

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Վ.Շ. ՄԵԼԻԿՅԱՆ (գլխավոր խմբագիր), Ա.Խ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ (գլխ. խմբ. տեղակալ),
Ժ.Ս. ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ (պատասխանատու քարտուղար), Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ,
Լ.Հ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ, Հ.Վ. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ, Ս.Ք. ԲԱԴԴԱՍԱՐՅԱՆ,
Ս.Պ. ԴԱՎԹՅԱՆ, Հ.Ս. ԿԱՐԱՅԱՆ, Ա.Ա. ՀԱԽՈՒՄՅԱՆ, Վ.Ն. ՀԱԿՈԲՅԱՆ,
Ա.Գ. ԴՈՒԼՅԱՆ, Ո.Զ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Օ.Հ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, ՅՈՒ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ,
Ս.Հ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Թ. ՔՈՒՉՈՒԿՅԱՆ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.Ш. МЕЛИКЯН (главный редактор), А.Х. ГРИГОРЯН (зам. глав. редактора),
Ж.С. СЕЙРАНЯН (ответственный секретарь), С.Г. АГБАЛЯН, В.Н. АКОПЯН,
Л.А. АСЛАНЯН, А.А. АХУМЯН, М.К. БАГДАСАРЯН, О.В. БАГДАСАРЯН,
А.Г. ГУЛЯН, С.П. ДАВТЯН, Г.С. КАРАЯН, А.Т. КУЧУКЯН, В.З. МАРУХЯН,
О.О. ПЕТРОСЯН, Ю.Л. САРКИСЯН, С.О. СИМОНЯН

EDITORIAL BOARD

V.SH. MELIKYAN (editor-in-chief), A.KH. GRIGORYAN (vice-editor-in-chief),
ZH.S. SEYRANYAN (executive secretary), S.G. AGHBALYAN, L.H. ASLANYAN,
H.V. BAGHDASARYAN, M.K. BAGHDASARYAN, S.P. DAVTYAN,
A.G. GHULYAN, A.A. HAKHUMYAN, V.N. HAKOBYAN, H.S. KARAYAN,
A.T. KUCHUKYAN, V.Z. MARUKHYAN, O.H. PETROSYAN, YU.L. SARGSYAN,
S.H. SIMONYAN

Հրատ. խմբագիր՝

Ժ.Ս. ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2018

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И НАЦИОНАЛЬНОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

PROCEEDINGS

OF THE REPUBLIC OF ARMENIA NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES AND
NATIONAL POLYTECHNIC UNIVERSITY OF ARMENIA

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

2018

3

ՀԱՏՈՐ

TOM 71
VOLUME

ՀՈՒԼԻՍ - ՍԵՊՏԵՄԲԵՐ
ИЮЛЬ - СЕНТЯБРЬ
JULY - SEPTEMBER

Հրատ. Խմբագիր՝

ԺԱՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 25.12.2018

Թուղթը՝ “օֆսեթ”։ Տպագրությունը՝ ռիզո։ Ֆորմատ՝ (70×100) 1/16:

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 9.75 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 536: Տպաքանակ՝ 200

Հայաստանի ազգային
պոլիտեխնիկական
համալսարանի տպարան
Երևան, Տերյան 105,
Հեռ.՝ 520 356

Типография Национального
политехнического университета
Армении
Ереван, ул. Тeryан 105,
Тел.: 520 356

Printing house of National
Polytechnic University
of Armenia
105 Teryan str. Yerevan,
Tel. 520 356

Ն.Գ. ՀԱԿՈԲՅԱՆ

ՏԱՐԲԵՐ ԾԱԿՈՏԿԵՆՈՒԹՅԱՄԲ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ, ԾՈՄԱՆ ԵՆԹԱԿՎԱԾ
ՇԵՐՏԵՐԻ ՇՐՋԱՆԱՑԻՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Դիտարկվել է եռակալված նյութից տարբեր ծակոտկենությամբ շերտերի մաքուր ծոումը հարթ դեֆորմացման պայմաններում: Օգտագործվել են ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության հավասարումների համարժեքային լարման և շառավղային լարումով արտահայտված շրջանային լարման ընդհանուր բանաձևերը: Ստացվել են տարբեր ծակոտկենությամբ նյութերի հոսունության սահմանների արժեքները և շրջանային լարումների որոշման բանաձևերը, ինչպես նաև կառուցվել են ծակոտկենությունից կախված դրանց գրաֆիկները:

