работы является минимизация наивысшей утилизации каналов связи в сети. В статье исследуется оптимизация маршрутизации для традиционных протоколов внутренних шлюзов (IGP – Interior Gateway Protocol). Эти протоколы опираются на метрики каналов для выявления наикратчайших маршрутов и определения выходных интерфейсов по всем направлениям. Таким образом, путем соответствующей настройки значений метрик возможно оптимизировать маршрутизацию. Сосредоточим свое внимание на наиболее распространенных протоколах маршрутизации, рекомендованных Cisco Systems - лидером на рынке сетевых технологий, которые учитывают два типа метрик - задержку и пропускную способность [2,3].

Рассмотрим характерные черты для разных концепций маршрутизации:

• Маршрутизация, основанная на пунктах назначения (destination-based routing) и отправления (source-based routing).

Существуют две принципиально разные концепции маршрутизации, которые, несомненно, влияют на процедуры и конечные результаты оптимизации. Это маршрутизация, основанная на пунктах назначения и отправления. Традиционные

протоколы маршрутизации, такие как OSPF (Open Shortest Path First), EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol) и IS-IS (Intermediate System - Intermediate System), относятся к первой концепции, каждый маршрутизатор принимает решение о дальнейшей пересылке пакета, основываясь исключительно на адресе назначения пакета, указанном в его заголовке. Такая процедура маршрутизации проста и достаточно эффективна, однако она накладывает ограничения на возможности оптимизации (рис. 1).



Рис. 1. Ограничения, накладываемые маршрутизацией по пункту назначения

При пересечении двух потоков с одинаковыми пунктами назначения они объединяются и отсылаются далее по одному и тому же интерфейсу, что может вызвать перегрузку на некоторых каналах связи, в то время как на других маршрутах утилизация каналов будет оставаться на низком уровне. Во избежание таких ограничений были разработаны новые технологии для маршрутизации, основанной на пункте отправления пакетов, такие как MPLS (MultiProtocol Label Switching). MPLS дает возможность устанавливать структуру маршрутизации внутри IP сети независимо от используемого протокола маршрутизации и задавать определенные маршруты для отдельных потоков трафика. Каждый IP пакет, предназначенный для MPLS маршрутизации, содержит специальную метку, которая лежит в основе принятия решений маршрутизаторами о дальнейшей пересылке пакета на всем пути его следования. Таким образом, маршрутизация пакетов не зависит от низлежащих протоколов маршрутизации, в ее основе лежат метки пакетов и информация о дальнейшей пересылке, заложенная в маршрутизаторах. Такая методика дает высокий уровень гибкости маршрутизации, т.к. позволяет достичь любой желаемой картины маршрутизации.

Однометрическая и двухметрическая маршрутизация.

В случае маршрутизации, основанной на пункте назначения пакетов, маршрутизатор определяет выходной интерфейс для дальнейшей пересылки пакетов, исходя из значений метрик, которые количественно описывают дистанцию до пункта назначения. Как правило, отдельная аддитивная метрика присваивается каждому каналу, затем алгоритм определения наикратчайшего пути используется для определения оптимальных маршрутов между всеми узлами сети (однометрическая маршрутизация). Зачастую метрики каналов имеют физический смысл, например, "задержка" или "стоимость", хотя их значения могут быть использованы напрямую для оптимизации маршрутизации, не неся в себе никакого физического смысла. То есть, задавая соответствующие значения метрик каналов, можно косвенно воздействовать на схему маршрутизации и, таким образом, оптимизировать ее.

Наряду с однометрическими протоколами существуют также схемы маршрутизации, которые позволяют учитывать при определении маршрута более чем одну метрику канала (многометрическая маршрутизация). Примером является протокол маршрутизации EIGRP, разработанный компанией Cisco, который учитывает четыре метрики. Однако только две из

них используются по умолчанию – аддитивная метрика "задержка" и метрика "емкость". Сосредоточим внимание на этих двух типах метрик и покажем, как они могут быть задействованы для оптимизации маршрутизации. Дистанция до пункта назначения вычисляется по следующей нормированной формуле:

$$M = \frac{1}{\min(bw_i)} + \sum_i d_i = \max_i (icm_i) + \sum_i d_i, \qquad (1)$$

где bw_i – пропускная способность канала *i*; d_i – статическая задержка канала *i*.

Таким образом, маршрутизатор для определения маршрута учитывает сумму задержек всех каналов до пункта назначения и добавляет к ней компоненту пропускной способности, которая равна обратной величине минимума полос пропускания каналов до пункта назначения (полоса пропускания "узких мест"). Затем выбирается маршрут с наименьшим значением метрики маршрута М. Для удобства мы будем учитывать не саму пропускную способность канала, а величину, обратную ей, и обозначим ее icm ($icm_i = 1/bw_i$), т.е. в формуле для дистанции вместо обратной величины минимума пропускной способности ($1/\min_i(bw_i)$) вставим максимум из значений обратной пропускной способности ($\max_i(icm_i)$) каналов. На рис. 2 показана концепция маршрутизации, учитывающей пропускную способность и задержку каналов. Метрика дистанции маршрута A-B-C-E равна 7 (сумма задержек = 3 плюс компонента пропускной способности = 4), а для маршрута A-D-E равна 5. Как следствие, маршрутизатор А выбирает маршрутизатор D для дальнейшей пересылки пакета к пункту назначения E, и поток 1 будет проходить через маршрут A-D-E.



Рис. 2. Двухметрическая маршрутизация

В зависимости от значений d и icm решающую роль при выборе маршрута играют наименьшая суммарная задержка (т.е. наикратчайший маршрут) или высокая пропускная способность, взятые в отдельности либо вместе. Оптимизация маршрутизации, основанной на двухметрических протоколах, имеет больший потенциал для достижения оптимальных решений по сравнению с однометрическими протоколами. Поскольку вторая метрика вносит больше гибкости, то реализуется больше схем маршрутизации. Следует отметить, что в случае задания одинаковых значений для всех метрик icm двухметрический протокол будет работать как однометрический и выдавать схемы маршрутизации соответствующим образом. Преимущества двухметрического протокола явно видны на рис. 3.



Рис. 3. Преимущества двухметрической маршрутизации

Допустим, имеется два потока с различными пунктами назначения, но их маршруты имеют несколько общих узлов, т.е. несколько раз проходят через одинаковые маршрутизаторы. Пусть А будет первым общим маршрутизатором на их пути, а D последним. В то время как однометрический протокол объединит оба потока после их прибытия в маршрутизатор А и перешлет их маршрутизатору В или С, используя двухметрический протокол, можно добиться получения схемы маршрутизации, изображенной на рис. З. Для потока 1 избранный маршрут имеет суммарную метрику, равную 7, а метрика маршрута, проходящего через маршрутизатор С, для него равна 8. Для потока 2 картина обстоит иначе - метрика маршрута A-C-D-F равна 7, в то время как метрика маршрута А-В-D-Е равна 9. Суть решения проблемы заключена в задании величин обратных пропускных способностей таким образом, чтобы сделать некоторые маршруты менее привлекательными для одного потока, в то время как эти величины не будут иметь влияние на другой поток, т.к. на его маршруте уже имеются высокие значения величин обратных пропускных способностей (на отрезках, различных для двух потоков). Существенный выигрыш в QoS, который может дать EIGRP по сравнению с OSPF, зависит в основном от топологии сети и спроса трафика.

В данной работе для вычисления оптимальных метрик маршрутов использован генетический алгоритм. Для создания генных цепочек были пронумерованы все каналы в сети с присвоением веса каждому из них. Таким образом, каждая генная цепочка содержит весы всех каналов в порядке их нумерации. В случае однометрической маршрутизации сценарий маршрутизации может быть задан одной генной цепочкой, для двухметрической маршрутизации необходимо иметь уже две генные цепочки для каждого решения. Определенное решение выводится из генной цепочки путем соответствующего вычисления наикратчайшего пути с использованием одной или двух метрик. Так как мы намереваемся минимизировать наивысшую утилизацию каналов в сети, то для функции пригодности была выбрана величина, обратная максимальной утилизации. При этом решения, приводящие к меньшей утилизации каналов, получают более высокое значение пригодности, т.е. имеют более высокие шансы к репродукции при создании нового поколения. Для воздействия на процесс репродукции возведем в степень функцию пригодности:

Fпригодности =
$$\left(\frac{1}{\max_{i \in \text{ каналам}} (\text{утилизация } i)}\right)^p, p > 0.$$
 (2)

При p<1 можно добиться искусственного завышения значения пригодности плохих решений по сравнению с хорошими, что позволяет избежать быстрого отсеивания плохих решений, т.е. ранней сходимости алгоритма. И, наоборот, при p > 1 разрыв между плохими и хорошими решениями увеличивается, что может привести к более быстрой сходимости процесса.

В целях увеличения производительности алгоритма и скорости вычислений предлагается перед оценкой решений применять процедуру локального поиска. При этом каждый раз используется процедура для отвода трафика с канала с наивысшей утилизацией. Эта процедура повторяется до тех пор, пока она дает улучшение имеющегося результата. В случае однометрической маршрутизации, чтобы отвести трафик с канала, достаточно повысить его метрику. То есть, мы увеличиваем метрику канала с наивысшей утилизацией и перемаршрутизируем все потоки. Если это вызывает возрастание утилизации на каком-либо канале в сети, то необходимо возвратить значение измененной метрики и, тем самым, закончить дальнейший поиск. В противном случае, процедура повторяется для канала, который после изменений имеет наивысшую утилизацию. Для протоколов двухметрической маршрутизации возможности для отвода трафика с определенных каналов шире. Можно увеличить метрику задержки или уменьшить метрику пропускной способности канала, либо наоборот. То есть, процедура поиска многократно применяет возможные модификации метрик самого загруженного канала. Любая модификация метрик приемлема, если она не приводит к возрастанию максимальной утилизации. Выполнение процедуры прекращается в случае, когда больше не удается получить дальнейшее улучшение. Для улучшения результатов при репродукции не все генные цепочки выбираются случайным образом. В каждом цикле репродукции мы вводим наилучшее решение на данный момент и глобальное наилучшее решение в новое поколение.

Результаты предложенного алгоритма были апробированы на нескольких сетевых сценариях при помощи программного обеспечения для моделирования сети ns2 [4]. В таблице представлены параметры трех сценариев и результаты оптимизации для них. Все потоки трафика сгенерированы случайным образом между узлами сети. Приведенная в таблице первоначальная максимальная утилизация является результатом работы стандартного протокола OSPF (метрики всех каналов равны 1, т.е. получены наикратчайшие маршруты). Как и предполагалось, результаты, полученные при использовании двухметрического протокола EIGRP, позволили достичь меньшей утилизации, чем при использовании однометрического протокола OSPF.

Таблица

Результаты оптимизации для различных сетевых сценариев						
	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3			
Число маршрутизаторов	11	20	50			
Число каналов	24	30	63			
Число потоков	33	200	117			
макс. утилизация	0,573	0,55	0,573			
Результаты оптимизации для OSPF						
макс. утилизация	0,406	0,364	0,406			
Результаты оптимизации для EIGRP						
макс. утилизация	0,383	0,363	0,347			

Таким образом, предложенный подход позволяет повысить QoS сети за счет корректировки параметров метрик, воздействующих на маршрутизацию. Одним из наиболее важных преимуществ алгоритма является возможность его применения для сетей со сложной топологией, то есть в случаях, когда размерность задачи затрудняет или делает невозможным применение линейных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Chen S., Nahrstedt K.** An overview of Quality of Service Routing for the Next Generation High–Speed Networks: Problems and Solutions // IEEE Network Magazine. November/December, 1998.– P. 64-79.
- Moy Jonh T. OSPF, anatomy of an Internet routing protocol. Addison Wesley.- New York, 1998. 345 p.
- 3. Enhanced Interior Gateway Routing Protocol. Cisco White Paper EIGRP: <u>http://www.cisco.com/warp/public/103/eigrp-toc.html</u>: 45 p.
- 4. Fall K., Varadhan K. The ns Manual. The VINT Project, 2000: <u>http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc-stable/index.html</u>: 164 p.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 02.07.2004.

Ռ. Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ռ. Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ IP ՑԱՆՑԵՐՈւՄ ԵՐԹՈւՂԱՎՈՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՈՒՄ՝ ԿԱՊՈւՂԻՆԵՐԻ ՀԱՄԱՊԱՏԱՍԽԱՆ ՄԵՏՐԻԿԱՆԵՐԻ ՏՐՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ

Քննարկված են տարբեր հնարավորություններ IP հոսքերի երթուղավորման օպտիմալացման համար։ Միամետրիկական և երկմետրիկական նպատակակետի վրա հիմնված երթուղավորման արձանագրությունների օգտագործման դեպքում օպտիմալ մետրիկաների որոնման խնդրի լուծման համար կիրառվում է գենետիկ այգորիթմ։

R. A. AVETISYAN, R. A. GEVORGYAN ROUTING OPTIMIZATION IN IP NETWORKS BY MEANS OF SETTING APPROPRIATE ROUTE METRICS

Different concepts for routing optimization in IP networks are discussed. A problem of optimum metric definition for one-metric and two-metric routing protocols using the genetic algorithm is solved.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

ረSጉ 519.8.518.854

ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄ ԵՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐ

Վ.Շ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Ս.Մ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Դ.Ա. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՆԵՐՔԻՆ ՄԻՋՄԻԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ՄԱԿՐՈՄՈԴԵԼ

Դիտարկված է գերմեծ ինտեգրալ սխեմաների ներքին միջմիացումների կենտրոնացված պարամետրերով մակրոմոդել, որը բավարար ճշտությամբ բնութագրում է իրական գծում ընթացող գործընթացները։ Մասնավորապես, հաշվի են առնվել լարման ու հոսանքի ալիքների աղավաղումները և ազդանշանի տարածման հապաղումը։ Տարբեր դեպքերի համար դիտարկվել են միջմիացման մակրոմոդելի տարբերակներ։ Կառուցվել է բազմասեկցիոն մոդել և SPICE սխեմատեխնիկական ծրագրի օգնությամբ կատարվել է տարբեր մոդելների և ռեժիմների համեմատություն։

Առանցքային բառեր. ներքին միջմիացումներ, միջմիացման մակրոմոդել, ազդանշանի հապաղում, մոդելավորում։

Ինտեգրալ սխեմաների (ԻՍ) արագագործության մեծացմանը զուգընթաց գնալով ավելի է մեծանում միջմիացումների ազդեցության չափը վերջիններիս բնութագրերի վրա [1]։ Միջմիացումներով են պայմանավորված ոչ միայն ազդանշանի հապաղումները, այլ նաև փոխադարձ և այլ տիպի աղմուկները, որոնք կարող են բերել ԻՍ-ի անաշխատունակության։ Այսպիսով, արագագործ ԻՍ-երի հաշվարկն անհրաժեշտ է կատարել՝ հաշվի առնելով միջմիացումների ազդեցությունը։

Միջմիացումներում ընթացող գործընթացները սովորաբար [2,3] նկարագրվում են մասնակի ածանցյալներով դիֆերենցիալ հավասարումներով։ Դրանց լուծման համար մշակված են մի շարք թվային մեթոդներ [3,4,5], որոնք տարբերվում են ձշտությամբ, ընդհանրականությամբ և աշխատատարությամբ։ Այդ մեթոդները կիրառելի են բաշխված կառուցվածքներով միջմիացման ներկայացման դեպքում։ Մակայն զգալիորեն մեծ թվով միջմիացումներ պարունակող գերմեծ ԻՍ-երի հաշվարկն այդպիսի մեթոդներով անհնարին է՝ վերջիններիս մեծ աշխատատարության պատձառով, ուստի, պահանջվում է կառուցել հաշվարկի ընդունելի ձշտություն ապահովող, արտաքին ելուստների հոսանքները և լարումները նկարագրող բավականին պարզ, բայց և կենտրոնացված պարամետրերով մակրոմոդելներ։

Համասեռ միջմիացման բաշխված մոդելը [2] երկար RLC գիծ է (նկ.1), որը նկարագրվում է հավասարումների

$$\frac{\partial U}{\partial x} + L_0 \frac{\partial I}{\partial t} + R_0 I = 0, \qquad \frac{\partial I}{\partial x} + C_0 \frac{\partial U}{\partial t} + G_0 U = 0$$
(1)

համակարգով, որտեղ U-ն, I-ն լարումը և հոսանքն են, L₀-ն, C₀-ն, R₀-ն, G₀-ն՝ համապատասխանաբար, միավոր երկարության ինդուկտիվությունը, ունակությունը, դիմադրությունը և կորստի հաղորդականությունը։

(1) հավասարումների համակարգը կարող է Ճշգրտորեն բանաձևային եղանակով լուծվել միայն այն մասնավոր դեպքում, երբ տեղի ունի հետևյալ պայմանը.

$$\mathsf{L}_0 \mathsf{G}_0 = \mathsf{R}_0 \mathsf{C}_0 : \tag{2}$$

(2) պայմանի կատարման դեպքում (մասնավորապես անկորուստ գծի համար) կարելի է ստանալ Ճշգրիտ հավասարումներ, որոնք կապ են հաստատում կառուցվածքի ծայրամասերի I_1 , I_2 հոսանքների և U_1 , U_2 լարումների միջն.

$$U_{1}(t) = e^{-\mu}U_{2}(t - t_{h}) + Z_{\Delta}[I_{1}(t) + e^{-\mu}I_{2}(t - t_{h})],$$

$$U_{2}(t) = e^{-\mu}U_{1}(t - t_{h}) + Z_{\Delta}[I_{2}(t) + e^{-\mu}I_{1}(t - t_{h})],$$
(3)

որտեղ t_h = \sqrt{LC} , $Z_{\Delta} = \sqrt{L/C} = \sqrt{R/G}$, $\mu = \sqrt{RG}$, L -ը, C -ն, R -ը, G -ն կառուցվածքի լրիվ ինդուկտիվությունը, ունակությունը, դիմադրությունը և հաղորդականությունն են, այսինքն L₀-ն, C₀-ն, R₀-ն, G₀-ն՝ բազմապատկած գծի երկարությամբ։

(2) պայմանի կատարման դեպքում (3) հավասարումների համակարգը երկար գծի Ճշգրիտ կենտրոնացված պարամետրերով մակրոմոդելն է, որին համապատասխանում է նկ.2-ի համարժեք սխեման։



Նկ.1. Երկար գծի բաշխված մոդելը



Նկ.2. Մակրոմոդելի համարժեք սխեման

Այս մոդելը նկարագրում է գծում տարածվող լարման և հոսանքի ալիքները։ Այս դեպքում տարածման գործընթացում ալիքների աղավաղումը նրանց e^{-µ} անգամ թուլացումն է և _հ –ով հապաղումը։

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i}(t) + \tau_{xi} \mathbf{x}_{i}'(t) &= \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \mathbf{K}_{x0ij} \left[\mathbf{x}_{j} \left(t - t_{hxij} \right) + \tau_{xij} \mathbf{x}_{j}' \left(t - t_{hxij} \right) \right] + \\ &+ Z_{0i} \left[\mathbf{y}_{i}(t) + \tau_{yi} \mathbf{y}_{i}'(t) + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} \mathbf{K}_{y0ij} \left(\mathbf{y}_{j} \left(t - t_{hyij} \right) + \tau_{yij} \mathbf{y}_{j}' \left(t - t_{hyij} \right) \right) \right], \quad i = 1, \dots, N: \end{aligned}$$

$$(4)$$

$$x_{i} + \tau_{xi}x_{i}' = \sum_{\substack{j=l \\ j \neq i}}^{N} K_{x0ij}(x_{j} + \tau_{xij}x_{j}') + Z_{0i}\left[y_{i} + \tau_{yi}y_{i}' + \sum_{\substack{j=l \\ j \neq i}}^{N} K_{y0ij}(y_{j} + \tau_{yij}y_{j}')\right], \quad i = 1, \dots, N:$$
(5)

Ավելի ընդհանուր դեպքում, եթե (2) պայմանը չի կատարվում, գիծը հանգեցնում է լրացուցիչ աղավաղումների՝ տարածվող ալիքների ձակատի երկարաձգման տեսքով։ Նմանատիպ աղավաղումներն առաջանում են իրական գծերում պարամետրերի հաձախությունից և մի շարք այլ գործոններից կախվածության հետևանքով։ Այդ պատձառով, ընդհանուր դեպքում պետք է օգտագործել (4) կամ (5) մոդելներից մեկը ոչ զրոյական հաստատուն ժամանակներով, ինչը և կապահովի ձակատների երկարաձգման մոդելավորումը։ (5) մոդելը ստացվում է (4)-ից՝ փոքր ժամանակահատվածների դեպքում։

(1) հավասարումը կարելի է հանգեցնել հիպերբոլական տիպի հեռահաղորդակցման հավասարումներից մեկին։ Այն ունի (6) տեսքը՝ $a_0 = 0$, $b_0 = 0$ պայմանների դեպքում։

$$div(a_0x + a_1gradx) + a_2x = a_3 \frac{dx}{dt} + a_4 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2},$$

$$y = b_0x + b_1gradx + b_2 \frac{\partial y}{\partial t}.$$
 (6)

Բարդ և փոփոխվող հեռահաղորդակցման հավասարման բնութագիրը դժվարացնում է ցանկացած պարամետրերի զուգակցման դեպքում աշխատունակ, միասնական մոդելի կառուցումը։ Սակայն կարելի է առաջարկել որոշ այդպիսի մոդելներ։ Մոդելների պարամետրերի կապը կառուցվածքի պարամետրերի հետ կարելի է գտնել մոդելները նկարագրող օպերատորական արտահայտությունները համեմատելով երկար գծի Ճշգրիտ օպերատորական արտահայտությունների հետ [2]։ Համասեռ գծում արտաքին հոսանքները և լարումները միմյանց հետ կապված են

$$I_{i}(p) = Y_{11}(p)[U_{i}(p) - K(p)U_{j}(p)] ,$$

$$U_{i}(p) = Z_{11}(p)[I_{i}(p) - K(p)I_{j}(p)]$$
(7)