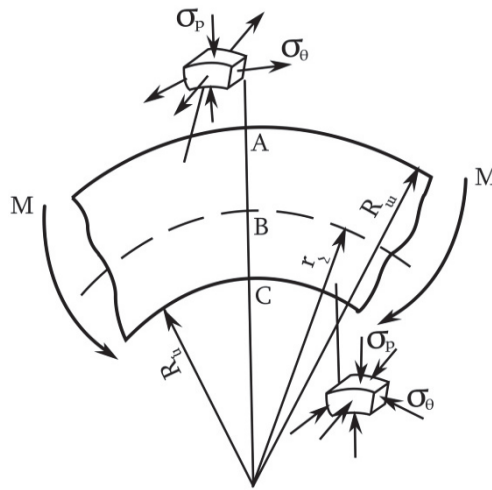
Առանցքային բառեր. պլաստիկ մաքուր ծոում, եռակալված շերտ, ծակոտկենություն, հարթ դեֆորմացում, շրջանային լարումներ:

Հոծ նյութից թերթի ծոումը հարթ դեֆորմացման պայմաններում (նկ. 1) դիտարկված է [1,2]-ում, որտեղ նյութն ընդունվում է կոշտ-պլաստիկ: Որոշված են չեզոք շերտի շառավիղը և լարումները՝ ձգված ու սեղմված գոտիներում: Կոշտ-պլաստիկ ամրացումով նյութի դեպքում թերթի ծոման խնդիրը լուծված է [1]-ում: Կիրառված են Հուբեր-Միզեսի և Տրեսկա-Սեն-Վենանի պլաստիկության պայմանները, և թվային հաշվարկները կատարվել են [1]-ի մեթոդով:

[2]-ում դիտարկված են մաքուր ծոման ենթարկված լայն շերտի s – հաստությամբ, R_w – արտաքին, R_i – ներքին և r_2 – չեզոք մակերևույթների միջև գոյություն ունեցող տարբեր կապակցությունները. շերտի նյութի ամրացման բացակայության և առկայության, ինչպես նաև պլաստիկ դեֆորմացման գոտու առաջացման և ընդարձակման դեպքերը: [2]-ում առանձնահատուկ ուշադրություն է դարձվել շրջանային և շառավղային լարումների որոշմանը, դրանց գրաֆիկների կառուցմանը և վերլուծմանը: Ընդ որում, շրջանային և շառավղային լարումների բանաձևերը համընկնում են [1]-ում բերված թերթի ծոման բանաձևերին:

[3]-ում մշակվել և լուծվել է էներգետիկ պլաստիկության պայմանի օգտագործմամբ նեղ շերտի մաքուր ծոման խնդիրը: Հաստատվել է շրջանային և շառավղային լարումների բաշխումը շերտի հատությամբ՝ կախված վերլուծական բանաձևով արտահայտված շերտի կորության շառավղի պարամետրերից: Ներառվել է չեզոք անկյուն հասկացությունը, և ստացվել է չեզոք անկյան կապի բանաձևը

ներքին և արտաքին կորության շառավղների հարաբերությունից, ինչպես նաև կապ է հաստատվել չեզոք շառավղի և չեզոք անկյան միջև: Որոշվել են ներքին և արտաքին կորության շառավղիների հարաբերության թույլատրելի սահմանները: Բերվել է չեզոք մակերևույթի տեղափոխության գործակից հասկացությունը, կառուցվել է այդ գործակցի կախվածության գրաֆիկը շերտի հաստությունից: Կատարվել է նշված չափերով շերտի լարվածային վիճակի հաշվարկ էներգետիկ և առավելագույն շոշափող լարումների պլաստիկության չափանիշների օգտագործմամբ: Հաստատվել է, որ որոշ կետերում շրջանային լարումների այս պլաստիկության պայմանով ստացված արժեքների տարբերությունը հասնում է 13%-ի:



Նկ.1. Մաքուր ծռման ենթարկված լայն շերտի սխեման

[4]-ում դիտարկվել է եռակալված չամրացվող նյութից լայն շերտի մաքուր ծռումը հարթ դեֆորմացման պայմաններում: Ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության (ՄՆՊՏ) հավասարումներից համարժեքային լարման բանաձևի հիման վրա [5] ստացվել է σ_r շառավղային լարումով արտահայտված σ_θ շրջանային լարումների որոշման բանաձևը: Նախ ուսումնասիրվել է հոծ նյութի շերտի մաքուր ծռման խնդիրը: Գնահատվել են գլխավոր լարումների մեծությունները, որոնք առաջանում են հարթ դեֆորմացված շերտերի ձգման և սեղմման գոտիներում: Բերվել են շրջանային և շառավղային չափագուրկ լարումների, ինչպես նաև տարբեր նյութերի դեպքում դրանց մեծությունների բանաձևերը:

Առաջին դեպքում ընդունվել է, որ հոծ նյութի նման՝ եռակալված շերտի շրջանային լարման որոշման համար կարելի է օգտագործել դրա հոսունության սահմանը՝ կախված նյութի ծակոտկենությունից: Դրա համար օգտագործվում է ՄՆՊՏ համարժեքային լարման բանաձևը: Յույց է տրվել, որ ծակոտկեն նյու-

թերի հոսունության սահմանը՝ y_{hv} -ն, արտահայտվում է ծակոտկենության երկրորդ ֆունկցիայով և ունի հետևյալ տեսքը՝

$$\sigma_{hv} = \sigma_h \cdot \beta^{n+0.5}, \quad (1)$$

որտեղ σ_h -ը հոծ նյութի հոսունության սահմանն է, β -ն՝ ծակոտկենության երկրորդ ֆունկցիան, n -ը՝ ծակոտկեն նյութի մեխանիկական հատկությունները հոծ նյութի հատկությունների բերման պարամետրը:

Երկրորդ դեպքում, բացի համարժեքային լարման բանաձևից, օգտագործվում են նաև հարթ դեֆորմացման պայմանը և ՇՆՊՂՏ դեֆորմացման ու լարումների միջև կապի բանաձևը, որոնք թույլ են տալիս համարժեքային լարումը ներկայացնել շրջանային և շառավղային լարումներով: Դրա արդյունքում ստացվում է շրջանային լարման քառակուսային հավասարում, որի լուծումով շրջանային լարման բանաձևը ներկայացվում է հետևյալ տեսքով.

$$\sigma_\theta = \frac{-\sigma_r(2\alpha^{2m} + \alpha^m - 1) \pm (\alpha^m + 1) \sqrt{-12\sigma_r^2 \alpha^m (\alpha^m + 1) + \sigma_r^2 (4\alpha^{2m} + 5\alpha^m + 1)(2\beta^{n+0.5})^2 / 3}}{(4\alpha^{2m} + 5\alpha^m + 1)}, \quad (2)$$

որտեղ α -ն ծակոտկենության առաջին ֆունկցիան է, m -ը՝ նյութի իրական ծակոտկենության պարամետրը:

Նշենք, որ գրականության մեջ չկան տվյալներ տարբեր ծակոտկենությամբ շերտերի ծոման վերաբերյալ: Հետևաբար, այդ հիմնախնդիրների լուծումները բավականին արդիական են:

Աշխատանքի նպատակն է ստանալ գործնականում մեծ կիրառություն ունեցող տարբեր ծակոտկենությամբ նյութերի հոսունության սահմանների և շրջանային լարումների որոշման բանաձևերը:

Տարբեր ծակոտկենությամբ նյութերի σ_{hv} հոսունության սահմանների որոշման համար օգտագործվում են (1) բանաձևը, ծակոտկենության պարամետրերի արժեքները և պարզագույն ծակոտկենության ֆունկցիաները՝ $n = 0,25, m = 1$ և $\alpha_0 = v = v_0, \beta = 1 - v$: Այդ դեպքում (1) – ը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

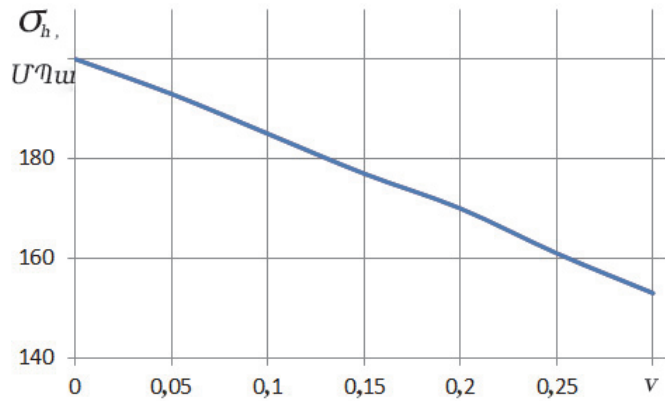
$$\sigma_{hv} = \sigma_h \cdot \beta^{n+0.5} = \sigma_h (1 - v)^{0.75}: \quad (3)$$

Տալով շերտի հիմնանյութի (նյութի հոծ մասի) հոսունության սահմանի արժեքը, (3) – ով կորոշենք տվյալ ծակոտկեն նյութի ծակոտկենությամբ արտահայտված σ_{hv} հոսունության սահմանների լարումները:

Որպես օրինակ $\sigma_h = 200 \text{ ՄՊա}$ - ի դեպքում կունենանք.

$$\begin{aligned} \sigma_{h0} &= 200, \sigma_{h5\%} = 193, \sigma_{h10\%} = 185, \sigma_{h15\%} = 177, \\ \sigma_{h20\%} &= 169, \sigma_{h25\%} = 161, \sigma_{h30\%} = 153 \text{ ՄՊա}. \end{aligned} \quad (4)$$

(4)-ում բերված տվյալների հիման վրա կառուցվել է $\sigma_{h_v} - v$ գրաֆիկը (նկ.2):



Նկ. 2. σ_{h_v} հոսունության սահմանների լարումները՝ արտահայտված նյութի ծակոտկենությամբ