օպերատորական արտահայտություններով, որտեղ $Y_{11}(p)$ -ն, $Z_{11}(p)$ -ն մուտքային հաղորդականության և դիմադրության օպերատորական պատկերներն են, K(p)-ն՝ ելքում պարապ ընթացքի ռեժիմում լարման կամ կարձ միացման ռեժիմում հոսանքի փոխանցման գործակցի օպերատորական պատկերը։ (1) հավասարման ձշգրիտ լուծմամբ K(p)–ի համար ստացվում է

$$K(p) = \operatorname{sch}\sqrt{(R + pL)(G + pC)}$$
(8)

արտահայտությունը, իսկ մուտքային դիմադրության և մուտքային հաղորդականության D(p) հարաբերակցության համար՝

$$D(p) = \frac{Z_{11}(p)}{Y_{11}(p)} = \frac{R + pL}{G + pC}:$$
(9)

(4) մակրոմոդելում գոյություն ունեն K(p)-ի և D(p)-ի հետևյալ կապերը.

$$K(p) = \frac{K_{i}(p) + K_{u}(p)}{1 + K_{i}(p)K_{u}(p)}, \quad D(p) = Z^{2}(p)\frac{1 - K_{i}^{2}(p)}{1 - K_{u}^{2}(p)}, \quad (10)$$

որտեղ

$$K_{u}(p) = \frac{1 + p\tau_{1}}{1 + p\tau_{u}} e^{-pt_{hu}}, \qquad (11)$$

$$K_{i}(p) = \frac{1 + p\tau_{2}}{1 + p\tau_{i}} e^{-pt_{hi}}, \quad Z(p) = \frac{1 + p\tau_{i}}{1 + p\tau_{u}}:$$
(12)

(11) և (12) – ի գործակիցների համեմատությունը (p աստիձանների դեպքում, երբ $p \rightarrow 0$, և 1/p աստիձանների դեպքում, երբ $p \rightarrow \infty$) թույլ է տալիս մի շարք դեպքերում բանաձևորեն միմյանց կապել մոդելի և բաշխված կառուցվածքի պարամետրերը։

Դիտարկենք մոդելների տարբերակներ՝ սկսած ամենապարզից՝ տեղադրելով $t_{hu} = t_{hi} = 0$ ։ Զրոյական հապաղումներով մոդելները քոմփյութերային իրականացման տեսանկյունից ավելի պարզ են և բազմաթիվ միջմիացումներով մեծ սխեմաների հաշվարկի դեպքում ավելի հարմար է իրապես օգտագործել միայն այդպիսի մոդելներ։ (12) արտահայտությունից հետևում է, որ զրոյական հապաղումների և $K_u \neq 0$, $K_i \neq 0$ դեպքերում պետք է տեղադրել $\tau_1 = \tau_2 = 0$, այլապես $K(\infty) \neq 0$, ինչը հակասում է երկար գծերում անցումային գործընթացների բնույթին։ Այդ դեպքում, (5) հավասարման հիման վրա, մոդելներն ունենում են հետևյալ տեսքը.

$$U_{1} + \tau_{u}U_{1}' - K_{u0}U_{2} = Z_{0}(I_{1} + \tau_{i}I_{1}' + K_{i0}I_{2}),$$

$$U_{2} + \tau_{u}U_{2}' - K_{u0}U_{1} = Z_{0}(I_{2} + \tau_{i}I_{2}' + K_{i0}I_{1}):$$
(13)

Մոդելի հինգ պարամետրերը՝ Z_0 -ն, K_{u0} -ն, K_{i0} -ն, τ_u -ն, τ_i -ն, կարելի է գտնել՝ համեմատելով (3) և (11) արտահայտությունները p = 0 դեպքում, p-ի գործակիցները (3) և (11) արտահայտություններում վերածելով շարքի $p \to 0$ դեպքում և համեմատելով D(p)-ի համար ստացված արտահայտությունները՝ $p \to \infty$ դեպքում։

Գրառումների պարզեցման համար ներմուծենք ժամանակի հարաբերական հաստատուններ՝ $\tilde{\tau}_u = \tau_u / (CR - LG)$, $\tilde{\tau}_i = \tau_i / (CR - LG)$, հարաբերական դիմադրություն՝ $\tilde{Z} = Z_0 \sqrt{G/R}$ և գծի ոչ իդեալականության գործակից՝ H = (CR - LG) / (CR + LG), որը բնութագրում է կառուցվածքի պարամետրերի՝ (2) պայմանից շեղման աստիձանը։ H գործակիցը փոփոխվում է -1 արժեքից (CR = 0 դեպքում) մինչև 1 (LG = 0 դեպքում) սահմաններում և հավասար է գրոյի՝ իդեալական գծի համար, ինչը բավարարում է (2) պայմանին։ Ներմուծենք նաև a գործակիցը.

$$a = \sqrt{\frac{1+H}{1-H}} \cdot \frac{\mu - Hsh\mu \left(ch\mu - \sqrt{\frac{1+H}{1-H}}sh\mu\right)}{\mu + Hsh\mu \left(ch\mu - \sqrt{\frac{1+H}{1-H}}sh\mu\right)}:$$
 (14)

Հաշվի առնելով ներմուծված նշանակումները` մոդելի պարամետրերը որոշվում են հետևյալ հարաբերություններով. bpt th $\mu < a < cth\mu$, wuyu $\tilde{Z} = a$, $K_{\mu 0} = ch\mu - ash\mu$, $K_{i0} = ch\mu - \frac{1}{a}sh\mu$,

$$\tilde{\tau}_{u} = \frac{\text{Hsh}\mu(K_{i0} + K_{u0})}{2\mu^{2} \left(\frac{1}{a} - \sqrt{\frac{1-H}{1+H}}\right)}, \quad \tilde{\tau}_{i} = \frac{\text{Hsh}\mu(K_{i0} + K_{u0})}{2\mu^{2} \left(\sqrt{\frac{1+H}{1-H}} - a\right)}:$$
(15)

bpb $a \le th\mu$, wuyu $K_{i0} = 0$, $\tau_u = \frac{th\mu}{2\mu}$, $\widetilde{Z} = th\mu$, $K_{u0} = sch\mu$,

$$\tau_{i} = \sqrt{\frac{1-H}{1+H}} / 2\mu:$$
 (16)

Եթե a ≥ cthµ, uuuu \tilde{Z} = cthµ, K_{u0} = 0, K_{i0} = schµ,

$$\tau_{u} = \sqrt{\frac{1+H}{1-H}} / 2\mu, \quad \tau_{i} = \frac{th\mu}{2\mu}:$$
 (17)

(13) մոդելի հատկությունների դիտարկումն սկսենք ամենավատ դեպքից, որը համապատասխանում է H=0-ին, այսինքն՝ իդեալական գծին։ Այս դեպքում a=1, և պարամետրերը որոշվում են (15) արտահայտություններով, որոնցից կարելի է ստանալ.

$$Z_0 = \sqrt{R/G} = \sqrt{L/C}, \quad K_{u0} = K_{i0} = e^{-\mu}, \ \tau_u = \tau_i = \sqrt{LC}:$$
 (18)

Մոդելում D(p) = R/G = L/C, որը նմանեցվում է (9) ձշգրիտ արտահայտությանը՝ հաշվի առնելով (2) պայմանը։ Մակայն K(p) արտահայտությունը, իհարկե, ամբողջությամբ չի համընկնում (8) ձշգրիտ արտահայտությանը։

Քանի որ Ճշգրիտ լուծումից տարամիտումը որոշվում է K(p) բնութագրով, ապա մոդելի ամենամեծ սխալանքն ստացվում է ըստ ելքի ու մուտքի գծի առավելագույն անհամաձայնության և $\mu \to 0$ դեպքում։ Ամենավատ դեպքը իդեալական աստիձանի E լարման կիրառումն է $\mu = 0$ -ով գծի վրա՝ R_p անսահման դիմադրությամբ բեռի դեպքում։ Համապատասխան $\tilde{U}_2(t) = U_2(t)/E$ և $\tilde{I}_2(t) = I_2 Z_0/E$ անցումային բնութագրերը բերված են նկ.3ա - ում։

Տվյալ դեպքում Ճշգրիտ լուծումը հոսանքի և լարման չմարող ուղղանկյուն իմպուլսներն են, իսկ մոդելը տալիս է շատ արագ մարող տատանումներ։



510


Նկ.3. $R_{q0}=0$ դեպքում անցողիկ գործընթացները իդեալական գծի (13) մոդելում (հոծ կորերը համապատասխանում են մոդելին, իսկ կետագծերը՝ Ճշգրիտ լուծմանը) ա) $R_{\mu}=\infty$, $\mu=0$; p) $R_{\mu}=\infty$, $\mu=1$; q) $R_{\mu}=0$, $\mu=1$

Uuhuju բեռի վերջավոր դիմադրությունների, µ պարամետրի և տրվող ազդանշանների վերջավոր ձակատների դեպքում մոդելի ձշտությունը, նույնիսկ իդեալական գծի համար, զգալիորեն մեծանում է։ Ինչպես երևում է նկ.3բ-ից և գ-ից, µ մարման աձը զգալիորեն մեծացնում է մոդելի ձշտությունը նույնիսկ գծերի համաձայնեցման բացակայության դեպքում։ Նկ.4-ում ցույց են տրված համաձայնեցված գծի ծայրում անցողիկ գործընթացները, մուտքում $\tau_{\phi} = \sqrt{\text{LC}}$ ժամանակի հաստատունի հետ աձող լարման կիրառման և իդեալական փոխանջատման դեպքում ($\tau_{\phi} = 0$)։ Բերված գրաֆիկից հետևում է, որ արդեն $\tau_{\phi} = \sqrt{\text{LC}}$ դեպքում անցողիկ գործընթացի լրիվ տևողությունը բնութագրվում է բավականին ձշգրիտ։ Դրան պետք է ավելացնել, որ համաձայնեցված գծի մուտքային հոսանքը բնութագրվում է մոդելով բացարձակ ձշտությամբ, քանի որ համաձայնեցված գծի մուտքային դիմադրության հաշվարկման արտահայտությունը համընկնում է ձշգրիտի հետ։



Նկ.4. $R_q = R_p = \sqrt{LC}$ և մուտքային ազդանշանի τ_ϕ տևողության տարբեր արժեքների դեպքում մոդելով ստացված արդյունքները (հոծ կորերը համապատասխանում են մոդելին, իսկ կետագծերը՝ քշգրիտ լուծմանը)

Դիտարկենք ոչ իդեալական գծի դեպքը։ Եթե H \neq 0, ապա մոտավորապես $|H| < \mu sch \mu \cdot csh \mu$ միջակայքում մոդելի պարամետրերը նախկինի պես որոշվում են (15) արտահայտություններով։ Այնուհետև տեղի է ունենում սահուն (առանց պարամետրերի արժեքների խզման) անցում (17) արտահայտությանը` H > 0 դեպքում, կամ (16) արտահայտությանը` H < 0 դեպքում։ Իսկ H մոդելի հետագա մեծացման դեպքում տեղի է ունենում պարամետրերի թռիչքաձև փոփոխություն, քանի որ (14) արտահայտությամբ որոշվող a(H) կախվածությունն ունի խզում, H > 0 դեպքում` (17) արտահայտությամբ որոշվել (16) արտահայտությամբ, իսկ H < 0 դեպքում` (17) արտահայտությամբ։ Դա կապված է հեռահաղորդակցման հավասարումների որակական փոփոխությունների հետ, որոնք C -ի կամ L -ի` զրոյի ձգտելու դեպքում` ձևափոխվում են հիպերբոլիկից պարաբոլիկ տիպի։

Դիտարկենք գործնականում լայն տարածում ունեցող դեպք։ Այն տեղի ունի դիֆուզիայի, ջերմահաղորդականության, կիսահաղորդիչներում լիցքակիրների տեղափոխման և կուտակման, ինչպես նաև բաշխված RC-կառուցվածքներում տեղի ունեցող գործընթացներում։ Այդ դեպքում (14)-(16) արտահայտությունների հիման վրա մոդելի հետևյալ պարամետրերի համար ստանում ենք.

ьрь $\sqrt{L/C} > R (\sqrt{129} - 3)/12$, шщш $Z_0 = \sqrt{L/C} + 2L/CR - 2R/3$,

$$K_{u0} = 1, K_{i0} = 1 - R / Z_0, \tau_u = C(Z_0 - R / L), \tau_i = \sqrt{LC(1 - R / 2Z_0)};$$
 (19)

եթե $\sqrt{L/C} \le R (\sqrt{129} - 3)/12$, шщш

$$Z_0 = R, K_{u0} = 1, K_{i0} = 0, \tau_u = CR/2, \tau_i = \sqrt{LC/2}$$
: (20)

Այսպիսով, (13) մոդելը, լինելով պարզ, ներառում է բաշխված RCL կառուցվածքի պարամետրերի բոլոր հնարավոր զուգակցությունները և կառուցվածքում ազդանշանի հապաղման մեծ ժամանակի դեպքում ապահովում է հաշվարկի բավարար Ճշգրտություն։

Դիտարկենք (4) հապաղումներով ավելի բարդ և Ճշգրիտ մոդելը, որի հավասարումները տվյալ դեպքում ունեն հետևյալ տեսքը.

$$U_{1} + \tau_{u}U_{1}'(t) - K_{u0}[U_{2}(t - t_{hu}) + \tau_{u1}U_{2}'(t - t_{hu})] = Z_{0}\{I_{1}(t) + \tau_{i}I_{1}'(t) + K_{i0}[I_{2}(t - t_{hi}) + \tau_{i1}I_{2}'(t - t_{hi})]\},$$

$$U_{2} + \tau_{u}U_{2}'(t) - K_{u0}[U_{1}(t - t_{hu}) + \tau_{u1}U_{1}'(t - t_{hu})] = Z_{0}\{I_{2}(t) + \tau_{i}I_{2}'(t) + K_{i0}[I_{1}(t - t_{hi}) + \tau_{i1}I_{1}'(t - t_{hi})]\}.$$
(21)

(21) մոդելի տարբերակները մեկը մյուսից տարբերվում են գծի պարամետրերի միջև առնչությունների և պարամետրերի որոշման գծով։ Ընդհանուր դեպքում հնարավոր չէ գտնել պարզ բանաձևային կապ կառուցվածքի պարամետրերի միջև, քանի որ հավասարումները, որոնք ստացվում են (3)-ի և (11)-ի համեմատությունից, ոչ միշտ են որոշված կամ ենթարկվում են միայն թվային լուծման։ Այդ պատձառով հիմնականում հարկադրված կիրառում են պարամետրերի թվային նույնականացում։ Սակայն մասնավոր դեպքերում հնարավոր է և բանաձևային լուծում։



Նկ.5. Բազմասեկցիոն մոդել

(2) պայմանին բավարարող իդեալական գծի համար $Z_0 = \sqrt{L/C}$, $K_{u0} = K_{i0} = e^{-\mu}$, $t_{hu} = t_{hi} = \sqrt{LC}$, $\tau_u = \tau_i = \tau_{u1} = \tau_{i1} = 0$, և մոդելը դառնում է Ճշգրիտ, նույնական (3)-ին։ Քանի որ Ճշտությունը ստացվում է հապաղումների ներմուծման և, համապատասխանաբար, մոդելի բարդեցման միջոցով, օգտակար է համեմատել տրված մոդելը, օրինակ, բազմասեկցիոն M հատ RCLG օղակներից բաղկացած մոդելի հետ (նկ.5)։ Նկ.6-ում ներկայացված են այդ համեմատության արդյունքները։

🔾 հիշողության հարաբերական կորուստները որոշվել են որպես M մոդելի հիշողության իրականացման հարաբերությունը սեկցիոն (21) մոդելի կորուստներին՝ առաջին կարգի ինտեգրման անուղղակի մեթոդի իրականացման դեպքում։ Ինտեգրման մեթոդի կարգի մեծացման դեպքում $\widetilde{\mathsf{C}}$ -ը կլինի ավելի մեծ։ (21) հիշողության կորուստները գնահատվել են ըստ ժամանակի 10 կետերի հիշման կետերի կոորդինատների։ Մեքենայական 🕇 ժամանակի հարաբերական կորուստները որոշվել են ելքում կարձ փակված գծում անցողիկ գործընթացի հաշվարկի ժամանակ՝ գծի մուտքին իդեալական միավոր աստիձանի լարման կիրառման դեպքում։ Գիծը համարվել է առանց կորուստների (R = 0, G = 0)։ Ինտեգրման միջակայքը $0 \div 4\sqrt{LC}$ է։ Որպես միավոր ընդունված է (21) մոդելի հաշվարկային ժամանակը։ Ինտեգրալային ε սխալանքը որոշվել է ելքային լարման ժամանակային կախվածության և Ճշգրիտ կախվածության միջև մակերեսը բաժանելով ձշգրիտ ելքային իմպուլսի մակերեսի վրա։ (21) մոդելի համար նմանատիպ սխալանքը որոշվում է ինտեգրման նվազագույն հ_{ուո} քայլով և հավասար է $h_{min}/2\sqrt{LC}$ ։ Գործնական հաշվարկների դեպքում այն կազմում է մոտ 2%։ Հաշվարկները կատարվել են սխեմատեխնիկական մոդելավորման SPICE համակարգով։

Նկ.6-ի կորերը ցույց են տալիս, որ նույնիսկ M = 20 դեպքում բազմասեկցիոն մոդելի սխալանքը համարյա մեկ կարգով մեծ է, քան (21) մոդելի սխալանքը, և համարյա նույնքան անգամ մեծ են հիշողության և մեքենայական ժամանակի ծախսերը։ Ընդ որում՝ $\tilde{\zeta}$ հիշողության ծախսերը համարյա չորս անգամ փոքրացված են, քանի որ տվյալ կոնկրետ օրինակում բավարար է հիշել ըստ ժամանակի 2 կետ՝ 10-ի փոխարեն, ինչպես ընդունված էր նկ.6-ի կառուցման ժամանակ։



Նկ.6. \mathbf{M} -սեկցիոն մոդելի $\widetilde{\boldsymbol{\zeta}}$ հիշողության հարաբերական կորուստների, $\widetilde{\mathbf{t}}$ ժամանակի և սխալանքի համեմատությունը (21) մոդելի հետ



Նկ.7. RC - կառուցվածքի (T կոր), (13) մոդելի (M_0 կոր) և (21) մոդելի (M կոր) փոխանցման գործակցի ամպլիտուդա- փուլային բնութագրերը

RC - կառուցվածքի համար մոդելի և կառուցվածքի պարամետրերի միջև հնարավոր է հետևյալ բանաձևային կապը՝ K_{u0} = 1, K_{i0} = 0, Z₀ = R, $\tau_i = t_{hi} = \tau_{u1} = \tau_{i1} = 0$, $\tau_u = RC/6$, $t_{hu} = RC(1/2 - 1/\sqrt{6})$:

Նկ.7-ում բերված են K(ω) փոխանցման գործակցի ամպլիտուդա- փուլային բնութագրերը՝ T Ճշգրիտ կորը, (21) M մոդելը, առանց հապաղումների M $_0$ մոդելը (13)։

Նույնատիպ հաձախությունների համապատասխան կետերը միացված են ուղիղների հատվածներով։

Նկարը ցույց է տալիս, թե ինչքանով է մեծանում ճշտությունը $t_{hu} \neq 0$ ներմուծման հաշվին։

Այսպիսով, մշակված է արագագործ ինտեգրալ սխեմաների ներքին միջմիացումների մակրոմոդել, որում հաշվի են առնված հոսանքի և լարման ալիքների աղավաղումներն ու ազդանշանի տարածման հապաղումը։ Դրա հաշվին մշակված մակրոմոդելն ապահովում է հաշվարկային արդյունքների ավելի մեծ Ճշտություն՝ գրականությունից հայտնի այլ մոդելների համեմատությամբ։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. **Palenius T., Roos J.** An Efficient Reduced-Order Interconnect Macromodel for Time-Domain Simulation // Proceedings of ISCAS'03. 2003. Vol. 4. P- 628-63.
- Achar R. and Nakhla M. Simulation of high-speed interconnects // Proceedings IEEE. 2001. -Vol. 89, N 5. - P. 693-728.
- Odabasioglu A., Celik M. and Pileggi L.T. PRIMA: passive reduced-order interconnect macromodeling algorithm // IEEE Trans. Computer-Aided Design. - 1998. - Vol. 17, N8. - P. 645-654.
- Cangellaris A. and Igarashi M. Rules for robust generation of accurate reduced-order models for highspeed coupled interconnections // IEEE Trans. Adv. Packag. – 2001. - Vol. 24, N 2. - P. 120-125.
- Palenius T., Roos J., and Aaltonen S. Development and Comparison of Reduced-Order Interconnect Macromodel for Time-Domain Simulation // Proceedings of ICECS'02. - 2002. - Vol. 2. - P. 757-760.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.02.2004։

В.Ш. МЕЛИКЯН, С.М. САРГСЯН, Д.А. ПЕТРОСЯН

МАКРОМОДЕЛЬ ВНУТРЕННИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Рассмотрена сосредоточенная макромодель внутренних межсоединений быстродействующих интегральных схем, которая достаточно точно описывает процессы, происходящие в реальной линии. В частности, учтены искажения волн тока и напряжения, а также задержка распространения сигнала. Исследованы разные макромодели межсоединений для различных случаев. Построена многосекционная макромодель. Произведено сравнение разных моделей и режимов с помощью схемотехнического пакета SPICE.

V.SH. MELIKYAN, S.M. SARGSYAN, D.A. PETROSYAN

MACROMODEL OF INTERNAL INTERCONNECTIONS OF INTEGRATED CIRCUITS

The concentrated macromodel of internal interconnections of high-speed integrated circuits which precisely enough describes the processes occurring in a real line is considered. In particular, current and voltage waveform distortions, and also a delay of signal propagation are taken into account. Different interconnection macromodels for various cases are investigated. The multisection macromodel is constructed. Comparison of different models and modes with the tools of SPICE package is made.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621:513.75+513.51/55

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

М.Р. КУДОЯН

К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Показана эффективность применения нетрадиционных и редко используемых способов управления, а именно, принципа модального управления в системах частотно-управляемых асинхронных электроприводов (ЧУЭП) с асинхронными двигателями (АД) с короткозамкнутым ротором. Предложено новое системное решение, повышающее быстродействие и динамическую устойчивость ЧУЭП. Предложенные системы ЧУЭП реализуемы и работоспособны при любом уровне технической реализации составных узлов и компонентов.

Ключевые слова: частотно-управляемый асинхронный электропривод, инвертор, выпрямитель, асинхронный двигатель.

Частотно-управляемые асинхронные электроприводы (ЧУЭП) с явно-выраженным промежуточным звеном постоянного тока занимают большую часть современных серийно выпускаемых промышленных систем ЧУЭП и имеют тенденцию к дальнейшему развитию.

Известно, что создание систем электроприводов (ЭП) с широким диапазоном регулирования выходных координат и высокой статической и динамической точностью при сложных внешних возмущениях возможно лишь на основе энергетических способов регулирования.

С учетом того, что основным источником электроэнергии является промышленная сеть переменного тока, можно показать, что независимо от типа двигателя для организации энергетического регулирования необходимо реализовать, как минимум, трехкратное преобразование энергии, при этом сами преобразователи могут быть как явновыраженными, так и совмещенными.

Электромагнитный момент, развиваемый электрической машиной, независимо от способов возбуждения ее двух частей, определяется векторным произведением результирующего вектора рабочего потокосцепления в воздушном зазоре ($\Psi\mu$) и результирующего вектора тока (I) одной из частей машины:

$M = \Psi_{\mu} \times I$,

что, с учетом взаимозависимости электромагнитных переменных, можно выразить также и через пару других векторов. Из этого следует, что для полной управляемости по моменту необходимо организовать непосредственное воздействие на амплитуды пространственных векторов хотя бы одной переменной статора и одной переменной ротора, а также на взаимную пространственную ориентацию выбранной пары векторов переменных статора и ротора. Поэтому полностью управляемые машины должны быть прежде всего двухканальными, а для организации энергетического регулирования скорости необходимо хотя бы в одном из двух каналов реализовать трехкратное преобразование энергии: из первичной энергии сети в энергию постоянного тока, из энергии постоянного тока в

энергию вторичного переменного тока, из энергии вторичного переменного тока в механическую энергию [1-3].

Итак, система ЭП, где есть возможность управлять амплитудой и пространственной ориентацией векторов всех переменных, как статора, так и ротора, с точки зрения управляемости является избыточной. При этом режим работы ЭП однозначно определяется заданным многомерным вектором управления, т.е. для статической устойчивости такой системы ЭП необходимо будет реализовать безынерционный адекватный «наблюдатель», поскольку при этом система абсолютно лишена свойств внутреннего саморегулирования.

Для синтеза таких перспективных систем показана эффективность применения нетрадиционных и редко используемых способов управления, а именно, принципа модального управления систем ЧУЭП с асинхронными двигателями. Из теории управления известно, что принцип модального управления, в сущности, означает замыкание объекта управления обратной связью по вектору состояния с помощью модального регулятора (здесь не рассматриваются вопросы невозможности или трудности измерения с необходимой точностью и качеством ряда координат ЭП, таких как производные токов АД и преобразователя, момент на валу АД, упругий момент и т.д.). Согласно этой теории, можно предложить структурную схему асимптотического наблюдателя состояния (HC) полного порядка (рис. 1), построенную как замкнутая система с обратной связью по вектору состояния.

Выход объекта Y(t)=CX(t) сравнивается с выходом HC: Y(t1)=CX(t1), и их разность является сигналом рассогласования $\Delta Y=Y(t)-Y(t1)$ через матрицу коэффициентов обратной связи наблюдателя L на входах его интеграторов.

Тогда, согласно структурной схеме, разработка НС описывается векторно-матричным уравнением

$$\mathbf{X}(\mathbf{t}) = [\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}]\mathbf{X}(\mathbf{t}_1) + \mathbf{L}\mathbf{Y}(\mathbf{t}_1) + \mathbf{B}\mathbf{U}(\mathbf{t})$$

при условии полной наблюдаемости объекта, которая проверяется исходя из матрицы наблюдаемости

$$Qn = [C^{T}A^{T}C^{T}(A^{T})^{2}C^{T}...(A^{T})^{n-1}C^{T}],$$

где Rang Qn=n (п-порядок объекта).



Рис. 1. Структурная схема объекта с асимптотическим наблюдателем состояния

Например, при известных допущениях общее дифференциальное уравнение ЭП, выполненного по системе "полупроводниковый преобразователь – двигатель", в общепринятых обозначениях [3] имеет вид

$$\frac{d^{3}\omega}{dt^{3}} + \frac{T_{\mu} + T_{\dot{Y}}}{\dot{O}_{\mu}T_{\dot{Y}}} \cdot \frac{d^{2}\omega}{dt^{2}} + \frac{T_{\mu} + T_{M}}{\dot{O}_{\mu}T_{\dot{Y}}T_{M}} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{\dot{O}_{\mu}T_{\dot{Y}}T_{M}} \cdot \omega = \frac{K}{\dot{O}_{\mu}T_{\dot{Y}}T_{M}} \cdot U_{Y},$$

где Q_µ – матрица наблюдаемости системы.

Разумеется, что при технических реализациях систем по структуре рис.1 следует учитывать реальную степень наблюдаемости объекта с помощью матрицы наблюдаемости в случае его неполной наблюдаемости, что связано с известными трудностями распознавания объектов.

Несмотря на перспективность систем с вышеприведенной структурой, современные системы ЭП строятся, основываясь на некоторую способность внутреннего крайней саморегулирования системы, т.е., по мере, одну из трех переменных, определяющих электромагнитный момент машины, оставляют независимой. Помимо этого, с учетом экономических показателей в настоящее время наибольшее распространение получили частотно-управляемые системы ЭП с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором, т.е. системы с одноканальным управлением. Здесь в зависимости от выбранного для ориентации координатных осей опорного вектора можно построить одну из известных семи структурных схем ЧУЭП [1,2].

Несмотря на множество структурных и технических реализаций, зависящих в основном от требуемых показателей качества управления в статике и динамике, а также от энергетических показателей ЭП, известные системы ЧУЭП с управляемым звеном

постоянного тока, реализованные или электронными аппаратными средствами, или числовым программным управлением, имеют одну важную системную общность, заключающуюся в том, что сигнал задания скорости управляемого асинхронного вход либо разомкнутой, либо замкнутой системы, двигателя, подающийся на непосредственно подается на вход системы управления полупроводникового автономного инвертора напряжения в виде прямого или имеющего определенную форму результирующего сигнала управления для регулирования частоты питающего АД напряжения. Этот же сигнал через функциональный преобразователь подается также и на вход системы управления полупроводникового управляемого выпрямителя с целью управления амплитудой питающего АД напряжения [1-4]. Такое системное решение изначально приводит к ухудшению динамических показателей ЭП, а именно, на интервалах времени, находящихся внутри периода выходных сигналов инвертора, частота питающего АД напряжения начинает изменяться непропорционально изменению амплитуды питающего АД напряжения. Необходимо также учесть и временную задержку управляемого выпрямителя, обусловленную относительно низкой частотой питающей сети. Это приводит к замедлению изменения электромагнитного момента АД в нужном направлении и, тем самым, к уменьшению быстродействия и других динамических показателей ЭП. Указанное явление может также способствовать возникновению и дополнительному усилению широко наблюдаемых в известных системах автоколебаний АД.

Предлагается более быстродействующая система ЧУЭП, где входной сигнал управления инвертором снимается с выхода управляемого выпрямителя, а сигнал задания скорости АД подается на вход управления выпрямителя. Такое решение обеспечивает автоматическую форсировку изменения электромагнитного момента АД за счет пропорциональности изменения амплитуды напряжения относительно изменения частоты. В системе введены обратные связи по входному току, напряжению инвертора и скорости АД через общий усилитель на входе управления выпрямителя (рис. 2).



Рис.2. Структура ЧУЭП с общим усилителем

На рис 2 приняты следующие обозначения: 1 - асинхронный двигатель; 2 - полупроводниковый инвертор; 3 - полупроводниковый управляемый выпрямитель; 4 - конденсатор; 5 - система управления выпрямителя 3; 6 и 10 -элементы сравнения; 7 - датчик входного сетевого тока; 8 - нелинейный элемент; 9 - общий усилитель; 11 и 15 – датчики тока; 12 и 16 - датчики напряжения; 14 -система управления инвертором 2; 13 - датчик скорости.

Дальнейшим развитием предложенной системы по быстродействию является разработанная вторая система ЧУЭП с подчиненным управлением, где применен способ последовательной коррекции для решающих (больших и средних) инертностей системы. Здесь все три переменные – входной ток и напряжение инвертора, а также скорость АД, имеют собственные контуры регулирования с индивидуальными регуляторами так, что входной сигнал регулятора каждого внешнего контура служит сигналом управления соответствующего внутреннего контура. Желаемые показатели качества движения ЧУЭП в статике и динамике обеспечиваются известным выбором передаточных функций и настроек трех регуляторов (рис. 3) [3,6].



Рис. 3. Структура ЧУЭП подчиненного управления

На рис. 3 приняты следующие обозначения: 1 - АД; 2 – автономный инвертор напряжения (АИН); 3 - управляемый выпрямитель; 4 - конденсатор; 5 - система управления выпрямителя; 6,9,12 - соответственно регуляторы тока, напряжения и скорости; 7,10,13 - элементы сравнения; 8,16 - датчики тока; 11,17 - датчики напряжения; 14 - датчик скорости; 15 - система управления АИН.

Приведенные на рис. 2 и 3 системы были разработаны и реализованы аппаратными средствами для АД с номинальной мощностью 2 *кВт* [5]. Экспериментально проверены и обоснованы основные положения предложенного решения. Созданные системы ЧУЭП успешно прошли испытания на шлифовальном станке ЗАО "АРМСТАНОК".

Поскольку предложенное решение является системным, то рассмотренные системы реализуемы и работоспособны при числовом программном управлении ЧУЭП, а также при любом уровне технической реализации их составных узлов и компонентов, как, например:

1. Системы управления, элементы каналов обратных связей и регуляторы могут быть как аналоговыми, так и дискретными.

2. Полупроводниковый управляемый выпрямитель может быть однофазным и многофазным с любой известной схемой.

3. Инвертор – любой полупроводниковый, например, транзисторный или тиристорный.

4. Алгоритм управления инвертором может быть любым, как, например:

а) управление с 120° эл.; б) управление с 180° эл.; в) с широтно-импульсной модуляцией с неизменным законом модуляции; г) с широтно-импульсной модуляцией с управляемым законом модуляции и т.д.

Таким образом, показано, что с целью повышения эффективности ЧУЭП имеются далеко не использованные ресурсы в области системных решений, примерами чего может служить предлагаемая система с использованием принципа модального управления с наблюдателем состояния, а также разработанная и апробированная система автоматического ЧУЭП с новой структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями.-М.: Энергия, 1974. - 328 с.
- Слежановский О.В., Дацковский Л.Х. и др. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями.- М.: Энергоатомиздат, 1983. - 256 с.
- 3. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода.- М.: Энергия, 1979. 615 с.
- 4. Kuo B.C., Lieu D.K. Instrumental Motion Control Systems and Devices.-USA, 2001.-250 p.
- 5. **Кудоян М.Р.** Быстродействующий асинхронный электропривод с автоматическим частотным управлением: Дис. на соиск. степени магистра ГИУА. Ереван, 2001. -68 с.
- 6. **Режмин Б.И., Ямпольский Д.С.** Преобразование и наладка систем подчиненного регулирования электроприводов. М.: Энергия, 1975. 356 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 24.03.2004.

Մ. Ռ. ԿՈՒԴՈՑԱՆ

ԴԵՊԻ ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՄԲ ԱՍԻՆՔՐՈՆ ԷԼԵԿՏՐԱԲԱՆԵՑՈՒՄՆԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ

Տույց է տված ոչ ավանդական և լայն օգտագործում չունեցող կառավարման միջոցների արդյունավետությունը՝ օգտագործելով հաձախականային կառավարմամբ ասինքրոն էլեկտրաբանեցումների (ՀԿԱԷ) հայտնի մոդալ կառավարման սկզբունքը։ Առաջարկված է նոր համակարգային լուծում, որը բարձրացնում է ՀԿԱԷ արագագործությունը և դինամիկ կայունությունը։ Առաջարկված ՀԿԱԷ համակարգերն իրագործելի և աշխատունակ են դրանց առանձին մասերի և բաղադրամասերի ցանկացած տեխնիկական իրագործման մակարդակով։

M. R. KUDOYAN ON INCREASING EFFECTIVENESS OF FREQUENCY-CONTROLLED SYSTEMS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES

The effectiveness of nonconventional and rarely used methods of control, namely, the principle of modal control in asynchronous frequency-controlled electric drives (AFCED) with induction motors is shown. A new system solution for increasing the response rate and dynamic stability of AFCED is proposed. The proposed AFCED systems are effective at any level of technical realization of their separate nodes and components.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.317.39.084.2

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

А.С. СТЕПАНЯН, В.М. АРУТЮНЯН, З.Н. АДАМЯН, А.З. АДАМЯН, В.Г. БАРХУДАРЯН

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ ДАТЧИК ВЛАЖНОСТИ НА КВАРЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ

Предложен датчик влажности на кварцевом резонаторе, который может работать в широком температурном диапазоне. Принцип работы заключается в измерении разности частот двух генераторов на кварцевых резонаторах, получаемой с помощью смесителя. Оба кварцевых резонатора (чувствительный и опорный) расположены рядом в одних и тех же условиях, благодаря чему влияние таких факторов, как температура, давление, изменения напряжения питания и т.д., взаимно компенсируются. Разность частот генераторов, таким образом, изменяется только за счет изменения относительной влажности окружающего воздуха. Описывается принцип получения чувствительного к влажности слоя на кварцевом резонаторе, приводятся измеренные зависимости отклонения частоты от влажности при разных значениях температуры.

Ключевые слова: кварцевый резонатор, датчик, влажность, компенсация, балансный смеситель.

Введение. При решении большинства задач в научной, производственной и практической деятельности часто необходимо измерять относительную влажность среды. При этом необходимо иметь точную информацию не только об относительной влажности окружающей среды, но и о влажности сред с изменяющимися условиями (температура, давление). Ярким примером может служить топливный элемент, где датчики влажности должны работать в широком диапазоне температур (30...110 °C) и измерять относительную влажность от 20 до 100% при наличии различных газов в среде (H₂, O₂).

Благодаря высокой чувствительности к массе кварцевые резонаторы нашли широкое применение в качестве датчиков различных газовых и жидких веществ, [1]. Как известно, резонансная частота пьезоэлектрического кварцевого кристалла снижается, когда на его поверхности адсорбируется постороннее вещество. Изменение резонансной частоты (Δf , *Гц*) в зависимости от массы осажденного на поверхность кристалла вещества (Δm , *r*) вычисляется выражением Сауербрея [2]:

$$\Delta f = -2,26 \cdot 10^{-6} \, \frac{f_0^2 \,\Delta m}{A} \,, \tag{1}$$

где А – площадь поверхности кристалла, *см*²; fo – основная резонансная частота, *Гц*.

Как следует из (1), изменение частоты прямо пропорционально массе. Кварцевые резонаторы обладают уникальной способностью регистрировать изменение массы до $10^{-11} r$ [1]. Если на резонатор нанести тонкий слой чувствительного к тому или иному газу вещества, то резонатор будет реагировать на очень малые концентрации данного газа. Селективность датчика зависит от материала чувствительного слоя. В настоящее время в

качестве чувствительных материалов для кварцевых датчиков применяются, в частности, полимерные структуры. Известны также полимеры, обладающие адсорбционной чувствительностью к влажности окружающей среды [3-5]. Поскольку предлагаемый датчик влажности рассчитан на работу в широком диапазоне температур и влажности, нами был выбран полимер, не теряющий чувствительную способность в этих условиях.

Принцип работы компенсационного датчика. На блок-схеме предложенного датчика влажности (рис.1) чувствительный и опорный кварцевые резонаторы подключены к соответствующим генераторам, сигналы которых подаются на смеситель. На выходе смесителя формируется сигнал, соответствующий разности частот двух генераторов, который измеряется частотомером. Поскольку измерительный (чувствительный) генератор должен устойчиво работать при изменении частоты резонатора на несколько килогерц, целесообразно было использовать нерезонансную схему (рис.2). Генератор собран на транзисторах VT1, VT2, VT3 по схеме Колпитца и обеспечивает стабильность частоты 10⁻⁷ [2]. В качестве опорного генератора использовался встроенный генератор двойного сбалансированного смесителя SA612A, который позволяет получить на выходе разность входных частот независимо от температуры и колебаний напряжения.



Рис.1. Блок-схема кварцевого датчика влажности (fo и fh – соответственно резонансные частоты опорного и чувствительного генераторов)

Оба резонатора расположены близко друг к другу, за счет чего и обеспечиваются одинаковые условия их работы. Поскольку эти резонаторы являются идентичными, изменения различных условий окружающей среды (за исключением влажности) одинаково влияют на их характеристики, что приводит практически к равным колебаниям их резонансных частот. Эти колебания вычитаются в смесителе, и на его выходе формируется полезный сигнал, зависимость которого от дестабилизирующих факторов минимальна, так как при изменении влажности изменяется только частота чувствительного резонатора.

В качестве измерителя сигнала использовался частотомер Ч3-64, а также разработанный нами частотомер на однокристальном микроконтроллере, подключенный к дисплею. При соответствующем программном обеспечении эта система способна выдавать значение относительной влажности на дисплей в режиме реального времени. При этом модуль получается весьма малогабаритным, с малой потребляемой мощностью и может питаться от гальванического элемента. Данная система находится на стадии окончательной разработки.

Экспериментальные данные. Для датчика влажности были выбраны кварцевые резонаторы АТ-среза с резонансной частотой 6,67 $M\Gamma q$, которые предварительно были подвержены химической очистке. В качестве чувствительного элемента был выбран поли- ε -капроамид, поскольку этот полимер сохраняет свою чувствительность к влаге в широком диапазоне температур. Отметим, что он практически нечувствителен к водороду и кислороду. С целью нанесения полимера на кристалл был приготовлен 2,5-процентный раствор поли-(-капроамида в муравьиной кислоте. Тонкие полимерные слои наносились на обе поверхности кристалла с помощью центрифугирования со скоростью 3000 об/мин в течение 30 мин. Затем проводилась операция полимеризации пленок при 250 ^{o}C и последующей полимеризации. Сдвиг резонансной частоты после нанесения пленок составил 1900 Γq .



Рис. 2. Электрическая схема кварцевого датчика влажности (Qz1 и Qz2 – соответственно чувствительный и опорный резонаторы)



Рис. 3. Зависимость Δf от относительной влажности ρ при различных температурах

Эксперименты проводились при различных температурах в диапазоне изменения относительной влажности от 20 до 95%. Для обеспечения влажной среды использовалась специальная стеклянная камера, в которой вместе с кварцевым датчиком был расположен эталонный измеритель влажности.

Обсуждение результатов. Зависимости Δf от относительной влажности среды, измеренные при различных температурах (рис. 3), показывают, что поскольку резонансная частота кварцевого кристалла зависит от температуры, причем при больших температурах эта зависимость становится более сильной, то рассматриваемая разность частот резонаторов, скорее всего, является следствием технологических разбросов при изготовлении самих кристаллов.

Таким образом, нами разработан и сконструирован компенсационный датчик влажности, функционирующий в диапазоне температур от 20 до 90 °С при наличии разных газовых сред Н₂ и O₂, измеряющий относительную влажность в диапазоне 20...95%, точность которого составляет 1%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г.** Кварцевые генераторы: Справ. пособие. М.: Радио и связь, 1984. 231с.
- 2. Sauerbrey G.Z. Z. Physik. 1959. V.155. P.206-228.
- 3. Radeva E., Georgiev V., Spassov L., Koprinarov N. and Kanev St. Humidity adsorptive properties of thin fullerene layers studied by means of quartz micro-balance, S&A B. 1997. V. 42. P.11–13.
- 4. Schramm U., Meinhold D. et al. A QMB-based temperature-modulated ammonia sensor for humid air, S&A B. 2000. V. 67. P.219–226.

5. Bearzotti A., Fratoddi I., Palummo L., Petrocco S. Highly ethynylated polymers: synthesis and applications for humidity sensors, S&A. – 2001. – V. B76. – P.316–321.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 18.06.2004.