(4)-ի տվյալները հնարավորություն կտան (2) - ով ստանալ σ_{θ} - ի համար հետևյալ բանաձևերը.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\theta 0} &= \sigma_r \pm \sqrt{200^2 \cdot 4/3} = \sigma_r \pm 231, \\
 \sigma_{\theta 5\%} &= 0,746\sigma_r \pm 0,83\sqrt{62224 - 0,63\sigma_r^2}, \\
 \sigma_{\theta 10\%} &= 0,570\sigma_r \pm 0,71\sqrt{70125 - 1,32\sigma_r^2}, \\
 \sigma_{\theta 15\%} &= 0,438\sigma_r \pm 0,63\sqrt{76903 - 2,07\sigma_r^2}, \\
 \sigma_{\theta 20\%} &= 0,330\sigma_r \pm 0,55\sqrt{82426 - 2,88\sigma_r^2}, \\
 \sigma_{\theta 25\%} &= 0,250\sigma_r \pm 0,50\sqrt{86667 - 3,75\sigma_r^2}, \\
 \sigma_{\theta 30\%} &= 0,180\sigma_r \pm 0,45\sqrt{89324 - 4,68\sigma_r^2}:
 \end{aligned} \tag{5}$$

Աղյուսակում բերված են շերտի լայնական AC հատույթում σ_r և σ_{θ} լարումների արժեքները տարբեր սկզբնական v_0 ծակոտկենությունների դեպքերում, երբ $R_w = 80 \text{ մմ}$, $R_{\bar{u}} = 40 \text{ մմ}$, $r_z = \sqrt{R_w R_{\bar{u}}} = 56,57 \text{ մմ}$:

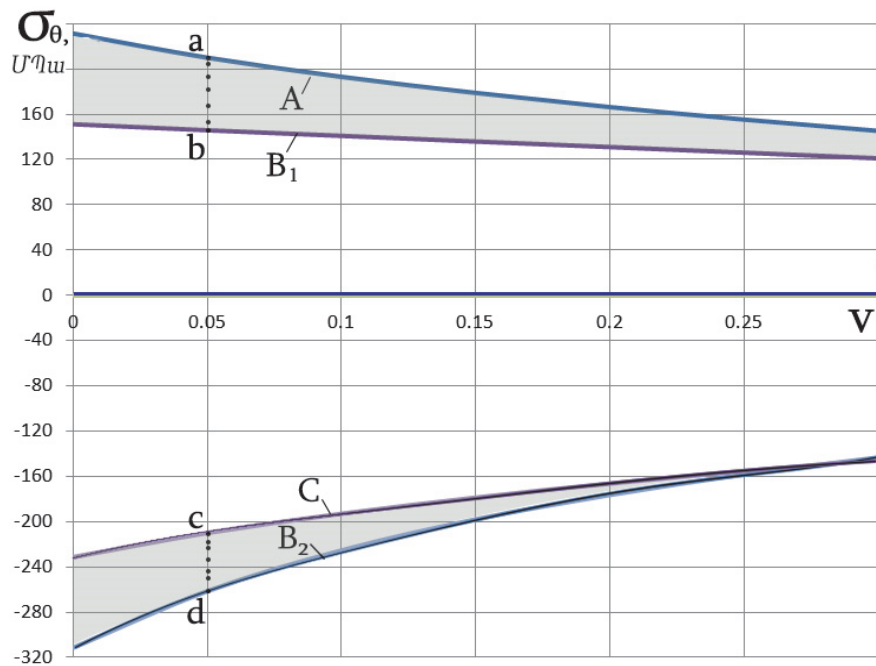
Աղյուսակ

Շերտի լայնական AC հատույթում σ_r և σ_θ լարումների արժեքները տարբեր սկզբնական v_0 ծակոտկենությունների դեպքերում, երբ $\sigma_b = 200$ ՄՊա, $\alpha_0 = v_0$, $\beta = 1 - v = 1 - v_0$, $m = 1$, $n = 0,25$