Ա.Ս. ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ, Վ.Մ.ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Զ.Ն. ԱԴԱՄՅԱՆ, Ա.Չ. ԱԴԱՄՅԱՆ, Վ.Գ. ԲԱՐԽՈՒԴԱՐՅԱՆ

ՀԱՄԱԿՇՌՎՈՂ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՆ ՏՎԻՉ՝ ԿՎԱՐՑԱՅԻՆ ՌԵՉՈՆԱՏՈՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

Առաջարկվում է կվարցային ռեզոնատորի հիման վրա աշխատող խոնավության տվիչ, որը կարող է աշխատել լայն ջերմաստիձանային տիրույթում։ Աշխատանքի սկզբունքը կվարցային ռեզոնատորներով երկու գեներատորների հաձախությունների տարբերության (որն ստացվում է խառնիչի միջոցով) չափումն է։ Երկու կվարցային ռեզոնատորները (զգայուն և հենքային) գտնվում են կողք-կողքի միննույն պայմաններում, ինչի շնորհիվ այնպիսի գործոնների ազդեցությունները, ինչպիսիք են ջերմաստիձանը, ձնշումը և սնման լարման փոփոխությունները համակշռվում են։ Այսպիսով, գեներատորների հաձախությունների տարբերությունը փոփոխություններ է կրում միայն շրջապատող օդի հարաբերական խոնավության փոփոխությունների հետևանքով։ Նկարագրվում է կվարցային ռեզոնատորի վրա խոնավազգայուն շերտի ստացման սկզբունքը, բերված են տարբեր ջերմաստիձաններում հաձախությունների տարբերության կախվածությունները խոնավությունից։

A.S. STEPANYAN, V.M. AROUTIOUNIAN, Z.N. ADAMYAN, A.Z. ADAMYAN, V.G. BARKHUDARYAN

QCM - BASED COMPENSATED HUMIDITY SENSOR

The humidity sensor on the quartz crystal microbalance (QCM) working in a wide temperature range is suggested. The principle of operation is the measurement of the two QCM oscillator frequency difference obtained by using a mixer. Both QCM-s (sensitive and reference) are located in the same conditions, due to what the influences of such factors as temperature, pressure, supply voltage variations, etc., are mutually compensated. Thus, the oscillator frequency difference is changed only due to the change of the relative humidity in the surrounding air. The principle of obtaining polymer-coated QCM-s is presented. The measured dependences of the frequency deviation on humidity at different ranges of temperature are given.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

ՀՏԴ 681.518 ԵՎ ՉԱՓԻՉ ՏԵԽՆԻԿԱ

ԳԻՏԱԿԱՆ ՍԱՐՔԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

Վ.Ս. ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ

ԹՎԱՆՇԱՆԱՅԻՆ ԿՈԴԻ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈԽՈՒՄԸ ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԱՉԴԱՆՇԱՆԻ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅԱՆ

Դիտարկված է թվանշանային կոդի` ժամանակային ազդանշանի տևողության ոչ գծային կերպափոխման մեթոդ, որը կարող է կիրառվել ոչ էլեկտրական մեծությունների տվիչների ոչ գծային ստատիկ բնութագրերի թվային գծայնացման խնդիրներում։

Առանցքային բառեր. ոչ գծային բնութագիր, հանող հաշվիչ, համախության բաժանիչ։

Տեխնոլոգիական գործընթացների ավտոմատացված համակարգերում կիրառվող տվիչների մեծ մասն ունի ոչ գծային ստատիկ բնութագիր։ Լայնորեն տարածված տեխնոլոգիական պարամետրերից է ջերմաստիձանը, որի չափման համար հիմնականում օգտագործվում են ջերմաէլեկտրական կերպափոխիչներ (ՋԿ) և դիմադրության ջերմակերպափոխիչներ (ԴՋ), որոնց ստատիկ բնութագրերը նորմավորված են ստանդարտներով ու տրված են աղյուսակային տեսքով [1,2]։ Նման համակարգերում հաձախ անհրաժեշտություն է առաջանում ստանալ չափվող մեծությանը համարժեք ժամանակային ազդանշան, որի միջոցով իրականացվում է ընդհատուն ցուցասարքերի կառավարումը [3]։ Համակարգերում օգտագործվող միևնույն անալոգաթվանշանային կերպափոխիչով (ԱԹԿ) կատարվում է տարբեր տվիչների ազդանշանների կոդավորում, հետևաբար ոչ գծային ստատիկ բնութագրերով տվիչների համար նպատակահարմար է օգտագործել ոչ գծային բնութագրով (գծայնացնող) "թվանշանային կոդ - ժամանակ" կերպափոխիչ։ Թվանշանային կոդի կերպափոխումը ժամանակային միջակայքի տևողության իրականացվում է հայտնի մեթոդով. հանման ռեժիմում աշխատող թվային հաշվիչում կերպափոխվող կոդը (N_x) գրանցելով և vo=const հաձախությամբ տակտային իմպուլսային ազդանշանների միջոցով հանում իրականացնելով այնքան ժամանակ, մինչև հաշվիչում ստացվի զրոյական վիճակ [4]։ Նման կերպափոխչի սխեման բերված է նկ.1-ում։



Սխեմայում կիրառվում է իմպուլսների հանող հաշվիչ (DD2), դրանում կերպափոխման ցիկլի սկզբում գրանցվում է կերպափոխվող N_x կոդը, և 'սկիզբ''ազդանշանով RS տրիգերը (DD4) բերվում է "0" վիճակի։ Ընդ որում, ազդանշանի $\overline{\mathbf{Q}}$ հակադարձ ելքում ձևավորվում է ստացվող ժամանակային ազդանշանի սկիզբը։ Այդ ազդանշանով միաժամանակ բացվում է 2ԵՎ (DD1) տրամաբանական տարրի վրա կառուցված էլեկտրոնային բանալին, և տակտային ազդանշանները մտնում են հաշվիչի հաշվային C մուտք։ N_x քանակությամբ իմպուլսներ հաշվիչ մտնելուց հետո հաշվիչում ստացվում է զրոյական վիճակ, իսկ նրա փոխանցման Po ելքում ձևավորվում է կարճ իմպուլսային ազդանշան, որը տրիգերին բերում է "1" վիճակի, էլեկտրոնային բանալին փակվում է և տրիգերի $\overline{\mathbf{Q}}$ ելքում ավարտվում է ժամանակային միջակայքի T_x տևողությանը համապատասխան ազդանշանի ձևավորումը՝

$$\mathbf{T}_{\mathbf{x}} = \mathbf{N}_{\mathbf{x}} / \mathbf{v}_{0} \,, \tag{1}$$

որտեղ N_x-ը կերպափոխվող կոդին համապատասխանող թիվն է, K_n=1/(օ-ը` կերպափոխման գործակիցը։

Մտացված արտահայտությունից հետևում է, որ vo=const դեպքում իրականացվում է կոդի գծային կերպափոխում ժամանակային տևողության։ Ոչ գծային կերպափոխում ստանալու համար անհրաժեշտ է կերպափոխման ընթացքում, կախված պահանջող ֆունկցիայից, իրականացնել տակտային իմպուլսների համախության համապատասխան ավտոմատ փոփոխություն ըստ հետևյալ արտահայտության՝

$$v_{\rm N} = N_{\rm x} / T_{\rm x} : \tag{2}$$

Հարկ է նշել, որ այստեղ կերպափոխման ֆունկցիան՝ $T(x) = \phi(N_x)$ -ը, պետք է լինի մոնոտոն և անընդհատ։

Տեղադրելով T_{*}-ի արժեքը վերջին արտահայտությունից (2)-ում` կստանանք.

$$v_{\rm N} = N_{\rm x} / \phi(N_{\rm x}) \,. \tag{3}$$

Տակտային իմպուլսների հաձախության ավտոմատ փոփոխման ապահովումը մեծ ձշտությամբ ըստ (3) արտահայտության, գործնականում գրեթե անհնար է։ Այդ պատձառով նպատակահարմար է կերպափոխման ֆունկցիան մոտարկել բեկյալով և մոտարկման յուրաքանչյուր j-րդ տիրույթում հաշվել տակտային իմպուլսների v_j հաձախությունը։ Քանի որ մոտարկման յուրաքանչյուր տիրույթում կերպափոխման ընթացքում ունենք N_x թվի փոքրացում՝ սկսած վերին N_j հանգուցային կետից մինչև ստորին N_{j-1} հանգույցային կետը, ուստի j-րդ մոտարկման տիրույթում տակտային իմպուլսների հաձախության համար կստանանը՝

$$v_{j} = \frac{\Delta N_{x}}{\Delta T_{x}} = \frac{N_{j} - N_{j-1}}{\phi(N_{j}) - \phi(N_{j-1})},$$
(4)

որտեղ φ(N_i)–ը մոտարկող բեկյալի j-րդ հանգուցային կետում կերպափոխման ֆունկցիայի արժեքն է։

Կերպափոխիչի սխեմայի պարզեցման համար նպատակահարմար է ընտրել ΔN_x=N_j-N_{j-1}=const: Եթե ΔN_x-ը տրված է երկուական կոդով, ապա անհրաժեշտ է ընտրել ΔN_x=2^m, իսկ երկուական-տասական կոդի դեպքում՝ ΔN_x=ո·10^m: Հաշվման ընթացքում հաշվիչում թվի արժեքի՝ հանգուցային կետերով անցման դեպքում գրաֆիկի վրա կատարվում է j տիրույթից անցում (j-1) տիրույթի։ Անցման ապացույց են փոփոխությունները հաշվիչի բարձր կարգերում, ուստի մոտարկման տիրույթի որոշման համար հարկավոր է օգտագործել հաշվիչի ելքերի բարձր կարգերը։ Մոտարկման յուրաքանչյուր միջակայքում հաշվիչի վիձակի փոփոխությունը որոշվում է 2^{m-1} (10^{m-1}) և ցածր կշռային գործակիցներով ելքերի կարգերով։ Երկուական կոդի դեպքում իմպուլսների հաձախության ավտոմատ փոփոխման համար կարելի է օգտագործել մուլտիպլեքսոր, որի հասցեային մուտքերին պետք է տալ հաշվիչի m և բարձր կարգերի ազդանշանները, իսկ մուլտիպլեքսորի ինֆորմատիվ եյքերի D_{i} մուտքերին՝ համապատասխան v_j հաձախությամբ տակտային ազդանշանները։ Ոչ գծային կերպափոխիչի սխեման բերված է նկ. 2-ում։





Պահանջվող v_j հաձախությամբ տակտային ազդանշաններ ստանալու համար օգտագործվում են G հենային հաձախությամբ գեներատոր և K_F բաժանման գործակիցներով հաձախության բաժանիչներ։ Կերպափոխման ձշտության բարձրացման նպատակով մոտարկող բեկյալը կարելի է անկացնել ոչ թե հանգուցային կետերով, այլ աղեղների բարձրության միջնակետերով և որոշել ժամանակային միջակայքի ձշտված տևողության արժեքը (T_j)։

Որպես օրինակ դիտարկենք XK ստատիկ բնութագրով ՋԿ-ի ջերմա-ԷլՇՈւ-ի կոդավորված արժեքների ոչ գծային կերպափոխումը ժամանակային ազդանշանի տևողության։ Ջերմազույգի ջերմա-ԷլՇՈւ-ն անմիջականորեն տրվում է ԱԹԿ-ի մուտքին, որի ելքում ստացվում է դրա երկուական կոդը։ Չափման տիրույթն ընդունենք 0-800 °С, 800*°C* ջերմաստիձանին համապատասխան ժամանակային իսկ սահմանային տևողությունը՝ t_{max}=100*մվ*։ Քանի որ մոտարկումը բեկյալով կատարվում է ըստ ջերմա-ԷլՇՈւ-ի կոդավորված արժեքի, նպատակահարմար է ջերմա-ԷլՇՈւ-ն կոդավորել այնպիսի մասշտաբային գործակցով (ես), որ վերջինիս սահմանային արժեքին համապատասխանի Nmax=215 արժեք։ Մոտարկումը բեկյալով ստացվում է բավարար Ճշտությամբ, եթե մոտարկման քայլն ընդունենք՝ $\Delta N=2^6$: Հետևաբար, անհրաժեշտ է որոշել ստացված հանգուցային կետերին համապատասխանող ջերմա-ԷլՇՈւ-ները (E_j) և վերջիններիս համապատասխանող ջերմաստիձանները (էյ)։ Տվյալ դեպքում մասշտաբային գործակիցն ըստ N_x–ի` (կոդի ցածր կարգի արժեքն ընդունում ենք 1 *մկՎ*)

$k_{u} = N_{max}/E_{max}=32768 / 66,442 = 439,182:$

Որոշենք ստացված ջերմա-ԷլՇՈւ-ներին համապատասխան ջերմաստիձանները՝ համաձայն ԳOUS 3044-94-ի։ Քանի որ չափման վերին սահմանին համապատասխանում է τ_{max}=100*մվ* ժամանակամիջոց, կերպափոխման գործակիցն ըստ ժամանակային տևողության՝

$$k_t = \tau_{max} / t_{max} = 100/800 = 0,125 \ uu / C.$$

Յուրաքանչյուր տեղամասում իմպուլսային ազդանշանների հաձախությունը կարելի է հաշվել հետևյալ արտահայտությամբ՝

$$v_{j} = \frac{\Delta N}{k_{t} \Delta t_{j}}$$

որտեղ Δt_i - ն մոտարկող բեկյալի գագաթներին համապատասխան ջերմաստիձանների տարբերությունն է։

Հաձախությունների հաշվարկային արժեքները բերված են աղյուսակում։ Ստացված հաձախությունները նպատակահարմար է ստանալ հաձախության քվարցային կայունացումով գեներատորից՝ կիրառելով հաձախության բաժանիչներ։ Որպես հաձախության բաժանիչ նպատակահարմար է կիրառել К155Լժ8 միկրոսխեման, որի միջոցով կարելի է ստանալ 1/64...63/64 արժեքով բաժանման գործակիցներ։ Հաշվարկների արդյունքում ստացվել է տ=366,159 *կՀց* հենային հաձախություն, իսկ դրան համապատասխան բաժանման գործակիցների արժեքները (kբաժ) ներկայացված են աղյուսակում։ Հաշվված և ներկայացված են նաև գծայնացման սխայանքները մոտարկման միջակայքերի ծայրակետերում (Δτծ=τծ.տես-τծ.հաշ) h միջնակետերում (Δτմիջ=τմիջ.տես-τմիջ.հաշ):

Ν	Е _j , <i>ú</i> Ч	t, <i>°C</i>	$\Delta t_{j}, \ ^{o}C$	v _j , <i>կՀg</i>	k բաժ	Δτδ, ਪੰਂਂ	$\Delta \tau_{\text{uhg}}, u q$	Т _х , <i>ú</i> 4
32768	66,442	800,000	48,600	337,117	59/64	0,064	0,042	99,936
30720	62,289	751,400	48,000	341,331	60/64	0,048	0,027	93,877
28672	58,137	703,399	47,682	343,609	60/64	0,019	0,021	87,906
26624	53,984	655,717	47,462	345,205	60/64	0,029	0,046	81,935
24576	49,832	608,256	47,257	346,699	61/64	0,068	0,045	75,964
22528	45,679	560,998	47,109	347,786	61/64	0,029	0,016	70,096
20480	41,526	513,889	47,041	348,290	61/64	0,008	0,002	64,228
18432	37,374	466,848	47,143	347,535	61/64	-0,004	-0,013	58,360
16384	33,221	419,705	47,436	345,393	60/64	-0,029	-0,001	52,492
14336	29,068	372,269	48,004	341,304	60/64	0,013	0,009	46,521
12288	24,916	324,265	48,870	335,256	59/64	-0,017	-0,026	40,550
10240	20,763	275,394	50,083	327,135	57/64	-0,066	-0,036	34,491
8192	16,611	225,311	51,768	316,487	55/64	-0,048	0,000	28,209
6144	12,458	173,543	54,059	303,074	53/64	-0,014	0,029	21,707
4096	8,305	119,483	57,274	286,062	50/64	-0,012	0,049	14,948
2048	4,153	62,209	62,209	263,371	46/64	-0,011	0,091	7,7871
0	0	0,000	48,600	337,117	0	0,000	0,042	0

Աղյուսակ

Աղյուսակից հետևում է, որ չափման հիմնական տեղամասերում հարաբերական սխալանքը չի գերազանցում 0,07%-ին։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. **ГОСТ 3044-94.** Преобразователи термоэлектрические. Номинальные статические характеристики преобразования.
- 2. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. ОТТ и методы испытаний.
- 3. Шахкамян А.С. Кодоуправляемый дискретный шкальный индикатор // Известия вузов. Приборостроение. 1987. -Т.30, N 3. С. 56-59.
- 4. Гитис Э.И., Пискунов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.12.2003։

В.С. АЛЕКСАНЯН

НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЦИФРОВОГО КОДА В ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ

Предложен метод нелинейного преобразования цифрового кода в интервал времени для монотонных функциональных зависимостей, который можно использовать для цифровой линеаризации нелинейных статических характеристик датчиков неэлектрических величин.

V.S. ALEKSANYAN

NONLINEAR TRANSFORMATION OF THE DIGITAL CODE INTO A TIME INTERVAL

A nonlinear transformation method of a digital code into a time interval for monotonous functional dependences is proposed. The method can be used for digital linearization of nonlinear static characteristics for nonelectric magnitude gauges.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.352/356

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Р.А. СИМОНЯН, О.А. МАРТИРОСЯН

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ В АМПЕР-ЧАСАХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЕК

Описано устройство для измерения емкости в ампер-часах как во время заряда от источника тока, так и во время разряда в режиме стабильного тока.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, ампер-час, напряжение, заряд, разряд.

Во время эксплуатации аккумуляторных батареек (АБ) происходит окисление решеток и разрыхление активной массы, особенно положительных пластин. Изменение объема активной массы при заряде и разряде батареек вызывает отслаивание массы от решеток. Кроме того, к ускоренному разрушению пластин приводит длительный перезаряд батареек, замерзание воды в электролите, короткое замыкание электродов батареек, длительная работа при повышенных значениях тока нагрузки, повышенная плотность и температура электролита, применение недистиллированной воды или химически нечистого электролита [1].

Разрушение пластин, в свою очередь, вызывает уменьшение ёмкости батареек, увеличение внутреннего сопротивления и, в конечном итоге, короткое замыкание разноимённых пластин, что означает выход из строя АБ.

Очевидно, что на любом этапе эксплуатации для контроля состояния АБ существенное значение имеет точное измерение ёмкости, что фактически является главным качественным показателем АБ.

Согласно Госстандарту, ёмкость АБ во время разряда определяется установкой полностью заряжённого аккумулятора в специальный режим разряда. При этом необходимо поддерживать разрядный ток постоянным и непрерывным при нормальном температурном режиме (20(С). В этом случае длительность процесса разряда может достигнуть 10 час [2]. Таким образом, измерение количества ампер-часов во время заряда и разряда является трудоёмкой работой.

В данной статье описано устройство для измерения ёмкости в ампер-часах как во время заряда от источника тока, так и во время разряда в режиме стабильного тока.

В режиме заряда устройство (см. рис.) работает следующим образом: аккумуляторная батарея подключается к клеммам К1 и К2, переключатель П1 устанавливается в положение 1. При этом клемма К1 через первую группу контактов соединяется с выходом источника тока заряда 1 и одновременно с входом выключателя зарядного режима 5. Ток заряда, проходя через резистор R_m, на его концах создаёт напряжение, пропорциональное току через него. Это напряжение усиливается и фильтруется от пульсации посредством усилителя – фильтра 4. Выход усилителя - фильтра 4 соединён через вторую группу контактов переключателя П1 со входом стабилизатора тока заряда, а также со входом измерителя ампер-часов. Измеритель ампер-часов заряда и разряда состоит из преобразователя напряжение - частота 9, счётчика импульсов 12, цифроаналогового преобразователя 15 и вольтметра постоянного тока 17. Во время процесса заряда выходное напряжение усилителя – фильтра 4 подключается к входу преобразователя напряжение – частота 9, а выходные импульсы преобразователя 9 вводятся в счётчик импульсов 12. Очевидно, что количество ампер-часов, полученных от источника тока 1 АБ, будет пропорциональным вводимому в счётчик количеству импульсов. Для удобства эксплуатации информация о количестве импульсов в счётчике 12 преобразуется в аналоговый сигнал цифро – аналоговым преобразователем 15 и измеряется магнитоэлектрическим измерителем постоянного тока 17.





Для стабилизации тока во время заряда один из входов дифференциального усилителя 8 соединён с выходом усилителя – фильтра 4, а второй – с выходом источника напряжения 7, имеющего цифровое управление. Усиленная разность напряжения с выхода усилителя 8 подаётся к одному из входов компаратора 11, ко второму входу подаётся выходное напряжение пилообразной формы с генератора 10, при этом частота пилообразного напряжения берётся удвоенной величины от сетевой частоты и строго синфазна с сетевым напряжением. Таким образом, на выходе компаратора 11 имеется широтно–импульсное модулированное напряжение, которое управляет углом открытия симистора при помощи симисторно–трансформаторного узла 18. При большом значении тока заряда симистор открывается под малым углом и пропускает почти весь полупериод. Если ток заряда аккумулятора больше заранее установленного значения, определяемого выходным напряжением источника 7, то соответственно угол открытия симистора увеличивается, а ток уменьшается. Для гальванической развязки силовой части с симистором от блока

управления использован высокочастотный трансформатор. Так как необходимо, с одной стороны, модулировать высокочастотное напряжение широтными импульсами, а с другой – управлять включением (выключением) процесса заряда, использован трёхвходовый логический умножитель 14, к первому входу которого поступает напряжение выхода генератора высокой частоты 13, ко второму – широтно–импульсное модулированное напряжение выхода компаратора 11, а к третьему – напряжение включения или выключения процесса заряда. Выходные импульсы логического умножителя 14 после усиления усилителем мощности 16 поступают на вход блока 18 для управления симистором через трансформатор.

Заряд аккумуляторных батареек сопровождается ростом напряжения на клеммах с тем, чтобы после полного заряда своевременно остановить процесс. К одному из входов второго компаратора 5 подаётся напряжение АБ через переключатель П 1 - 1, а ко второму – выходное напряжение источника напряжения 2. Таким образом, если напряжение на клеммах аккумулятора становится больше напряжения, определяемого источником 2, то на выходе компаратора 5 получается состояние логического нуля. В результате на выходе блока 14 устанавливается нулевое состояние, и процесс заряда прекращается. Во избежание колебательных процессов во время отключения компаратор 5 обладает гистерезисом.