r	80	75	70	65	60	56.57	56.57	55	50	45	40
$\sigma_{\theta v_0=0}$	231,2	216,0	200,4	183,2	164,8	151,2	-311,2	-304,6	-282,6	-258,4	-231,2
$\sigma_{r v_0=0}$	0	-15,3	-30,8	-48,0	-66,4	-80,0	-80,0	-73,6	-51,6	-27,2	0
$\sigma_{\theta v_0=0.05}$	209,9	198,9	186,7	172,9	157,6	145,87	-261,34	-257,7	-244,5	-228,8	-209,9
$\sigma_{r v_0=0.05}$	0	-14,35	-29,64	-46,2	-63,9	-76,98	-76,98	-70,82	-49,65	-26,17	0
$\sigma_{\theta v_0=0.1}$	193	184,7	175,3	164,1	151,14	140,9	-225,4	-223,5	-216,2	-206,2	-193
$\sigma_{r v_0=0.1}$	0	-13,8	-28,5	-44,4	-61,4	-73,9	-73,9	-68,0	-47,7	-25,2	0
$\sigma_{\theta v_0=0.15}$	178,8	171,9	165,1	153,6	141,2	135,9	-197,9	-197,3	-194,1	-187,9	-178,7
$\sigma_{r v_0=0.15}$	0	-14,35	-27,26	-46,2	-63,9	-70,82	-70,82	-65,15	-46,7	-24,07	0
$\sigma_{\theta v_0=0.2}$	166,3	161,7	155,8	148,3	138,9	131,04	-176,4	-176,15	-175,7	-172,56	-166,3
$\sigma_{r v_0=0.2}$	0	-12,62	-26,05	-40,6	-56,16	-67,67	-67,67	-62,25	-43,64	-23,01	0
$\sigma_{\theta v_0=0.25}$	155,3	151,8	147,2	141,03	133,01	126,07	-158,3	-159,1	-160,38	-159,3	-155,3
$\sigma_{r v_0=0.25}$	0	-12,03	-24,82	-38,7	-53,52	-64,48	-64,48	-59,32	-41,6	-21,92	0
$\sigma_{\theta v_0=0.3}$	145,25	142,7	139,1	134,01	127,9	121,06	-143,3	-144,52	-147,14	-147,6	-145,25
$\sigma_{r v_0=0.3}$	0	-11,42	-23,57	-36,73	-50,81	-61,22	-61,22	-56,32	-39,48	-20,81	0

Աղյուսակի մագսված տվյալների հիման վրա կառուցվել է շրջանային լարման ծակոտկենությունից կախման $\sigma_\theta - v$ գրաֆիկը, որտեղ A -ով նշված են ձգված լարումների մեծագույն արժեքները (նկ.1, $R_w = 80$ մմ, 30% սկզբնական ծակոտկենության դեպքում, σ_θ -ի մեծությունը հոծ նյութի դեպքում փոքրացել է 37,2%-ով), B_1 -ով՝ չեզոք շերտում ձգված լարումների փոքրագույն արժեքները ($r_2 = 56,57$ մմ, այս դեպքում σ_θ -ի մեծությունը հոծ նյութի դեպքում փոքրացել է 20%-ով), B_2 -ով՝ չեզոք շերտում սեղմված լարումների փոքրագույն արժեքները ($r_2 = 56,57$ մմ, այս դեպքում՝ 54%-ով) և C -ով՝ սեղմված լարումների մեծագույն արժեքները ($R_\theta = 40$ մմ, այս դեպքում՝ 37,2%-ով):

Աղյուսակի չմագսված սյուների արժեքները համապատասխանում են տվյալ ծակոտկենության տվյալներին, օրինակ՝ 5% ծակոտկենության դեպքում դրանք գտնվում են նկ.3-ում նշված ab և cd միջակայքում:



Նկ. 3. Շրջանային լարման ծակոտկենության կախման $\sigma_\theta - v$ գրաֆիկը

Եզրակացություն. Ծակոտկեն նյութերի պլաստիկության դեֆորմացիոն տեսության հավասարումների համարժեքային լարման և շառավղային լարումով արտահայտված շրջանային լարման ընդհանուր բանաձևերի հիման վրա մշակվել է շերտի լարվածային վիճակի բաղադրիչների որոշման ալգորիթմ: MathCad ծրագրային միջավայրում կատարվել են թվային հաշվարկներ հոծ, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% և 30% ծակոտկենությամբ շերտերի շառավղային և շրջանային լարումների որոշման համար, ինչպես նաև նշված ծակոտկենությունների դեպքում որոշվել են հոսունության սահմանների մեծությունները: Ստացված նյութերի հոսունության սահմանների մեծությունների և շրջանային լարումների որոշման բանաձևերի հիման վրա կառուցվել են ծակոտկենությունից կախված գրաֆիկները, և կատարվել է դրանց վերլուծությունը: Ցույց է տրվել, որ նյութի ծակոտկենության առկայության դեպքում դրանց բացարձակ արժեքները փոքրանում են: Ընդ որում, A կորը, 30% սկզբնական ծակոտկենության դեպքում, հոծ նյութի դեպքում փոքրացել է 37,2%-ով, B₁ կորը՝ 20%-ով, B₂՝ 54%-ով, C-ն՝ 37,2%-ով:

Ուշագրավ է, որ նկ.3-ում տարբեր ծակոտկենությամբ նյութերի և շերտերի հաստության ցանկացած կետերի σ_θ շրջանային լարումների բոլոր արժեքները գտնվում են գրաֆիկի մզացված տիրույթներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. -М.: Машиностроение, 1975. -399с.
2. **Сторожев М.Б., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. -М.: Машиностроение, 1977. -423с.
3. **Молтасов А.В., Мотрунич С. И.** Исследование чистого изгиба полосы при больших деформациях на основании энергетического критерия пластичности/ИЭС им. Е.О. Патона, НАН Украины. - Киев, Украина, 2014.- С.152-158.
4. **Петросян Г.Л., Акопян Н.Г., Левонян Г.Л.** Исследование напряженного состояния изогнутой спеченной широкой полосы//Вестник НПУА: Механика, Машиноведение, Машиностроение.- 2018.-N 1.- С. 9-17.
5. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов.- М.: Металлургия, 1988. -153с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 22.06.2018:

Н.Г. АКОПЯН

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОКРУЖНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЧЕННОЙ ПОЛОСЫ С РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ, ПОДВЕРГНУТОЙ ИЗГИБУ

Рассматривается чистый изгиб полосы из спеченного неупрочняющегося материала в условиях плоской деформации. Используются эквивалентное напряжение деформационной теории пластичности пористых материалов и общее уравнение окружных напряжений, выраженных радиальными напряжениями. Получены величины пределов текучести материалов с различными пористостями и формулы для определения окружных напряжений, а также построены их графики в зависимости от пористости.

Ключевые слова: пластический чистый изгиб, спеченная полоса, пористость, плоская деформация, окружные напряжения.

N.G. AKOBYAN

THE PACULIARITIES OF DEFINING THE CIRCUMFERENTIAL STRESS OF A SINTERED STRIP WITH VARYING POROSITY

A pure bending of a strip of sintered non-reinforced material under the conditions of planar deformation is considered. The equivalent stress of the deformation theory of plasticity of porous materials and the general equations of circumferential stress expressed by radial stresses are used. The boundary values of various porous materials and the formulae for determining the circumferential stresses, as well as their graphs depending on the porosity are plotted.

Keywords: plastic pure bending, sintered strip, porosity, flat deformation, circumferential stresses.

В.А. МАРТИРОСЯН, М.Э. САСУНЦЯН, Н.Г. СААКЯН

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ МАХ-ФАЗ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ И КРЕМНИЕМ, МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза исследована возможность получения из смеси порошков FeSi, Ti, Al и сажи при разных соотношениях нового типа порошкообразной МАХ-фазы с ферромагнитными свойствами. Выбраны оптимальные условия синтеза для получения МАХ-фазы по формуле $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ с 90%-ным содержанием основного материала с включениями Fe_5Si_3 , Fe_3Si , Al_3Ti , TiC и TiSi_2 . Результаты эксперимента подтверждены микрорентгено-спектральным анализом.

Ключевые слова: порошки, титан, железо, ферросилиций, МАХ-фаза, карбид, силицид, ферромагнетик.

Введение. Развитие современных областей науки и техники требует создания новых материалов с набором различных функциональных свойств, изменяющихся в широком диапазоне. В спинтронике, являющейся одной из наиболее интенсивно развивающихся областей, существует потребность в материале, в котором сочетались бы свойства МАХ-фазы и ферромагнетика [1,2].

В последнее время был синтезирован новый тугоплавкий материал с железом [3]. Наличие этого металла обеспечит полученному веществу дополнительные магнитные свойства, что позволит создать особо термостойкие огнеупорные покрытия и сверхминиатюрные устройства хранения информации, которые будут отличаться особой слоистой структурой кристаллической решетки и уникальным сочетанием наиболее востребованных свойств металла и керамики [4]. МАХ-фазы демонстрируют высокую жесткость и упругость, устойчивость к химическому и тепловому воздействию, низкий удельный вес, малый коэффициент теплового расширения. Такие материалы хорошо проводят тепло и электрический ток. Свойства магнитных МАХ-фаз с содержанием железа позволяют также использовать их, например, для создания высокоэффективных двигателей, конструирования устойчивых к повреждениям тепловых систем с высокой стойкостью и сохранением жесткости при высоких температурах. Открываются новые возможности и для производства особо жестких и термостойких огнеупоров, высокотемпературных нагревательных элементов, покрытий для электрических контактов, устройств и механизмов для ядерной промышленности.

Известно, что МАХ-фазы представляют собой семейство тройных слоистых соединений с формальной стехиометрией $M_{n+1} A X_n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), где М – переходный *d*-металл (Ti, Fe, Ni, Co, V, Cr, Mo и др.); А – *p*-элемент (например, Si, Ga, Ge, Al, Cd, Sn и др.); X – углерод или азот.

В МАХ-фазах присутствует углерод. В таких системах, во-первых, углерод участвует как восстановитель; во-вторых, он регулирует рост кристалликов силицида железа для начальной стадии. Углерод участвует также в образовании газовых пузырьков, что придает МАХ-фазе пористость, легкость и слоистость.

Следует обратить особое внимание на МАХ-фазы, в частности на Ti_3SiC_2 , которые, в основном, получают методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Показано, что силикокарбид титана является аномально мягким материалом в сравнении с TiC , а его твердость характеризуется сильной анизотропией [5-7]. При образовании МАХ-фазы Ti_3SiC_2 промежуточной фазой всегда является силицид Ti_5Si_3 . В этих случаях преимуществом является то, что одновременно образуются как карбиды, так и силициды титана.