Для определения количества полученных нагрузкой ампер–часов во время разряда аккумулятора переключатель П1 устанавливается в положение 2. В этом случае зажим К1 соединяется с одним входом стабилизатора тока 3. Второй вход соединён с выходом источника напряжения с цифровым управлением 7. При этом ток разряда определяется величиной напряжения источника 7. Ток, проходя через резистор R, создаёт напряжение, пропорциональное току через резистор, который усиливается и фильтруется усилителем 4. Это напряжение, будучи пропорциональным величине разрядного тока, проходя через блоки 9,12 и 15, преобразуется в напряжение, величина которого пропорциональна величине разрядных ампер-часов точно так же, как во время заряда, и измеряется вольтметром постоянного тока 17. Если из-за разряда напряжение на клеммах АБ становится меньше напряжения, обусловленного входным напряжением блока 6, подаваемым к третьему входу блока разряда, то блок разряда 3 переходит в пассивное состояние, и процесс разряда прекращается, а вольтметр 17 показывает величину ампер–часов, полученных нагрузкой до прекращения процесса. В этом положении прибор практически не потребляет ток, и процесс разряда завершается.

Разработанный прибор имеет следующие технические параметры: диапазон измерения ёмкости – 0,1...200 ампер-час; допустимая погрешность измерения \leq 1,5 %; величина стабилизированного тока в режиме заряда или разряда - 0...10 *А*; допустимая погрешность стабилизации - \leq 1%; дискретность установки тока заряда или разряда – 0,1 *А*; допустимая погрешность установки напряжения отключения режима заряда или разряда - 20 м*B*; разрядность индикации измеряемого параметра – 3,5.

Таким образом, разработанный измеритель позволяет в автоматическом режиме проводить точное измерение ёмкости в ампер-часах как во время заряда, так и в режиме разряда, что имеет существенное значение для объективной оценки качества аккумуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Тимофеев Ю.Л., Ильин Н.М.** Электрооборудование автомобиля, неисправности и техническое обслуживание. М.: Транспорт, 1981.-140 с.
- 2. Романов В.В., Хашев Ю.М. Химические источники тока. М.: Сов. радио, 1968. 378 с.

ИРФЭ НАН РА. Материал поступил в редакцию 10.02.2001.

Ռ.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Օ.Ա. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ԱԿՈւՄՈւԼՅԱՏՈՐԱՅԻՆ ՄԱՐՏԿՈՑՆԵՐԻ ՈւՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԱՄՊԵՐ-ԺԱՄԵՐԻ ՉԱՓՈՂ ՍԱՐՔ

Նկարագրված է ակումուլյատորային մարտկոցների ունակության ամպերժամերի ձշգրիտ չափող սարք։ Չափումը կատարվում է կայունացված հոսանքի ռեժիմում ակումուլյատորային մարտկոցների ինչպես լիցքավորման, այնպես էլ լիցքաթափման դեպքում։

R.H. SIMONYAN, O.A. MARTIROSSYAN

THE EQUIPMENT FOR MEASURING THE CAPACITY ON AMPER /HOURS FOR RECHARGEABLE BATTERIES

The precision equipment for measuring the capacity on Amper/hours for rechargeable batteries is described. The equipment conducts the measurement on Amper/hours in stabilized current in case of both charging and recharging regimes.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

*Հ*SԴ 621.315

ՌԱԴԻՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ

Լ.Ա. ՄԻՔԱՅԵԼՅԱՆ

ԽԱՌՆՈւՐԴԱՅԻՆ ԽՈՐԸ ԵՎ ԿՊՉՈւՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿՆԵՐ ՊԱՐՈւՆԱԿՈՂ ՍԻԼԻՑԻՈւՄ-ԿԱՐԲԻԴԱՅԻՆ ԴԱՇՏԱՅԻՆ ՏՐԱՆՉԻՍՏՈՐԻ ՍՏԱՏԻԿ ԲՆՈւԹԱԳՐԵՐԸ

Տեսականորեն հետազոտվել են սիլիցիում-կարբիդային Շոտկիի արգելքով կառավարվող դաշտային տրանզիստորներում ընթացող ֆիզիկական երևույթները ուղետարի տիրույթի կիսահաղորդչի արգելման գոտում լեգիրացնող խառնուրդների խորը և կպչուն մակարդակների առկայության դեպքում։ Բնութագրերի ուսումնասիրման և հաշվարկման համար առաջարկվել է նոր, ավելի ընդհանուր մոդել, որն ավելի Ճշգրիտ է բնութագրում ռեալ սիլիցիում-կարբիդային սարքերում ընթացող երևույթները։

Առանցքային բառեր. սիլիցիում կարբիդ, խառնուրդային խորը մակարդակ, կպչուն մակարդակ, աղքատացած շերտ, լիցքակիրների արագության հագեցում։

Մի շարք հիմնարար կառուցվածքային և էլեկտրաֆիզիկական կարևորագույն պարամետրերի (լայն արգելման գոտու՝ 2.2...3.2*էՎ*, մեծ ջերմահաղորդականության՝ ~ 5 *Վտ/Կսմ*, ծակման էլեկտրական դաշտի մեծ լարվածության՝ ~3.10⁶ *Վ/սմ*, աշխատանքային բարձր ջերմաստիձանների՝ ~900^oC, էլեկտրոնների հագեցման արագության մեծ արժեքի՝ V_s~2·10⁷ *սմ/վ*) շնորհիվ սիլիցիում-կարբիդը (SiC) շահեկանորեն տարբերվում է ներկայումս լայն կիրառում գտած Si, Ga As և մյուս կիսահորդչային նյութերից [1-2]:

Ներկայումս ինտենսիվ հետազոտություններ են կատարվում SiC-ին Շոտկիի և ուղղիչ հզոր դիոդների [3], p-i-n [4] դիոդների, լուսադիոդների [5], գազային և այլ տվիչների [6], բարձր հաձախականային հեղեղա- թռիչքային ինժեկցիոն և թունելաթռիչքային [6], դիոդների, տարբեր հետերո-կառուցվածքային սարքերի [7], երկբնեռ և դաշտային [8,9] տրանզիստորներում ընթացող ֆիզիկական երևույթների և այդ սարքերի բնութագրերի հաշվարկման, նախագծման, լավարկման ու մոդելավորման ուղղություններով։

Մասնավորապես, հիշյալ սարքերում ֆիզիկական ընթացող երևույթների վերլուծության և սարքերի պարամետրերի մոդելավորման և լավարկման ընթացքում միշտ ընդունվում է, որ լեգիրացնող խառնուրդները SiC-ում առաջացնում են ծանծաղ ջերմաստիձաններում իոնացված են) և մակարդակներ (որոնք բոլորը սենյակային բոյորովին հաշվի չի առնվում լայն արգելման գոտու և տեխնոլոգիայի անկատարելությամբ պայմանավորված տարբեր բնույթի կպչուն մակարդակների (թակարդների) առկայությունը։ Հայտնի է [10-12], օրինակ, որ SiC-ի համար որպես դոնորային լեգիրացնող խառնուրդ օգտագործվող ազոտն առաջացնում է մակարդակներ E_c-E_d~100...130 *մեՎ* էներգետիկ հեռավորությամբ, Al-ը՝ E_a-E_v~300...400 *մԷՎ* և այլն։ Այս մակարդակները ծանծաղ համարվել չեն կարող։ Դրանք հանդես են գալիս որպես խորը մակարդակներ։ Մյուս կողմից, հայտնի է [12], որ դեռևս SiC-ի տարբեր այլափոխությունների և դրանց լեգիրացման, ցանկալի կառուցվածքով և տարբեր արատների կառավարելի խտությամբ մոնոբյուրեղների աՃեցման տեխնոլոգիան չի հասել, օրինակ, Si-ի մակարդակին, և SiC բյուրեղները պարունակում են արատներով պայմանավորված տարբեր էներգետիկ բաշխվածությամբ կպչուն մակարդակներ (թակարդներ)՝ մինչև 6.10¹³ սմ⁻³ խտությամբ։

Հետևաբար, իրական SiC-ին սարքերում ընթացող էլեկտրա-ֆիզիկական երևույթների ուսումնասիրման, դրանց պարամետրերի ավելի Ճշգրիտ հաշվարկման և մոդելավորման, փորձնական և տեսական արդյունքների իրատեսական համեմատման համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել լեգիրացնող խառնուրդների 'խորը'' լինելու և արգելման գոտում անխուսափելիորեն գոյություն ունեցող թակարդների առկայությունը։

Այս աշխատանքում առաջին անգամ առաջադրվում և քննարկվում է SiC-ին Շոտկիի արգելքով կառավարվող դաշտային տրանզիստորներում ընթացող երևույթների և այդ սարքերի բնութագրերի վերլուծության ու հաշվարկման նոր, ավելի ընդհանուր մոտեցում, որում հաշվի են առնվում վերը նշված հանգամանքները։

Տեսական մաս։ Դիտարկեք դաշտային տրանզիստորի կտրվածքը (նկ.1)։ Ֆիզիկական երևույթների ավելի ձշգրիտ վերլուծության համար օգտվենք ուղետարի երկտիրույթային մոդելից [13,14]։ Կընդունենք, որ L₁ տիրույթում դաշտի լարվածությունը համեմատաբար փոքր է և լիցքակիրների շարժունակությունը կախված չէ դաշտից (μ₀-const) իսկ ուղետարի L₂ տիրույթում ՝

$$\mu = (\mathbf{E}) = \frac{\mu_0}{\left[1 + \left(\frac{\mu_0 \mathbf{E}_y}{\mathbf{V}}\right)^m\right]^{1/m}},$$
(1)

որտեղ (օ-ն լիցքակիրների (էլեկտրոնների) շարժունակությունն է ցածր լարվածությամբ դաշտում, V_s–ը՝ էլեկտրոնների հագեցման արագությունը, E_y-ը՝ էլեկտրական դաշտի լարվածությանը ուղետարի երկայնքով, իսկ m \leq 1 [11]։ Ընդունենք նաև, որ դոնորային N_d մակարդակները խորն են և արգելման գոտում առկա են էլեկտրոնային կպչուն մակարդակներ N_r խտությամբ և հաղորդականության գոտուց E_r էներգետիկ հեռավորությամբ։ Ըստ այս մոդելի, սենյակային ջերմաստիձաններում ոչ բոլոր դոնորները կլինեն իոնացված և, եթե, /E_d - E_t/<< /E_c - E_d/ կամ /E_d - E_t/<< /E_c – E_t/, ապա ցածր ջերմաստիձաններում թակարդները մշտապես զբաղված կլինեն էլեկտրոններով, իսկ բարձր ջերմաստիձաններում էլեկտրոններն իրենց հերթին նաև հաղորդականության գոտու հետ)։ L₁-տիրույթում, որտեղ դաշտի լարվածությունը հաստատուն է և անկախ է ուղետարում դաշտի լարվածությունից։ Ողետարի L₂ տիրույթում էլեկտրական դաշտի լարվածությունից։

Եթե դոնորների խտությունը Ν₄ է, ապա իոնացված դոնորների համար կունենանք՝

$$N_{d}^{+} = (N_{d} - n_{-})(1 - b), \qquad b = \frac{1}{1 + gep(\frac{E_{d} - E_{Fi}}{KT})}$$
(2)

որտեղ g=2 դոնորների համար, $E_{\rm Fi}$ -ն ֆերմիի էներգիան է սեփական կիսահաղորդչում, kն՝ Բոլցմանի հաստատունը, T-ն՝ բացարձակ ջերմաստիձանը (երբ դոնորները ծանծաղ են՝ E_d-E_{Fi}>>kT, N⁺d \approx Nd), n_{-} -ը՝ թակարդների վրա գրավված էլեկտրոնների խտությունը։



Նկ.1. Տրանզիստորի սխեմատիկ կտրվածքը (ա) և Էլեկտրական դաշտի բաշխումը (բ) Սց և Ud լարման կիրառման ռեժիմում

Մյուս կողմից, դոնորային խորը և կպչուն մակարդակների համար կինետիկ

$$\frac{\partial \mathbf{n}_{-}}{\partial t} = S_{n} V_{n} N_{d} (N_{t} - n_{-}) - n_{-} V_{n} S_{n} N_{t} f_{t}, \qquad (3)$$

հավասարումից, որտեղ ք.–ն թակարդների բաշխման ֆունկցիան է, N_t –ն` թակարդների խտությունը, S_n-ը` լիցքակիրների գրավման կտրվածքը, V_n–ը` լիցքակիրների ջերմային արագությունը, թերմոդինամիկ հավասարակշռության` $\frac{\partial n_{-}}{\partial t} = 0$ պայմանից կստանանք՝

$$n_{-} = \frac{N_{d}}{2} \left(\sqrt{1 + 4\beta} - 1 \right), \qquad (= \frac{N_{t}}{N_{d}}:$$
(4)

Հետևաբար, փականի տակ ծավալային դրական լիցքի խտության համար կունենանք՝

$$qN_1 = q N_d^+,$$
 (5)

N₁ = N_d(1 - b) (1 - 0.5N_d
$$\beta_t$$
), (t = $\sqrt{1+4\beta}$ -1:

Տրանզիստորի նորմալ աշխատանքային ռեժիմում փականի տակ, ակունքի տիրույթում, X₁ աղքատացած շերտի և արտաբերի մոտ՝ X₂ աղքատացած շերտի հաստությունները հաշվարկելու համար անհրաժեշտ է լուծել Պուասոնի հավասարումը։

Առաջարկվող մոդելում հաշվի է առնվել նաև, որ փականին հակառակ լարում կիրառելու և այն մեծացնելու ժամանակ, թակարդային այն մակարդակները, որոնք աղքատացած շերտի ընդարձակման և էներգետիկ գոտու խիստ ծոման հետևանքով ընկնում են Ֆերմիի էներգիայից վերև, նրանք նունպես կարող են գտնվել դատարկ վիձակում։ Այսինքն, աղքատացման շերտի ձևավորմանը լրացուցիչ 'կմասնակցեն'' նաև այն թակարդային մակարդակները, որոնք փականի լարման ազդեցության տակ կներգրավվեն $\frac{x_0}{2}$ կամ $\frac{x_0}{2}$ շերտերում, ազատվելով գրավված լիզբերից։

կներգրավվեն
$$\frac{-6}{x_1}$$
 կամ $\frac{-6}{x_2}$ շերտերում, ազատվելով գրավված լիցքերից։

xօ-ն, փականի զրոյական լարման տակ աղքատացած շերտի հաստությունն է,

$$\mathbf{x}_{0} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{1}\mathbf{U}_{bi}}{qN_{1}}},\tag{6}$$

որտեղ $\mathbf{\varepsilon}_1 = \mathbf{\varepsilon}_0 \mathbf{\varepsilon}_s$ կիսահաղորդչի դիէլեկտրիկ թափանցելիությունն է, $\mathbf{\varepsilon}_0$ -ն՝ վակուումի դիէլեկտրիկ հաստատունը, U_{bi}-ն՝ մետաղ-կիսահաղորդիչ կոնտակտային պոտենցիալների տարբերությունը։

Լուծելով Պուասոնի հավասարումը (2)-(6) պայմանների հաշվառմամբ, ակունքի *հ* և արտաբերի *հ* մոտ աղքատացած շերտերի (նորմավորված ըստ ուղետարի *և* հաստության) հաստության համար համապատասխանաբար կստանանք՝

$$h_{s} = \frac{x_{1}}{\ell} = \frac{\Psi}{\sqrt{1-b}} \sqrt{\frac{4(U_{bi} + U_{g})}{U_{bi}}} + \frac{\Psi}{\sqrt{1-b}} \left[\gamma(1-H_{t}) - H_{t} \sqrt{\frac{4(U_{bi} + U_{g})}{U_{bi}}} \right], \quad (7)$$

$$h_{d} = \frac{\Psi}{\sqrt{1-b}} \sqrt{\frac{4(U_{bi} + U_{g} + U_{d})}{U_{bi}}} + \frac{\Psi}{\sqrt{1-b}} \left[\gamma (1-H_{t}) - H_{t} \sqrt{\frac{4(U_{bi} + U_{g} + U_{d})}{U_{bi}}} \right]:$$
(8)

$$\Psi = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{2\epsilon_1 U_{bi}}{qN_d}}, \ \gamma = \frac{\beta_t}{2(1-b)(1-\beta_t/2)} H_t = \frac{b\beta_t}{2(1-b)} + \frac{3b^2\beta_t^2}{16(1-6)^2}, U_g - u \ u \ U_d - u$$

համապատասխանաբար փականին և ակունքին կիրառված լարումներն են, Ս(Լւ)-ը` Լւ տիրույթի լարման անկումը։

Համանման ձևով կորոշվի նաև ուղետարի Լւ տիրույթի վերջում, հագեցման ռեժիմի սկզբին համապատասխանող ընթացիկ *հ*ւ աղքատացած շերտի հաստությունը։

Վոլտ-ամպերային բնութագիրը։ Եթե արտաքին կիրառված Ս₄ լարումը փոքր է և լիցքակիրները ուղետարում չեն հասել հագեցման (փականի Ս₈ լարումը նույնպես փոքր է), ապա L₁ տիրույթի հոսանքը՝

$$I_{d}(U_{g},U_{d})=I_{p}\frac{\left(\frac{L}{L_{1}}\right)\left[3\left(h_{1}^{2}-h_{s}^{2}\right)-2\left(h_{1}^{3}-h_{s}^{3}\right)\right]}{1+\beta\left(\frac{L}{L_{1}}\right)\left(h_{1}^{2}-h_{s}^{2}\right)},\beta=\frac{qN_{1}\ell^{2}\mu_{0}}{2\varepsilon_{1}L\nu_{s}},I_{p}=\frac{q^{2}N_{1}^{2}\mu_{0}z\ell^{3}}{6\varepsilon_{1}L},$$
(9)
540

որտեղ Լ-ը ուղետարի երկարությունն է (L=L1+L2), z-ը` փականի լայնությունը։ Օգտվելով (8) հավասարումից, U(L1)-ի համար կստանանք

$$U(L_1)_{1=} \frac{\ell N_1}{2\varepsilon_1} \Big[h_1^2 \ell \mp h_s \, \varkappa_0 \Big] - \Big(U_g + U_{bi} \Big): \tag{10}$$

Այդ կետին համապատասխանող (հագեցման) հոսանքը՝

$$I_{d}(L_{1}) = q N_{1} z \ell \chi (L_{1})(1 - h_{1}), \qquad (11)$$

որտեղ $\, \chi$ -ն արագության հագեցման գործոնն է՝ $\, \chi \leq 1 \, [10,12] :$

Հավասարեցնելով (9) և (11) արտահայտությունները, կորոշենք L_ տիրույթի երկարությունը (ուղետարի y_ ուղղությամբ).

$$L_{1} = BL \left\{ \frac{\left(h_{1}^{2} - h_{s}^{2}\right) - \frac{2}{3}\left(h_{1}^{3} - h_{s}^{3}\right)}{\vartheta(1 - h_{1})} - \left(h_{1}^{2} - h_{s}^{2}\right) \right\}^{2}$$
(12)

(12) հավասարումն անբացահայտ հավասարում է, որում ունենք 2 անհայտ՝ հւ, Լւ։ ՎԱԲ-ի և տրանզիստորի մյուս բնութագրերի հաշվառման և վերլուծության համար անհրաժեշտ է այդ պարամետրերի միջն ունենալ ևս մի հավասարում։ Այդ հնարավորությունն ընձեռում է փականի տակ պոտենցիալի ներկայացման երկչափ մոդելը, որը և կիրառվել է սույն աշխատանքում։

Ընդունելով, որ փականի տակ պոտենցիալի բաշխումը երկչափ է, Պուասոնի հավասարման համար կունենանք՝

$$\frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U(x, y)}{\partial y^2} = -\frac{qN_1}{\varepsilon_1},$$
(13)

որտեղ x-ը հոսանքի հոսմանն ուղղահայաց ուղղությունն էր՝ հաշված Շոտկիի արգելքից (փականից)։

y'=y-L₁ կոորդինատի ձևափախություն շնորհիվ (13) հավասարումը վերածվում է Հապլասի հավասարմանը [16]։ Այնուհետև, որոշելով $\phi(y', x)$ ֆունկցիան որպես՝

$$\varphi(\mathbf{y}', \mathbf{x}) = U(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \frac{qN_1}{2\varepsilon_1} \mathbf{x}^2, \qquad (14)$$

և տեղադրելով (14) –ի մեջ, կստանանք հավասարում, որի լուծումն ունի հետևյալ տեսքը՝

$$\frac{\partial \varphi(\mathbf{y}', \mathbf{x})}{\partial \mathbf{y}}\Big|_{\mathbf{y}'=0} = \frac{\partial U(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial \mathbf{y}}\Big|_{\mathbf{y}=L_1} = E_s = A_0 D_0 \frac{\pi}{W(\mathbf{y}_1)} \cos\left(\frac{\pi \mathbf{x}}{2W(\mathbf{y}_1)}\right):$$
(15)

Հաշվի առնելով, որ երբ y=L, x=W(yı) և W(yı)=hı ℓ վիճակում U(L,W(yı))=Ud, վերջականապես կստանանք՝

$$U(L,h_{1}) = \frac{2E_{s}h_{1}\ell}{\pi} \sinh\left[\frac{\pi(L-L_{1})}{2h\ell}\right] + \frac{qN_{1}h_{1}^{2}\ell^{2}}{2\varepsilon_{1}}x - (U_{g}+U_{bi}) = U_{d}:$$
(16)

L₁-ի և հ₁-ի միջև ունենք $(U(L,h_1)=U_d)$ տրված յուրաքանչյուր արժեքին համապատասխան) կապ, որն օգտագործելով, (12) հավասարման միջոցով կարող ենք որոշել L₁-ը իսկ այնուհետև՝ (11) հավասարման օգնությամբ ՎԱԲ-ը հագեցման տիրույթում։

Անհրաժեշտ է նշել, որ (6)- (17) հավասարումները, որպես մասնավոր դեպքեր, ներառում են տարբեր հեղինակների [10-14] կողմից ստացված արդյունքները, երբ ընդունում ենք որ բոլոր դոնորային մակարդակները ծանծաղ են (և, հետևաբար՝ իոնացված), իսկ ուղետարի տիրույթում բացակայում է կպչուն (թակարդային) որևէ մակարդակ։

Արդյունքների քննարկում Տեսական հաշվարկները կատարվել են 4H-*SiC*-ային (6H-*SiC*-ային) Շոտկիի արգելքով կառավարվող դաշտային տրանզիստորների հետևյալ պարամետրերի համար. (N_d=1.7.10¹⁷ *uմ* ⁻³, L=0.3 *մկմ*, l=0.26 *մկմ*, Z = 0.0332 *uմ*, v_{tn} =0.8.10⁷ *ud/վ*, ε =9.7, v_s =2.10⁷ *ud/վ*, ΔE_t =0.26 *է4*,

ա) բերում է ակունքի և արտաբերի մոտ աղքատացած շերտերի հաստության աձման,

բ) փականի ավելի փոքր լարմամբ ուղետարի հաղորդականության փոփոխման (այսինքն, մեծանում է ուղետարի հաղորդականության մոդուլյացիայի խորությունը),

գ) ուղետարի ընդհանուր հոսանքի և հագեցման տիրույթի ծռման կետի (արտաբերի հագեցման լարման) արժեքի նվազման։

Համեմատության համար նկ.2-ում պատկերված է տեսական ՎԱԲ-ի տեսքն ըստ վերը նշված պարամետրերի, երբ ընդունվում է, որ բոլոր դոնորներն իոնացված են և կիսահաղորդչի արգելման գոտում բացակայում են թակարդները (հաստ կետագծերով), իսկ նուրբ կետագծերով պատկերված է մեր կողմից առաջարկված մոդելի համապատասխան ՎԱԲ-ը, փորձնական ՎԱԲ-ը [12,14] պատկերված է (հոծ գծերով)։ Ինչպես հետևում է նկ.2-ից, առաջարկված մոդելը բավականաչափ ձշգրտորեն համընկնում է փորձնական ՎԱԲ -ի հետ՝ ի տարբերություն դասական մոտավորությամբ հաշվարկված ՎԱԲ-ի։ Ստացված արդյունքները կարելի է կիրառել *SiC*-ային այլ սարքերի բնութագրերի հետազոտման և նախագծման համար։



Նկ.2.Տրանզիստորի վոլտ-ամպերային բնութագրերը փականի լարման տարբեր արժեքների դեպքում (հոծ գիծ՝ փորձնական ՎԱԲ-ը [10-12,14], նուրբ կետագծեր՝ առաջարկված մոդելով հաշվարկված ՎԱԲ-ը, հաստ կետագծեր՝ դասական մոդելով հաշվարկված ՎԱԲ-ը)

ԳՐԱԿԱՆՈւԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- Casady J. B., Johnson R.W. Status of Silicon Carbide as a Wide-Bandgap Semiconductor For High-Temperature Applications // Sol. St. Electron. –1996. – P. 1409-1422.
- Baliga B.J. Trends in Power Semiconductor Devices // IEEE Tranc Electron Devices. –1996. P. 1717-1731.
- Badila. M., Tudor B., Brezeanu Gh. et al. Current-voltage characteristics of large area 6H-SiC pin diodes // Material Science and Engineering B61-62. –1999. – P. 433-436,.
- 4. Futagi T., Matsumoto T., Katsuno M. et al. Visible light emission from a *pn* junction of porous silicon and microcrystalline silicon carbide // Appl. Phys. Lett. 1993. –P.1209-1211.
- 5. Spetz A. L., Tobias P., Baranzahi A. et al. Current Status of Silicon Carbide Based High-Temperature Gas Sensors // IEEE Trans. ED. –1999. – P. 561-566.
- Aroutiounian V. M., Buniatyan V.V., Soukiassian P. Microwave Characteristics of BARITT Diodes Based on Silicon Carbide // IEEE Trans. Electron Devices. –1999. – P.585-588.
- Yuan L., Cooper J. A. Jr., Webb K. J. and Melloch M. R. Demonstration of IMPATT Diode Oscillators in 4H-SiC // Material Science Forum. – 2002. – P.1359-1362.
- Aroutiounian V.M., Buniatyan V.V., Soukiassian P. On Silicon Carbide 10 heterostructure BARITT diodes // Proc. ISDRS. Dec. 1-3, WA. USA. – 1999. – P.359-363.
- 9. Song, S.-Ho and Kim D. M. A novel analytical model for short channel heterostructure field effect transistors. Solid-St. Electron. 1998. P.605-612.
- 10. Chiang T.K., Wang Y. H., Houng M.P. Modeling of threshold voltage and subthreshold swing of short-channel SOI MESFETT's // Solid-St. Electron. 1999. P.123-129,
- Murry S. P., Roeneker K.P. An analytical model for SiC MESFETs // Solid-St. Electron. –2002. – P.1495-1505,
- 12. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices. Second Ed. J.Wiley & Sons. 1981. 868 p.

- 13. Achtziger N., Grillenberger Y., Uhrmacher M. and Witthuhn W. On the existence of deep levels of the acceptors Ga and In and of the potential double acceptors Zn and Cd in SiC // Material Science Forum. 2000. P.749-752.
- 14. **Trew R.J.** Experimental and simulated results of SiC microwave power MESFETs // Phys. Stat. Sol. –1997. P. 409 419.

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 20.07.2004։

Л.А. МИКАЕЛЯН

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРБИД - КРЕМНИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ И УРОВНЯМИ ПРИЛИПАНИЯ

Теоретически исследованы физические процессы, происходящие в SiC полевых транзисторах с барьером Шоттки (ПТШ) при наличии глубоких уровней и уровней прилипания (центры захвата) в запрещенной зоне полупроводника. Предложена новая модель, позволяющая более точно характеризовать физические процессы, происходящие в реальных SiC ПТШ.

L.A. MIKAYELYAN

THE STATIC CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY BARRIER MESFET'S WITH THE DEEP IMPURITY AND TRAP LEVELS

The physical processes in the Schottky barrier MESFET's are theoretically examined, when the deep impurity and trap levels in the bandgap of channel are present. A new common model allowing to characterize more exactly the processes which take place in real SiC MESFET's is suggested.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

ՀՏԴ 621.396:681.3

ՌԱԴԻՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ

ኒ.ኒ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

ԹՎԱՅԻՆ ԿՈՄՊԱՆԴԵՐ

Դիտարկվում է թվային կոմպանդերի կառուցման եղանակ, առաջարկվում են վերջինիս գործնական իրականացման ալգորիթմը և սխեման։

Առանցքային բառեր. անալոգա-թվային կերպափոխիչ, սեղմիչ, ընդարձակիչ, կոմպանդեր, թվային կոմպանդեր։

Անալոգային ազդանշանի թվայնացումը ժամանակակից թվային բարձր տեխնոլոգիաների կենտրոնական գործընթացներից է և լայնորեն կիրառվում է կապի համակարգերում, բարձրորակ տեսա-ձայնագրման վերարտադրման nι ռադիոհեռասարքերում և այլն։ Մակայն անալոգային ազդանշանի թվային կերպափոխման (ԱԹԿ) ժամանակ անխուսափելիորեն առաջանում է աղմուկ, որի մեծությունը, հետևաբար և համակարգի խանգարակայունությունը, կախված է քվանտացման քայլի մեծությունից, իսկ աղմուկի հզորությունն ուղիղ համեմատական է քայլի մեծության քառակուսուն [1]։ Այդ պատձառով մեծ ամպլիտուդով ազդանշանները կոդավորվում են բարձր (նույնիսկ հավելյալ) Ճշտությամբ, մինչդեռ փոքր ամպլիտուդով ազդանշանները, որոնք համաչափելի են քվանտացման քայլի հետ, թվայնացվում են շատ մեծ սխալներով կամ պարզապես կարող են կորչել աղմուկի մեջ` դրանով իսկ խափանելով համակարգի բնականոն աշխատանքը։ Խնդրի լուծման երկու Ճանապարհ գոյություն ունի։

1. Փոքրացնել քվանտացման (քայլն այնքան, որպեսզի այն շատ ավելի փոքր լինի նվազագույն ազդանշանի ամպլիտուդից՝ ∆<<Ս_{min}, իսկ դա նշանակում է մեծացնել կոդի կարգայնությունը։ Մասնավորապես ո≥12 կարգայնությամբ կոդերի դեպքում խոսքի թվայնացումը և հետադարձ վերականգնումը կատարվում են բավարար որակով [2]։ Մակայն դա հանգեցնում է սարքավորումների բարդացման, կապուղիների քանակի ավելացման (զուգահեռ հաղորդման ժամանակ) կամ ազդանշանների հապաղման (հաջորդական հաղորդման ժամանակ)։ Ուստի այս եղանակը կարելի է գործածել ոչ արագագործ համակարգերում։

2. Հեռահաղորդակցության բնագավառում այս խնդրի լավագույն լուծումը ազդանշանների սեղմումն է (կոմպրեսում) ԱԹԿ -ից առաջ և համապատասխան ընդարձակումը (էքսպանդերում) ընդունող ծայրում թիվ-անալոգային կերպափոխման (ԹԱԿ) ժամանակ։ Այս երկու գործողությունները՝ կոմպրեսում-էքսպանդերում կոչվում է կոմպանդավորում։

Կան կոմպանդավորման բազմաթիվ եղանակներ։ Մշակված են և լայնորեն կիրառվում են անալոգային կոմպանդերներ իրենց առավելություններով և թերություններով [3]։ Սակայն շատ քիչ են հետազոտված և սակավ էլ կիրառվում են թվային կոմպանդերները։ Թվային կոմպանդերներում անալոգային ազդանշանները թվայնացվում են մեծ կարգայնությամբ կոդերով (n≥12), այնուհետև դրանք սեղմվում են, այսինքն նվազեցվում է կարգայնությունը (օրինակ m=8), այնուհետև ավելի քիչ թվով կապուղիներով (կամ ավելի կարՃ ժամանակամիջոցում) հաղորդվելով, ընդունող մուտքում համապատասխանաբար ընդարձակվում և վերականգնվում են նախնական կոդերը, որոնք այնուհետև կերպափոխվում են անալոգային ազդանշանի։ Աշխատանքում առաջարկվում է թվային կոմպանդավորման եղանակ և համակարգչային մոդելավորման միջոցով ցուցադրվում է վերջինիս օգտագործման շահեկանությունը աղմուկի նվազեցման և, հետևաբար, ազդանշանների աղավաղումների նվազեցման տեսակետից։

Նվազագույն աղավաղումներ ապահովելու նպատակով իբրև ելակետային դրույթ ընդունենք, որ մեծ թվային կոդից ավելի փոքրին անցնելիս, անհրաժեշտ է (բայց ոչ բավարար), որ դրանք լինեն հաստատուն ամբողջ դինամիկ տիրույթում։ Այս պայմանն իրականացնող ալգորիթմը հետևյալն է. կոմպանդերի մուտքային կոդի կարգերի թիվը նշանակենք ո-ով, իսկ ելքային կոդի կարգերի թիվը՝ m-ով (n > m), ելքային կոդի տարրերը նշանակենք Y-ով, մուտքայինինը՝ X-ով։ Ազդանշանի ամենափոքր կոդավորված I և II արժեքներին (00000, 00001) , ինչպես նաև ամենամեծ արժեքին (11111) համապատասխանեցնենք ելքային կոդի համապատասխանաբար 000, 001 և 111 արժեքները [4]։

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{0} &= \mathbf{X}_{0} \quad (000 = 00000), \\ \mathbf{Y}_{1} &= \mathbf{X}_{1} \quad (001 = 00001), \\ \mathbf{Y}_{(2^{m}-1)} &= \mathbf{X}_{(2^{n}-1)} \quad (111 = 11111): \end{aligned} \tag{1}$$

կոդերին համապատասխան ելքային կոդեր ստանալու Մնացած 2^m-3 համար սկզբունքով, առաջնորդվում ենք այն որ յուրաքանչյուր ելքային կոդին համապատասխանող անալոգային ազդանշանի կերպափոխման սխալանքը բացարձակ արժեքով չգերազանցի նույն հաստատուն թիվը` ±k: Դրանից բխում է, որ ելքային կոդի յուրաքանչյուր արժեքին համապատասխանող անալոգային ազդանշանի ամպլիտուդի և նախորդ կոդին համապատասխանող անալոգային ազդանշանի ամպլիտուդի հարաբերությունը պետք է լինի հաստատուն թիվ |K|, այսինքն`

$$\begin{array}{l} Y_{0} = X_{0} \\ Y_{1} = X_{1} = (2^{n} - 1)^{-1} \\ Y_{2} = Y_{1} \cdot k \\ Y_{3} = Y_{2} \cdot k \\ \cdots \\ Y_{2^{m} - 1} = Y_{2^{m} - 2} \cdot k \end{array} \right) \Rightarrow Y_{2^{m} - 1} = Y_{1} \cdot k^{2^{m} - 2} \Big| \Rightarrow k = \sqrt[2^{m} - 2]{2^{n} - 1} : \quad (2)$$

$$\begin{split} Y_i &= Y_1 \cdot k^{i-1} \text{ -nud} \ (i=1 \dots 2^{m}-1 \) \text{ why many helind } Y_1 - \text{p}, \text{ yuomuluuly } Y_i = (2^n-1)^{\frac{|i|-2^m}{2^m-2}}, \\ \text{npwhat } Y_i - \text{h true helph i-ph yund } \text{t}, \text{ n-p' unupull yund } \text{yund } \text{yun$$
Քանի որ Y₀=X₀ , Y₁=X₁ , Y_(2^m-1)=X_(2ⁿ-1) , ապա Y₀=000 ելքային զրոյական կոդին համապատասխանում է X₀=00000 մուտքային զրոյական կոդը, Y₁=001-ին համապատասխանում է X₁=00001-ը և Y₇=111–ին X₃₁=11111–ը :

Y₂ –ից մինչև Y₆ –ը հաշվում ենք հետևյալ բանաձևերով.

$$\begin{split} Y_{i} &= (2^{n} - 1)^{\frac{i+1-2^{m}}{2^{m}-2}}, \quad \text{tpt} \left[(2^{n} - 1)^{\frac{i+1-2^{m}}{2^{m}-2}} \right] > \left[i \cdot \frac{1}{2^{n}-1} \right], \\ Y_{i} &= i \cdot \frac{1}{2^{n}-1}, \qquad \text{tpt} \left[i \cdot \frac{1}{2^{n}-1} \right] > \left[(2^{n} - 1)^{\frac{i+1-2^{m}}{2^{m}-2}} \right]. \end{split}$$
(3)

Դրանք են՝ Y₂=0,064516, Y₃=0,101334, Y₄=0,179605, Y₅=0,318331, Y₆=0,564208:

Ստորև բերված են X-երի արժեքներն ըստ (3) բանաձևերի և դրանց համապատասխանող կոդերը։

					Աղյուսակ
Xi	n [2]	n [10]	X _i	n [2]	n [10]
X0	00000	0=0,000000	X16	10000	16/(32-1)=0,516129
X1	00001	1/(32-1)=0,032258	X17	10001	17/(32-1)=0,548387
X2	00010	2/(32-1)=0,064516	X18	10010	18/(32-1)=0,580645
X3	00011	3/(32-1)=0,096774	X19	10011	19/(32-1)=0,612903
X4	00100	4/(32-1)=0,129032	X20	10100	20/(32-1)=0,645161
X5	00101	5/(32-1)=0,161290	X21	10101	21/(32-1)=0,677419
X6	00110	6/(32-1)=0,193548	X22	10110	22/(32-1)=0,709677
X7	00111	7/(32-1)=0,225806	X23	10111	23/(32-1)=0,741935
X8	01000	8/(32-1)=0,258064	X24	11000	24/(32-1)=0,774193
X9	01001	9/(32-1)=0,290322	X25	11001	25/(32-1)=0,806451
X10	01010	10/(32-1)=0,322580	X26	11010	26/(32-1)=0,838709
X11	01011	11/(32-1)=0,354838	X27	11011	27/(32-1)=0,870967
X12	01100	12/(32-1)=0,387096	X28	11100	28/(32-1)=0,903225
X13	01101	13/(32-1)=0,419354	X29	11101	29/(32-1)=0,935483
X14	01110	14/(32-1)=0,451612	X30	11110	30/(32-1)=0,967741
X15	01111	15/(32-1)=0,483870	X31	11111	1=1,000000

Եթե ստացված արժեքը գտնվում է երկու հարևան կոդերի միջև, ապա վերցվում է մեկ կարգով բարձր կոդը։

-	Y ₀ =000 –ը համապատասխանում է X ₀ = 00000 –ին,
-	Y₁=001 – ր համապատասխանում է X₁ = 00001 – ին,
$Y_2=0.064516 (0.064516 -> 00010),$	Y ₂ =010 – ը համապատասխանում է X ₂ = 00010 – ին,
$Y_3=0.101334 (0.129032 -> 00100),$ $Y_{-0.170605} (0.103548 > 00110)$	$Y_3=011 - n$ hամապատասխանում է X ₄ = 00100 - hu,
$Y_4 = 0.179005 (0.193548 -> 00110),$ $Y_5 = 0.318331 (0.322580 -> 01010)$	Y_4 =100 – μ hամապատասխանում է X ₆ = 00110 – μ ₆ ,
$Y_6=0.564208 (0.580645 -> 10010).$	Y₅=101 – ը համապատասխանում է X₁₀=01010 – ին,
-	Y ₆ =110 – ը համապատասխանում է X ₁₈ =10010 – ին,
	$Y_7 = 111 - p$ hամապատասխանում է $X_{31} = 11111 - h$ ն:

Կապուղով հաղորդվում են Y0...Y7 կոդերը, իսկ կապուղու ելքում դրված էքսպանդերը 3 կարգանի կոդը կերպափոխում է 5 կարգանի կոդի նույն համապատասխանությամբ, որը կիրառում էր կոմպրեսորը։

Նկ. 1-ում պատկերված է թվային կոմպանդերի միջոցով հաղորդվող ազդանշանի սխեման (դիտված ո=3, m=5 օրինակի համար)։



Նկ. 2 ա -ում պատկերված է անալոգային ազդանշանի (բարակ գիծ) կերպափոխումը թվային ազդանշանի՝ 3 կարգանի ԱԹՓ –ի օգնությամբ (հոծ բեկյալ գիծ), իսկ նկ. 2 բ–ում՝ նույն ազդանշանի կերպափոխումը թվային ազդանշանի՝ 5 կարգանի ԱԹՓ–ի միջոցով, ապա թվային կոմպանդերի օգնությամբ կերպափոխումը 3 կարգանի թվային ազդանշանի և կապուղու ելքում վերջինիս վերականգնումը 5 կարգանի կոդով (հոծ բեկյալ գիծ)։ Երկու դեպքերում էլ բացակայում է ելքային ցածր համախության զտիչը։

Նկ. 2–ից պարզ երևում է, որ ո=3 կարգանի կոդով թվայնացման ու հաղորդման դեպքում ազդանշանի որոշ հատվածներ, որոնք պարունակում են կարևոր ինֆորմացիա, կորչում են, իսկ երբ այդ նույն ազդանշանը քվանտացնում ենք 5 կարգանի ԱԹԿ-ով, կոմպրեսորի օգնությամբ կերպափոխում ենք 3 կարգանի կոդի, հաղորդում ու ելքում էքսպանդերի օգնությամբ նորից ստանում 5 կարգանի կոդ, ապա հնարավոր է լինում պահպանել ազդանշանում առկա ինֆորմացիայի ավելի մեծ մասը։



Վերոհիշյալից հետևում է, որ նշված մեթոդը թույլ է տալիս կառուցել թվային կոմպանդեր, որի նպատակն է՝ նվազեցնել անալոգ-թիվ կերպափոխման ընթացքում առաջացող աղավաղումները, հասնել կերպափոխման ընթացում ազդանշանում պարունակվող ինֆորմացիայի նվազագույն կորստին, ինչպես նաև խուսափել ավանդական եղանակներով կիրառվող ոչ-գծային բնութագիրն ապահովող անալոգային տարրից, ինչի կառուցումը կոմպրեսորների և էքսպանդերների նախագծման ամենաբարդ աշխատանքն է։

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

- 1. Системы радиосвязи / Под ред. Н.Н.Калашникова М.: Радио и связь, 1988 352 с.
- Многоканальные системы передачи / Под ред. Н.Н.Баевой и В.Н.Гордиенко. М.: Радио и связь, 1996 - 560 с.
- 3. Бернард Скляр. Цифровая связь. М.: Вильямс, СПБ, 2003 1104 с.
- Առուստամյան Վ., Գրիգորյան Հ. *n* կարգանի թվային կոդից m կարգանի թվային կոդի ստացումը թվային կոմպանդերի օգնությամբ // ՀՊՃՀ տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու. հատ. 2. - Երևան, ՀՊՃՀ, 2001. – 435 - 437էջ։

ՀՊՃՀ։ Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 02.04.2004։

Г.Г. ГРИГОРЯН ЦИФРОВОЙ КОМПАНДЕР

Рассматривается метод построения цифрового компандера. Предлагаются алгоритм и схемы его практической реализации.