Важную роль играет также титан. Во многих МАХ-фазах, полученных методом СВС, процесс начинается именно с титана. Титан взаимодействует с сажей и алюминием, образуя TiC и жидкую фазу $Ti-Al$. Далее зёрна TiC при охлаждении растворяются в жидкой фазе $Ti-Al$ с образованием, например, Ti_3AlC_2 [8-11].

С учетом вышесказанного замещение титана железом полностью неоправдано. Являясь также *d*-элементом, железо мало растворяется в титане (максимум 10%), но одинаковые диаметры этих двух элементов позволяют замещать их друг в друге, образуя твердые растворы. Полное замещение алюминия кремнием также нецелесообразно с точки зрения образования интерметаллидов. Кроме того, при получении МАХ-фазы методом СВС алюминий увеличивает термичность процесса.

В данной работе для получения порошкообразной МАХ-фазы в присутствии одновременно железа и кремния нами был использован не дорогостоящий и дефицитный кремний, а моносилицид железа ($FeSi$), полученный из железо- и кремнийсодержащих отходов действующих металлургических заводов. Таким образом, синтезированная МАХ-фаза имеет следующий состав: $(Fe,Ti)_3(Al,Si)C_2$, где железо и титан выступают как *d*-элементы, а Si и Al – как *p*-элементы.

Микроструктура такого МАХ-материала, синтезированного методами порошковой металлургии (СВ синтеза), имеет слоистую, ламинатную при-

роду с магнитными свойствами и, в зависимости от температуры и времени синтеза, может быть тонкодисперсной и крупнокристаллической.

Постановка задачи. Известно, что по фазовой диаграмме Fe-Si [8], в зависимости от содержания железа и кремния, образуются силициды, богатые железом Fe_3Si , Fe_2Si , Fe_5Si_3 , FeSi и кремнием FeSi_2 , Fe_2Si_5 , которые имеют различное назначение (рис. 1).

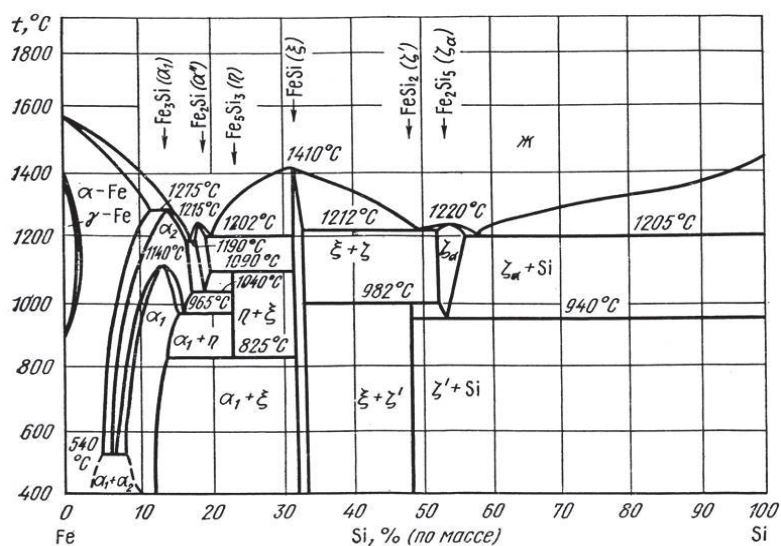


Рис. 1. Фазовая диаграмма Fe-Si

Особый интерес представляют модифицированные силициды, богатые железом Fe_3Si и $\epsilon\text{Fe}_5\text{Si}_3$, которые проявляют магнитные свойства даже при комнатной температуре. Эти силициды являются ферромагнетиками и вместе с полупроводником Si применяются в спинтронике. Образование гибридной связи ферромагнетик-полупроводник на основе модифицированных силицидов Fe_3Si и $\epsilon\text{Fe}_5\text{Si}_3$ является новым перспективным направлением в микроэлектронике.

Из указанных силицидов наиболее стабильным является моносилицид железа, который проявляет устойчивость, начиная от комнатной до высоких температур ($\sim 1400^\circ\text{C}$). Получение моносилицида более вероятно также с энергетической точки зрения. Некоторые исследователи придерживаются того мнения, что при контакте Fe-Si вначале образуется моносилицид, на базе которого затем формируются Fe_3Si , Fe_5Si_3 , FeSi_2 , Fe_2Si_5 .

Таким образом, наличие железа и кремния при получении МАХ-фаз методом СВС не отрицает получения богатых железом силицидов, которые могут придать полученному сплаву ферромагнитные свойства.