H.H. GRIGORYAN DIGITAL COMPANDER

A digital compander construction method is considered. The algorithm and circuit of its practical realization is proposed.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 628.36:628.16.067.001.24

ГИДРАВЛИКА И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

А.А. САРГСЯН

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИЛЬТРОВАНИЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ЗАКОНЕ ФИЛЬТРАЦИИ

Приведены основные закономерности фильтрования, когда фильтрация протекает по нелинейному закону, а разделение загрязняющих веществ - в режиме кольматажа. Учитывается, что коэффициент массообмена является непостоянной величиной. Получены аналитические зависимости, позволяющие определить концентрацию фильтруемой жидкости в пористой среде, количество поглощенных веществ и распределение давления в толще фильтрующего материала в зависимости от координаты и времени.

Ключевые слова: фильтрование, кинетика, массообмен, кольматаж, концентрация, скорость, давление.

Известно [1, 2 и др.], что при фильтрации жидкости через пористую среду, когда число Рейнольдса $\text{Re} \succ \text{Re}_{kp} = 3...10$, нарушается линейный закон фильтрации (закон Дарси). В технологическом процессе фильтрования во всех скорых, сверхскорых фильтрах и других фильтровальных установках число Рейнольдса, действительно, чаще всего превышает своё критическое значение.

Рассмотрим процесс кольматажа при фильтрации загрязненной жидкости через однородный плоский фильтрующий слой в режиме $\text{Re} \succ \text{Re}_{kp}$. Математическая модель процесса фильтрования представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, одно из которых описывает движение жидкости и ассоциированных с ней веществ через пористое пространство, второе учитывает влияние изменения геометрической структуры пористой среды на ее проницаемость, третье определяет баланс вещества, а четвертое представляет кинетику процесса.

Следуя [2], уравнение движения жидкости можно представить в виде

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\rho^{m-1} \mu^{2-m} v^m}{a^m k^{(3-m)/2}},\tag{1}$$

где v- скорость фильтрации; μ -динамический коэффициент вязкости жидкости; ρ плотность жидкости; p- давление; k- проницаемость пористой среды; x- координата; a и m- некоторые постоянные.

Изменение проницаемости пористой среды можно представить в виде [4, 6]

$$k = k_0 (1 - b / n_0)^{\theta},$$
 (2)

где k_0 - начальное значение проницаемости; b - объемное удельное отложение загрязняющих веществ в пористой среде; n_0 - начальная пористость; heta - параметр.

При очистке жидкостей на фильтрах, особенно когда число Рейнольдса превышает свое критическое значение, перенос веществ, обусловленный диффузионными процессами, незначителен по сравнению с конвективным переносом и существенной роли не играет [3]. Поэтому в уравнении материального баланса диффузионным членом пренебрегают, т.е.

$$-v\frac{\partial c}{\partial x} + n_0\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial b}{\partial t} = 0 , \qquad (3)$$

где *С* - концентрация веществ в фильтруемой жидкости; *t* - время.

Уравнение кинетики фильтрования представим в виде

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \alpha (b_0 - b) \frac{c}{c_0},\tag{4}$$

где b_0 - предельное значение b; α - коэффициент скорости массообмена; c_0 – объемная исходная концентрация очищаемой жидкости.

В работе [7] показано, что значение α зависит от скорости фильтрации. Действительно, если скорость фильтрации такова, что нарушается линейный закон фильтрации, то нарушается и предположение $\alpha = const$. Скорее всего, α есть функция от числа Рейнольдса. Для случая кольматажа опыты показывают, что зависимость $\alpha = f(\text{Re})$ можно представить в виде, приведенном на рисунке.

График зависимости $\overline{\alpha} = f(\operatorname{Re})$ с небольшой погрешностью можно аппроксимировать в виде

$$\overline{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_0} = \begin{cases} 1, & 0 \le \operatorname{Re} \le \operatorname{Re}_1, \\ 1 - (1 - \overline{\alpha}_{\min}) \overline{\operatorname{Re}}, & \operatorname{Re}_1 \le \operatorname{Re} \le \operatorname{Re}_2, \\ \alpha_{\min} & \operatorname{Re} \ge \operatorname{Re}_2, \end{cases}$$
(5)

где $\overline{Re} = (Re - Re_1)/(Re_2 - Re_1); \alpha_0$ – значение α при $Re \prec Re_1; \overline{\alpha}_{min}$ - минимальное значение α . Причем α_{min} может принять разные значения в зависимости от вида фильтрующего материала и отделяющих веществ. Например, при очищении воды от органических веществ активированным углем - $\overline{\alpha}_{min} = 0.55....0.7$, а при очищении малоконцентрированной суспензии глины песком - $\overline{\alpha}_{min} = 0.15....0.3$. Диапазон изменения $\overline{\alpha}_{min}$ находится в пределах: $0.12 \prec \overline{\alpha}_{min} \prec 0.78$.



Значение $\operatorname{Re}_{1,2}$ в выражении (5) зависит от эквивалентного диаметра и формы частиц фильтрующего материала и, в основном, находится в диапазонах $2,5 \prec Re_1 \prec 7,5\,$ и $12 \prec Re_{_2} \prec 18$, а чаще всего: $5 \prec Re_{_1} \prec 6$ и $14 \prec Re_{_2} \prec 15$.

Систему дифференциальных и алгебраических уравнений (1) – (4) необходимо решить при следующих краевых условиях:

$$\mathbf{p}(0,t) = \mathbf{p}_0 = \mathrm{const},\tag{6}$$

$$\mathbf{v} = \text{const}, \tag{7}$$

$$c(\delta, t) = c_0 = const$$

$$b(x, 0) = 0,$$
(7)
(8)
(8)
(9)

$$b(x,0)=0,$$
 (9)
 $k(x,0)=k_0,$ (10)

$$k(x,0)=k_0$$
, (10)

где δ - толщина фильтрующего материала.

Из решения (3) и (4) при условиях (8) и (9) находим

$$\overline{c} = \frac{c}{c_0} = \frac{\exp \overline{x}}{\exp \overline{t} + (1 - \exp \overline{t})\exp \overline{x}},$$
(11)

$$\overline{b} = \frac{b}{b_0} = \frac{(1 - \exp \overline{t}) \exp \overline{x}}{\exp \overline{t} + (1 - \exp \overline{t}) \exp \overline{x}},$$
(12)

где

$$\overline{x} = \alpha \frac{b_0}{c_0} \frac{(x-\delta)}{v}, \quad \overline{t} = -\alpha \left[t - \frac{n_0}{v} (x-\delta) \right].$$

В уравнениях (11) и (12) значение α берется согласно (5).

Для определения распределения давления в толще фильтрующего материала необходимо проинтегрировать уравнение (1). Тогда будем иметь

$$p = \frac{\rho^{m-1} \mu^{2-m} v^m}{a^m k_0^{\frac{3-m}{2}}} \int \left(1 - \frac{b}{n_0}\right)^{\frac{m-3}{2}\theta} dx + f(t).$$
(13)

Для вычисления интеграла в (13) необходимо ввести значение функции b из (12). Однако в этом случае получаем интегральное уравнение, которое не поддается аналитическому решению. Поэтому целесообразно усреднить функцию b(x,t) по всему объему фильтрующего материала:

$$\widetilde{b}(t) = \frac{1}{\delta} \int_{0}^{\delta} b(x,t) dx \,. \tag{14}$$

После усреднения для b(x,t) имеем

$$b(t) = b_0 \left(1 - \frac{1}{\overline{\delta}} \ln \left| 1 - \exp \overline{t} + \exp \overline{\delta} \right| \right), \text{ где } \overline{\delta} = \alpha \frac{b_0}{c_0} \frac{\delta}{v}.$$
(15)

С учетом (15) уравнение (13) принимает вид

$$p = \frac{\rho^{m-1}\mu^{2-m}v^m}{a^m k_0^{\frac{3-m}{2}}} \left\{ 1 - \frac{b_0}{n_0} \left[1 - \frac{1}{\delta} \ln \left| 1 - \exp \bar{t} \left(1 - \exp \delta \right) \right| \right] \right\}^{\frac{m-3}{2}\theta} x + f(t) .$$
(16)

Используя условия (6) из (16), имеем $f(t) = p_0$ и, следовательно,

$$p = p_0 + \frac{\mu^2}{\rho} \left(\frac{\rho v}{a\mu}\right)^m k_0^{\frac{m-3}{2}} \left\{ 1 - \frac{b_0}{n_0} \left[1 - \frac{1}{\overline{\delta}} \ln \left| 1 - \left(1 - \exp \overline{\delta}\right) \exp \overline{t} \right| \right] - \right\}^{\frac{m-3}{2}\theta} x.$$
 (17)

Относительное значение перепада давления над фильтрующим материалом равно

$$\Delta \overline{p} = \frac{p_* - p_0}{\delta} = \frac{\mu^2}{\rho} \left(\frac{\rho v}{a\mu}\right)^m k_0^{\frac{m-3}{2}} \left\{ 1 - \frac{b_0}{n_0} \left[1 - \frac{1}{\overline{\delta}} \ln \left| 1 - \left(1 - \exp \overline{\delta} \right) \exp \overline{t} \right| \right] - \right\}^{\frac{m-2}{2}\theta}, \quad (18)$$

где p_* —давление над поверхностью фильтрующего материала.

В выражениях, описывающих фильтрование жидкости, кроме исходных данных $v, c_0, \rho, \mu, \delta$, входят также гидродинамические и физико-химические параметры $n_0, k_0, \theta, a, m, \alpha, b_0$, которые определяются из экспериментов применением методов технологического моделирования. Методика определения n, k_0, a, m приведена в [4], а θ - в [5]. Для определения α и b_0 необходимо иметь значения выходных концентраций c_1 и c_2 фильтрата в моменты времени t_1 и t_2 . Тогда эти параметры определяются из (11) методом подбора. Их можно также определить, используя функции (12) или (16).

Вышеприведенные выражения позволяют прогнозировать изменения концентрации фильтруемой жидкости, количество поглощенных веществ пористой средой и давление в зависимости от координаты и времени, а также перепад давления в фильтруемом материале в течение времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Полубаринова Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод.- М.: Наука, 1977.- 664 с.
- 2. Пыхачев Г.Б. Подземная гидравлика.-М.: Гостоптехиздат, 1961.- 386 с.
- Саркисян В.С., Саргсян А.А. Массообмен при фильтрации жидкости, содержащей взвешенные, эмульгированные и растворенные вещества, через двухслойную пористую среду // Изв. АН АрмССР. Серия техн. наук.- 1989.-Т.42, N 1.- С.23-27.
- 3. Саркисян В., Саркисян С., Саргсян А., Бабаян А. О влиянии фильтрации растворов на строение грунтов // Бюллетень строителей Армении.-2003.- N 6 .- С. 14-16.
- 4. **Веригин Н.Н., Васильев С.В., Саркисян В.С., Шержуков Б.С.** Гидродинамические и физико химические свойства горных пород.- М.: Недра, 1977.- 270 с.
- 5. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. М.: Стройиздат, 1964.- 155 с.
- 6. **Trzaska A.** Experimentfl research on the phenomenon if colmatage// Bull&de L^Academie Pol. Sci. Str.Techn.-1965.-Vol. 13, N 9.- P.451-457.

Ин-т водных проблем и гидротехники РА. Материал поступил в редакцию 20.11.2003.

Ա.Ա. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՉՏՄԱՆ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՕՐԻՆԱՉԱՓՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԾԾԱՆՑՄԱՆ ՈՉ ԳԾԱՑԻՆ ՕՐԵՆՔԻ ԴԵՂՔՈՒՄ

Բերված են զտրման գործընթացը նկարագրող հիմնական օրինաչափությունները, երբ ծծանցումն ընթանում է ոչ գծային օրենքով, իսկ հեղուկից օտար նյութերի տարանջատումը՝ կոլմատաժի ռեժիմում։ Հաշվի է առնված նյութափոխանակության գործակցի ոչ հաստատուն լինելը։ Ստացված վերլուծական կապերը հնարավորություն են տալիս որոշել ծակոտկեն միջավայրում զտիչի կոնցենտրացիայի, կլանված նյութերի քանակի եւ Ճնշման փոփոխությունները՝ կոորդինատից եւ ժամանակից կախված։

A.A. SARGSYAN THE MAIN FILTRATING REGULARITIES IN NON-LINEAR FILTRATION LAW

The main regularities of the filtration process when filtration flows by the nonlinear law and the separation of contaminating substances from liquid in colmatage is presented. The non-constant value of massexchange is taken into account. Analytical dependences allowing to decide the changes of concentration to be filtrated, in porous medium the quantity of absorption substances and the pressure distribution in filtration material depending on the coordinate and time are obtained.

ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2004. Т. LVII, № 3.

УДК 621.311

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Л.В. ЕГИАЗАРЯН, С.Г. АКОПЯН, И.И. ШАРАБХАНЯН, В.С. САФАРЯН, А.С. АРУТЮНЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЕМ ОТВЕТВЛЕНИЯМИ ТРАНСФОРМАТОРОВ СВЯЗИ

Исследована возможность регулирования напряжения и снижения потерь электроэнергии в электроэнергетических системах (ЭЭС) управлением коэффициентами трансформации трансформаторов (КТТ) связи. Оптимальные КТТ определяются методом покоординатного спуска, обеспечивающего охват всех трансформаторов связи (ТС) и их диапазона регулирования ответвлениями в целевую оптимизационную функцию и решение задачи за приемлемое время.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, коэффициент трансформации трансформаторов, оптимизация режимов, покоординатный спуск.

Вопросы разработки мероприятий по снижению потерь электрической энергии в ЭЭС являются актуальными, для осуществления которых необходимо оптимизировать их режимы. Из существующих способов оптимизации в первую очередь необходимо применять те, которые не требуют больших капиталовложений. Одним из таких способов является оптимизация режимов ЭЭС по КТТ связи, что является целью настоящей работы.

Постановка задачи. Из множества возможных вариантов установки ответвлений ТС питающей системы необходимо выбрать тот, который в пределах заданных ограничений обеспечивает минимальные потери энергии в ее сетях.

Математическая модель решаемой задачи имеет вид

$$\Delta \mathbf{P} = \sum_{i=1}^{b} \mathbf{I}_{i}^{2} \mathbf{r}_{i} + \sum_{i=1}^{n} \mathbf{U}_{i}^{2} \mathbf{g}_{i} \rightarrow \min, \qquad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{ij} \dot{U}_{j} = \frac{S_{i}}{\hat{U}_{i}}, \quad _{i=1,2,\dots,n} \quad ,$$
 (2)

$$\dot{I}_{i} z_{i} = \sum_{j=1}^{n} a_{ji} \dot{U}_{j}, \quad _{i=1,2,...,b},$$
(3)

$$\mathbf{U}_{i\min} \leq \mathbf{U}_{i} \leq \mathbf{U}_{i\max}, \qquad (4)$$

$$\mathbf{I}_{i} \leq \mathbf{I}_{Ai}, \tag{5}$$

где ΔР - потери активной мощности в продольных (r) и поперечных (g) элементах сети; I_i - ток в i-й ветви; U_i - напряжение в i-ом узле; у_{ij} - элемент матрицы узловых проводимостей; а_{ji} - элемент первой матрицы инциденций; п - число узлов; b - число ветвей; I_{д i} - допустимое значение тока i-й ветви.

Так как в основе оптимизации лежит расчет установившегося режима (УР) ЭЭС, то уравнения УР можно представить в прямой Y [1,2], обратной Z [3] и гибридной Y-Z [4] формах, а решить их можно одним из существующих методов: простой итерации, Зейделя,

Ньютона. В настоящей работе принята Y форма представления уравнений УР, для решения которых используется метод Зейделя с применением ускоряющих коэффициентов [2].

Решение данной оптимизационной задачи можно осуществить полным перебором или одним из классических методов. Решение полным перебором с охватом всех TC и их диапазона регулировочных ответвлений практически нереализуемо. Метод неопределенных множителей Лагранжа, при котором условная оптимизационная модель заменяется безусловной оптимизационной моделью, непригоден к решению подобных задач, поскольку при этом такие задачи сводятся к решению системы нелинейных уравнений с неопределенным исходом сходимости итерационного процесса.

Для решения данной задачи применяем метод покоординатной релаксации (спуска) [5]. Существуют два подхода к решению данной задачи методом покоординатного спуска: поиском в глубину и поиском в ширину.

Нами применяется второй метод, суть которого описывается ниже. В начале оптимизационного процесса в качестве начальной информации данные об ответвлениях TC берутся из базы данных ЭЭС 220/110 *кВ*. На каждом шаге итерации изменяется ответвление только одного из TC при фиксировании остальных. Для каждого TC на каждом шаге итерации производятся три расчета УР (для текущего и соседних) и фиксируется то положение, при котором потери активной мощности минимальны и обеспечены технические ограничения. При определении оптимального ответвления следующего TC ответвление предыдущего относится к множеству фиксированных ответвлений. Данный подход применяется к ответвлениям всех TC. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока на k-ом и (k+1)-ом (k - номер итерации) итерациях ответвления останутся неизменными.

Рассмотрим пример 4-узловой схемы сети (рис.), на основании которой можно наглядно представить вышеописанный алгоритм.



Рис.

В представленной схеме имеются два ТС с продольными комплексными сопротивлениями в *Ом* (Z₁₃=1,084+j55,439; Z₄₂=1,005+j45,917), поперечными проводимостями в *Сим* (Y₁₀=(1,13-j4,017)•10⁻⁶; Y₄₀=(1,62-j5,19)•10⁻⁶) и действительными номинальными КТТ 110/220 (K₁,K₂), а также две линии электропередач с комплексными сопротивлениями в *Ом* (Z₂₃=1,543+j7,806; Z₄₁=1,543+j7,806). Напряжение базисного узла 4: U₄=220 $\kappa B, \Psi = 0$. Диапазон изменения ответвлений обоих TC: ((3x2%), мощности генераторного 1 и нагрузочных 2,3 узлов в MBA соответственно: $\dot{S}_1 = 80 + j50; \dot{S}_2 = 50 + j30;$ $\dot{S}_3 = 100 + j60.$ Ограничения на напряжения:

 $198 \le U_i \le 253$, $100 \le U_i \le 127$. Описанным методом произведена оптимизация, в результате чего найдены оптимальные КТТ, обеспечивающие минимальные потери активной мощности в схеме (рис.) и технические ограничения. В табл.1 представлена динамика изменения КТТ при оптимизации на каждом шаге итерации и соответствующие им потери активной мощности ΔP .

Таблица	1
тиолици	-

Номер итерации	K1	K2	ΔР (МВт.ч)
	0,516	0,526	0,57634
1	0,526	0,526	0,54919
	0,537	0,526	0,53794
	0,537	0,516	0,54615
2	0,537	0,526	0,53794
	0,537	0,537	0,54619
	0,526	0,526	0,54919
3	0,537	0,526	0,53794
	0,547	0,526	0,53565
	0,547	0,516	0,56653
4	0,547	0,526	0,53565
	0,547	0,537	0,53563
	0,537	0,537	0,54619
5	0,547	0,537	0,53563
	0,557	0,537	0,54731
	0,547	0,526	0,53565
6	0,547	0,537	0,53563
	0,547	0,547	0,53656

На каждом шаге итерации оптимальные КТТ отмечены темной полосой. На 6-ом шаге найдены оптимальные КТТ: К₁=0,547; К₂=0,537, которые соответствуют заданным расчетным режимным параметрам сети. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

N	Р	Q	U′	U″	U
1	80	50	219,605	0,281	219,605
2	-100	-60	111,376	-9,968	111,811
3	-50	-30	112,491	-8,383	112,802
4	70,5	59,0	220	0	220
	36	33			

Здесь U[/],U^{//},U - соответственно действительные, мнимые составляющие и модуль комплексных расчетных узловых напряжений.

На основании представленного алгоритма в АрмНИИ энергетики была разработана программа оптимизации, которая применяется для оптимизации КТТ связи Армянской ЭЭС 220/110 *кВ*, схема которой содержит 650 узлов и 850 ветвей. Необходимая информация по активным и пассивным параметрам системы взята из разработанной в АрмНИИ энергетики базы данных. Оптимальные ответвления ТС были определены для их установки за период с 01.04.03 по 30.04.03. За этот период составлены прогнозируемые часовые графики мощностей нагрузочных и генераторных узлов и определены прогнозируемые положения ответвлений оптимизируемых КТТ. По этим данным произведены расчеты УР за принятый

расчетный период и определены потери энергии в ЭЭС. Аналогичный расчет УР выполнен по тем же режимным параметрам для оптимальных КТТ. Экономия энергии, определенная расчетным путем как разность потерь энергии при установке прогнозируемых и оптимальных КТТ за принятый расчетный период, равна 330 *МВт.ч*, что составило 0,1% от выработки энергии в ЭЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Хачатрян В.С.** К методам расчета рабочих режимов электрических сетей// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.-1967.- N 2.- C. 37-41.
- 2. Сафарян В.С. Об одном методе расчета установившихся режимов электрических систем// Изв. вузов СССР. Энергетика.-1982.- N 4.- С. 53-56.
- 3. **Жуков Л.А., Стратан И.П.** Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем.- М.: Энергия,1979.- 415 с.
- Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Бадалян Н.П. Решение гибридных уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом диакоптики// Электричество .-1999.-N 4.- С. 7-12.
- 5. **Ортега Д., Рейнболдт В.** Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. М.: Мир, 1975.- 558 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 14.10.2003.

Լ.Վ. ԵՂԻԱՉԱՐՅԱՆ, Ս.Հ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Ի.Ի. ՇԱՐԱԲԽԱՆՅԱՆ, Վ.Ս. ՍԱՖԱՐՅԱՆ, Ա.Ս. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ ԿԱՊԻ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՃՅՈՒՂԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՄԲ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄ

Հետազոտված է լարման կարգավորման և էլեկտրաէներգիայի կորուստների նվազեցման հնարավորությունը՝ ԷԷՀ կապի տրանսֆորմատորների տրանսֆորմացիայի գործակիցների (ՏԳ) կառավարմամբ։Լավարկվող տրանսֆորմատորների ՏԳ-երը որոշվում են ըստ կոորդինատային էջքի մեթոդի, որն ապահովում է բոլոր կապի տրանսֆորմատորների և դրանց Ճյուղավորումների ընդգրկումը նպատակային լավարկվող ֆունկցիայի մեջ և վերջինիս լուծումն ընդունելի ժամանակահատվածում։

L.V. YEGIAZARYAN, S.H. HAKOBYAN, I.I. SHARABKHANYAN, V.S. SAFARYAN, A.S. HARUTIUNYAN POWER SYSTEM MODE OPTIMIZATION BY BRANCHING MANAGEMENT of COUPLING TRANSFORMERS

The possibility of voltage regulation and reduction of electricity losses in power system by management of coupling transformer transformation coefficients (TC) is investigated. Optimum transformer TCs are defined by the method of coordinate-by-coordinate descent, providing inclusion of all coupling transformers and their range of regulation by branchings into target optimization function and task solution in acceptable time.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

USU43UU U.A., ÞUUÞUU3UU 4.3.	
ՀԱՐԹ ԵՎ ԱՍՏԻՃԱՆԱՎՈՐ ԼԻՍԵՌՆԵՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ	
ՀԱՎԱՆԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ	
Հաղորդում 2. Լիսեռների հոգնածային դիմադրության ցուցանիշների որոշման	260
հաշվարկային մեթոդ	209
ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Մ.Ա., ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Տ.Մ., ԱՆԴՐԱՆԻԿՅԱՆ Գ.Շ.	
ԱԼՄԱՍՏԵ ՈՒՂՂՈՂ ԳՐՏՆԱԿՆԵՐԻ ՄԱՇԱԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ	
ԲԱՐՉՐԱՑՄԱՆ ՄԻՋՈՑՆԵՐԸ	381
ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ Ա.Հ., ՉԱՔԱՐՅԱՆ Ֆ.Հ.,	
<i>ደበՒՌՆԱՉՅԱՆ Մ.Ղ.</i>	
ՔԱՋԱՐԱՆԻ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹԻ ԹՐԾՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ	
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ՕՊՏԻՄԱԼ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ	388
UULAU3UV T.F., NESLUU3UV L.U., LUQUL3UV U.V.,	
ՀԱՄԲԱՐՁՈՒՄՅԱՆ Է.Գ.	
ԿՈՄՊՈՉԻՑԻՈՆ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԱՐՏԱՄՂՈՒՄ	393
<i>ጉՐՄԵՅԱՆ Հ.Ռ.</i>	
ՄՈՆՈԽՐՈՄԱՏՈՐ՝ ՆՅՈՒԹԵՐՈՒՄ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ	
ՄԵԾ ԼՈՒՍԱՈՒԺՈՎ ՖՈԿՈՒՍԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ	400
YULUIESIUU U.U.	
ՇՓԱՔԻՄԻԱԿԱՆ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱԼԻՖԱՏԻԿ	
ՊՈԼԻԱՄԻԴՆԵՐԻ ՇՓՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ	406
ԳԵՈԴԱԿՅԱՆ Ջ.Ա., ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ Ս.Վ., ԳԵՈԴԱԿՅԱՆ Կ.Ջ.	
ԱՊԱԿԵՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ԲԱՂԱԴՐԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ ԾԱՎԱԼԱՅԻՆ	
ՌԵՉԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆԸ	414
ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Գ.Ա., ՄԱՆՈՒՄԱՋՅԱՆ Վ.Ռ.	
ԴԱՇՏԵՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ԵՐԿՉԱՓ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՎԵՐՋԱՎՈՐ	
ՏԱՐՐԵՐԻ ՄԵԹՈԴԻ ՄԵԿ ՏԱՐԲԵՐԱԿԻ ՄԱՍԻՆ	422
ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Ո.Չ., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ռ., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Մ.Գ.	
ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐՈՒՄ ԱՇԽԱՏՈՂ ԳԱՉԱՄԱՉՈՒԹԱՅԻՆ	
ԷՆԵՐԳԱԲԼՈԿՆԵՐԻ ՎՆԱՍԱԿԱՐ ԱՐՏԱՆԵՏՈՒՄՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ	420
	429
ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Վ.Ս., ԳԼԱԴՈՒՆՉԻԿ Ե.Ա., ՄՆԱՅԱԿԱՆՅԱՆ Մ.Ա.,	
ውበխበዮኒያ ሀ.ቡ.	
ԱԿՏԻՎ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՍՏԻ ՆՎԱԶԱՐԿՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ	40.4
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՑԱՆՑՈՒՄ	434
ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆԻ ՆՈՐ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՄՈԴՈՒԼԻ	445
	445
U'IISEYUYUU IIEGE'UU UI'E IGE¥ ULE¥USUI'IIEU'	404
$\frac{1}{1}$	
ԻԱՐ Ի ԸԼԿԵԿՏՐ ԱԷՆԵՐ ԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԱՅՈՒՆԱԾՎԱՕ	

ՌԵԺԻՄԻ ՃՇԳՐՏՈՒՄԸ ԴԻԱԿՈՊՏԻԿԱՅԻ ՄԵԹՈԴՈՎ	460
ԲԱՐԵՂԱՄՅԱՆ Գ.Վ.	
ՍԻՆՈՒՍՈԻԴԱՅԻՆ ԵԼՔԱՅԻՆ ԼԱՐՄԱՄԲ ԵՎ ԼԱՑՆԱ-ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ	
ՄՈԴՈՒԼԱՑՄԱՄԲ ԻՆՎԵՐՏՈՐՈՒՄ ՀՉՈՐՈՒԹՅԱՆ ԿՈՐՈՒՍՏՆԵՐԻ	
ՀԱՇՎԱՐԿԸ	467
<i>ጊԱԶԱՐՅԱՆ Վ.Կ.</i>	
ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ՇԱՐԺԱԿԱՆ	
ՏԻՐՈՒՅԹՆԵՐՈՒՄ	473
ՍԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ՄԵԼԻՔՅԱՆ Ա.Վ.	
ԺԻՐԱՐ-ՎԻԵՏԻ ՄԵԹՈԴԻ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ-ԹԵՅԼՈՐՅԱՆ ՆՄԱՆԱԿԸ	480
ԿՅՈՒՐԵՂՅԱՆ Ս.Գ., ՄԱՄԻԿՈՆՅԱՆ Բ.Մ., ԱԲԳԱՐՅԱՆ Ս.Վ.,	
ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ Ս.Շ., ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ Վ.Գ., ԿՅՈՒՐԵՂՅԱՆ Գ.Ս.	
ԱՐԳՈՒՄԵՆՏՆԵՐԻ ԽՄԲԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՌՄԱՆ ԻՏԵՐԱՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴ	495
ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ռ. Ա., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ռ. Ա.	
IP ՑԱՆՑԵՐՈւՄ ԵՐԹՈւՂԱՎՈՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՈՒՄ՝ ԿԱՊՈւՂԻՆԵՐԻ	
ՀԱՄԱՊԱՏԱՍԽԱՆ ՄԵՏՐԻԿԱՆԵՐԻ ՏՐՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ	500
ՄԵԼԻՔՅԱՆ Վ.Շ., ՍԱՐԳՍՅԱՆ Ս.Մ., ЛԵՏՐՈՍՅԱՆ Դ.Ա.	
ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՍԽԵՄԱՆԵՐԻ ՆԵՐՔԻՆ ՄԻՋՄԻԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ՄԱԿՐՈՄՈԴԵԼ	506
ԿՈՒԴՈՅԱՆ Մ.Ռ.	
ԴԵՊԻ ՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՄԲ ԱՍԻՆՔՐՈՆ ԷԼԵԿՏՐԱԲԱՆԵՑՈՒՄՆԵՐԻ	
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՈՒՄԸ	517
USEФULՅUL U.U., ՀULAF03AFL3UL Վ.U., UAUU3UL A.L.,	
นวนบรนบ น.ฉ., คนเวอกหวนเริ่มบ ฯ.๑.	
ՀԱՄԱԿՇՌՎՈՂ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՆ ՏՎԻՉ՝ ԿՎԱՐՑԱՅԻՆ ՌԵԶՈՆԱՏՈՐԻ ՀԻՄԱՆ	
ՎՐԱ	523
ULELUUISUI I.U.	
ԹՎԱՆՇԱՆԱՅԻՆ ԿՈԴԻ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ԿԵՐՊԱՓՈԽՈՒՄԸ ԺԱՄԱՆԱԿԱՅԻՆ	
ԱՉԴԱՆՇԱՆԻ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅԱՆ	528
ՍԻՄՈՆՅԱՆ Ռ.Հ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Օ.Ա.	
ԱԿՈւՄՈւԼՅԱՏՈՐԱՅԻՆ ՄԱՐՏԿՈՑՆԵՐԻ ՈւՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ԱՄՊԵՐ-ԺԱՄԵՐԻ	
የሀወበጊ ሀԱՐՔ	533
ՄԻՔԱՅԵԼՅԱՆ Լ.Ա.	
ԽԱՌՆՈւՐԴԱՅԻՆ ԽՈՐԸ ԵՎ ԿՊՉՈւՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿՆԵՐ ՊԱՐՈւՆԱԿՈՂ	
ՍԻԼԻՑԻՈւՄ-ԿԱՐԲԻԴԱՅԻՆ ԴԱՇՏԱՅԻՆ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐԻ ՍՏԱՏԻԿ	
ԲՆՈւԹԱԳՐԵՐԸ	537
ዓ <i>Ր</i> ኾዓ <i>በՐՅԱՆ Հ.Հ</i> .	
ԹՎԱՅԻՆ ԿՈՄՊԱՆԴԵՐ	545
UULAUSUL U.U.	
ԶՏՄԱՆ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՕՐԻՆԱՉԱՓՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԾԾԱՆՑՄԱՆ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ	
ՕՐԵՆՔԻ ԴԵՊՔՈՒՄ	550
ԵՂԻԱԶԱՐՅԱՆ Լ.Վ., ՀԱԿՈԲՅԱՆ Ս.Հ., ՇԱՐԱԲԽԱՆՅԱՆ Ի.Ի., ՍԱՖԱՐՅԱՆ	
Վ.U., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ա.U.	
ԿԱՊԻ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐԻ ՃՅՈՒՂԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՄԲ	
ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄ	555

СОДЕРЖАНИЕ

СТАКЯН М.Г., ИСАХАНЯН К.Ц.	
ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ГЛАДКИХ И	
СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ	
Сообщение 2. Расчетный метод определения показателей сопротивления	260
усталости валов	309
ГРИГОРЯН М.А., ГРИГОРЯН Т.М., АНДРАНИКЯН Г.Ш.	
СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АЛМАЗНЫХ ПРАВЯЩИХ	
РОЛИКОВ	381
АГБАЛЯН С.Г., ОВСЕПЯН А.О., ЗАКАРЯН Ф.А., ЗУРНАЧЯН М.К.	
ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ	
ПРОЦЕССА ОБЖИГА КАДЖАРАНСКОГО МОЛИБДЕНИТОВОГО	
КОНЦЕНТРАТА	388
САРКИСЯН Ш.Э., ПЕТРОСЯН А.С., КАЗАРЯН А.Н.,	
АМБАРЦУМЯН Э.Г.	
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ	
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ Fe-Mo-Cu	393
ДРМЕЯН Г.Р.	
МОНОХРОМАТОР ДЛЯ СВЕТОСИЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКИ	
РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В МАТЕРИАЛАХ	400
КАРАПЕТЯН А.Н.	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТРЕНИИ	
АЛИФАТИЧЕСКИХ ПОЛИАМИДОВ	406
ГЕОДАКЯН Д.А., СТЕПАНЯН С.В., ГЕОДАКЯН К.Д.	
ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ РЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ	
СТЕКЛОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ	414
ГЕВОРКЯН Г.А., МАНУСАДЖЯН В.Р.	
ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ	
РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ПОЛЯ	422
МАРУХЯН В.З., ГЕВОРГЯН А.Р., КАЗАРЯН М.Г.	
О НЕОБХОДИМОСТИ ОЦЕНКИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ГАЗОМАЗУТНЫХ	
ЭНЕРГОБЛОКОВ, РАБОТАЮЩИХ В ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ	429
ХАЧАТРЯН В.С., ГЛАДУНЧИК Е.А., МНАЦАКАНЯН М.А.,	
ТОХУНЦ А.Р.	
МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОИ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ	40.4
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОИ СИСТЕМЫ	434
СТЕПАНЯН А.В., ПАНОСЯН Ж.Р.	
РАЗРАБОТКА НОВОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ СОЛНЕЧНОИ	445
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ	440
ДВУСТОРОННЕ НАПРАВЛЕННОЕ НОВОЕ ЯВЛЕНИЕ В КЛИРОМ ВОЛИОРОЛЕ ШИРОКОЗОЦИОГО ПОЛУПРОВОЛИЦИКОВОГО	
В КРИВОЛІ ВОЛНОВОДЕ ШИРОКОЗОННОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО	454
	1.51

ХАЧАТРЯН К.В.	
КОРРЕКЦИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕР-	
ГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ДИАКОПТИКИ	460
БАРЕГАМЯН Г.В.	
РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ИНВЕРТОРЕ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ	
МОДУЛЯЦИЕЙ И СИНУСОИДАЛЬНЫМ	
ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ	467
КАЗАРЯН В.К.	
РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	
В ДВИЖУЩИХСЯ СРЕДАХ	473
СИМОНЯН С.О., АВЕТИСЯН А.Г., МЕЛИКЯН А.В.	
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО–ТЕЙЛОРОВСКИЙ АНАЛОГ	
МЕТОДА ЖИРАРА-ВИЕТА	480
КЮРЕГЯН С.Г., МАМИКОНЯН Б.М., АБГАРЯН С.В., БАЛАСАНЯН С.Ш.,	
ДАЛЛАКЯН В.Г., КЮРЕГЯН Г.С.	
ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ	495
АВЕТИСЯН Р.А., ГЕВОРКЯН Р.А.	
ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТИЗАЦИИ В ІР СЕТЯХ ПУТЕМ ЗАДАНИЯ	
СООТВЕТСТВУЮШИХ МЕТРИК КАНАЛОВ	500
МЕЛИКЯН В.Ш., САРГСЯН С.М., ПЕТРОСЯН Л.А.	
МАКРОМОЛЕЛЬ ВНУТРЕННИХ МЕЖСОЕЛИНЕНИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ	506
КУЛОЯН М.Р.	
К ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫХ	
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОЛОВ	517
СТЕПАНЯН А.С., АРУТЮНЯН В.М., АЛАМЯН З.Н.,	
АЛАМЯН А.З., БАРХУЛАРЯН В.Г.	
КОМПЕНСАЦИОННЫЙ ЛАТЧИК ВЛАЖНОСТИ НА КВАРШЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ	
	523
АЛЕКСАНЯН В.С.	
НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ШИФРОВОГО КОЛА В ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ	
	528
СИМОНЯН Р. А. МАРТИРОСЯН О А	
УСТРОЙСТВО ЛЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ В АМПЕР-ЧАСАХ	
ΑΚΚΥΜΥЛЯΤΟΡΗЫХ БΑΤΑΡΕΕΚ	533
ΜΙΚΑΕЛЯΗ ΠΑ	
СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРБИЛ - КРЕМНИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ	
ТРАНЗИСТОРОВ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСНЫМИ УРОВНЯМИ И УРОВНЯМИ	
прилипания	537
ΓΡΑΓΛΡΟΓΙ Γ Γ	
	545
САЛГСАНАА	747
Ο ΠΟ ΔΠΟΙΕ ΞΑΛΟΠΟΙΝΕΡΠΟΟΙ ΝΙ ΨΝΙΙΔΙΡΟΒΑΠΝΑ ΠΡΝ ΠΕΙΝΗΕΝΗΟΜ 2 ΔΥ ΔΙΕ ΦΙΑΠΕΤΡΑΙΙΙΑΙΑ	550
	550
ΕΙ ΥΙΑΘΑΓΆΠ Π.Β., ΑΚΟΠΆΠ Ο.Ι., ШΑΓΑΒΧΑΠΆΗ ΥΙ.Υ., ΟΑΨΑΓΆΗ Β.C., ΑΡΙΤΓΟΙΙσΙΙ Α.Ο.	
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЕМ	
ОТВЕТВЛЕНИЯМИ ТРАНСФОРМАТОРОВ СВЯЗИ	222

CONTENTS

STAKYAN M.G., ISAKHANYAN K.Ts.	
PROBABILITY ASSESSMENT OF SMOOTH AND STEPPED SHAFT FATIQUE RESISTANCE	
Message 2. Design method of defining shaft fatigue resistance indices	369
GRIGORYAN M.A., GRIGORYAN T.M., ANDRANIKYAN G.Sh.	
DIAMOND DRESSING ROLLER WEAR RESISTANCE INCREASE	
METHODS	381
AGHBALYAN S.G., HOVSEPYAN A.H., ZAKARYAN F.H.,	
ZURNACHYAN M. GH.	
OPTIMUM PARAMETER RESEARCH AND DEFINITION OF KAJARAN	200
MOLYBDENITE CONCENTRATE ANNEALING PROCESSES	300
SARRISSTAN SILL, PETROSTAN Π.S., RAZARTAN A.N., HΔMBΔRTSUMYΔN F G	
TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR OBTAINING COMPOSITE	
MATERIAL BASED ON Fe-Mo-Cu	393
DRMEYAN H.R.	
MONOCHROMATOR FOR LIGHT-GATHERING FOCUSING OF X-RAYS	
IN MATERIALS	400
KARAPETYAN A.N.	
STUDY OF TRIBUCHEMICAL PROCESSES OF ALIPHATIC POLYAMID	406
GEODAKYAN LA STEPANYAN SW GEODAKYAN K L	400
THE POSSIBILITY OF GENERATING VOLUMETRIC RESISTORS	
BASED ON GLASS-METALLIC COMPOSITIONS	414
GEVORGYAN G.A., MANUSAJYAN V.R.	
A MODIFIED FINITE - ELEMENT METHOD FOR SOLVING TWO-	
DIMENSIONAL FIELD THEORY PROBLEMS	422
MARUKHYAN V. Z., GEVORGYAN A.R., GHAZARYAN M.G.	
ON THE NECESSITY OF ESTIMATING HARMFUL EMISSIONS INTO THE	
GAS-OIL POWER BLOCKS OPERATING AT ALTERNATING REGIMES	429
KHACHATRYAN V. S., GLADUNCHIK E.A., MNATSAKANYAN M.A.,	
IOKHUNIS A. K. MINIMIZATION OF ACTIVE DOWED LOSSES IN DOWED SLIDDI V	
MINIMIZATION OF ACTIVE FOWER LOSSES IN FOWER SOFFET	434
STEPANYAN A.V., PANOSYAN ZH.R.	-0-
DEVELOPMENT OF THE NEW PHOTOVOLTAIC MODULE FOR SOLAR	
POWER STATIONS	445
SHMAVONYAN G.SH.	
NOVEL BIDIRECTIONAL GUIDED EFFECT IN BENT-WAVEGUIDE OF	
BROADBAND SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER	454
KHACHATRYAN K.V.	
STEADY-STATE CONDITION CORRECTNESS OF COMPLEX	460
RAREGHAMYANG V	400
CALCULATION OF THE POWER LOSSES IN THE INVERTER WITH	

THE PULSE-WIDTH MODULATION AND SINUSOIDAL OUTPUT
CALCULATION OF PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD FOR A MOTIONED ENVIRONMENT
SIMONYAN S.H., AVETISSYAN A.G., MELIKYAN A.V. DIFFERENTIAL-TAYLOR ANALOGUE OF THE JIRAR-VIET METHOD KYUREGHYAN S.G., MAMIKONYAN B.M., ABGARYAN S.V., BALASSANYAN S.Sh., DALLAQYAN V.G., KYUREGHYAN G.S. ITERATIVE METHOD OF THE GROUP REGISTRATION OF ARGUMENTS
AVETISYAN R A GEVORGYAN R A
ROUTING OPTIMIZATION IN IP NETWORKS BY MEANS OF SETTING APPROPRIATE ROUTE METRICS
MELIKYAN V.SH., SARGSYAN S.M., PETROSYAN D.A. MACROMODEL OF INTERNAL INTERCONNECTIONS OF INTEGRATED CIRCUITS
KUDOYAN M. R. ON INCREASING EFFECTIVENESS OF FREQUENCY-CONTROLLED SYSTEMS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES STEPANYAN A.S., AROUTIOUNIAN V.M., ADAMYAN Z.N., ADAMYAN A.Z., BARKHUDARYAN V.G. QCM - BASED COMPENSATED HUMIDITY SENSOR
ALEKSANYAN V.S. NONLINEAR TRANSFORMATION OF THE DIGITAL CODE INTO A TIME INTERVAL
SIMONYAN R.H., MARTIROSSYAN O.A.
THE EQUIPMENT FOR MEASURING THE CAPACITY ON AMPER /HOURS FOR RECHARGEABLE BATTERIES
MIKAYELYAN L.A. THE STATIC CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY BARRIER MESFET'S WITH THE DEEP IMPURITY AND TRAP LEVELS
<i>GRIGORYAN H.H.</i> DIGITAL COMPANDER
SARGSYAN A.A.
THE MAIN FILTRATING REGULARITIES IN NON-LINEAR FILTRATION LAW EGIAZARYAN L.V., HAKOBYAN S.H., SHARABKHANYAN I.I., SAFARYAN V.S. HARIITIIINYAN A.S.
POWER SYSTEM MODE OPTIMIZATION BY BRANCHING MANAGEMENT OF COUPLING TRANSFORMERS