Материалы и методы. Для синтеза образцов использовались порошки: FeSi - ФС-75 (75% Si, 2 мкм), углерод технический (сажа) марки П-701 (99,5%, 2 мкм), Ti ПТС (чистота 98%, средний размер частиц 100 мкм), алюминий марки ПА-4 (99%, 50 мкм). Порошки указанных реагентов в определенных процентах по массе тщательно перетирали в фарфоровой ступке до получения однородной смеси. Синтез проводили в реакторе при атмосферном давлении. Составы синтезированных образцов определяли с помощью рентгенофазового анализа (РФА). Съемку морфологии поверхности и структуры образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения “Mira” фирмы “Tescan” (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором “Aztec”. Исследование фазового состава проводилось на рентгеновском дифрактометре Ultima IV (Rigaku) в CuK α -излучении [12].

Эксперименты по получению МАХ-фазы методом СВС проводили по методике, описанной в работе [13].

Результаты исследования и их обсуждение. Для получения МАХ-фазы по формуле (Fe,Ti)₃(Al,Si)C₂ были приготовлены три состава с избытком FeSi – 10, 20 и 30%. Исходная шихта смешивалась в различных стехиометрических соотношениях компонент: 3Ti -1(Al,Si) -2C-1FeSi, 3Ti-1Al-2C-2FeSi, 3Ti-1Al-2C-3FeSi. Наилучшие результаты, как и предполагалось, были получены при 30% избытке FeSi, поскольку с увеличением содержания FeSi увеличивается содержание железа, что приводит к получению силицидов с высокими магнитными свойствами.

На рис.2 приведен общий вид полученной МАХ- фазы.



Рис. 2. Общий вид полученной МАХ- фазы

Из приведенных выше смесей методом СВС были получены сплавы. Далее эти сплавы были использованы в качестве объектов исследования для проведения различных анализов.

Ниже приводятся результаты рентгеноструктурного анализа полученного продукта.

Выявлено, что в продуктах синтеза, кроме основной фазы $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$, присутствуют пики, принадлежащие карбиду и силициду титана ($\sim 10 \dots 15$ об.%) (рис. 3). В результате РФА установлено, что в основную фазу входят включения кристаллов Fe_3Si , Fe_5Si_3 , FeSi , а также Al_3Ti , Ti_5Si_3 и TiC .

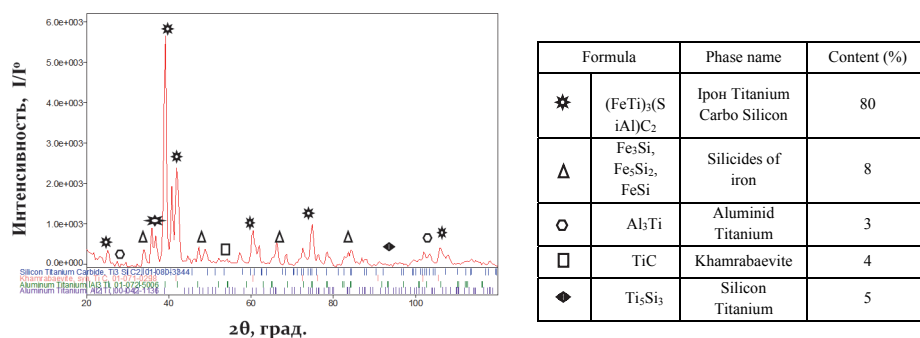


Рис. 3. Рентгенограммы СВС продуктов с избытком FeSi 30% от стехиометрии

На рис. 4 приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) по карте для полученной металлической фазы. На рисунке наблюдается неравномерное распределение фаз как в зернах основной фазы (рис. 4а), так и на микрофотографиях, полученных с помощью сканирующего микроскопа (рис. 4б).

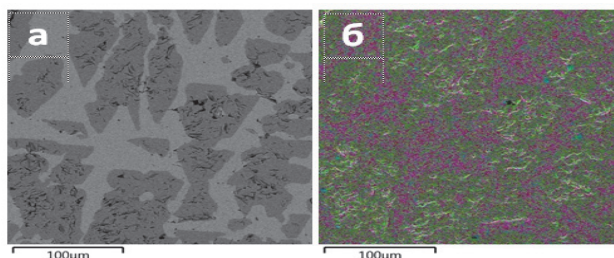


Рис. 4. Фазовый состав (а) и микрофотография (б) полученного продукта, $\times 500$

Как видно из рисунка, металлическая фаза состоит из основной фазы, а также заметны черные точки, характерные для силицидов железа. В процессе гомогенизации взаимодействие фаз сульфидов железа сопровождается формированием двух и более твердых растворов разупорядоченной структуры типа $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$. Зерна этих фаз со средним размером около $25 \dots 50$ мкм сохраняют четко выраженные границы. Включения фазы, обогащенные силицидами железа, локализуются преимущественно на границе зерен.

Для точного выяснения определения содержания полученных продуктов и эволюции распределения Ме по размерам был применен современный

микрорентгеноспектральный метод анализа. Ход анализа проходит в следующей последовательности (рис. 5а-в). Для нашего случая сняты три спектра. В таблице приводится химический состав отдельных спектров.

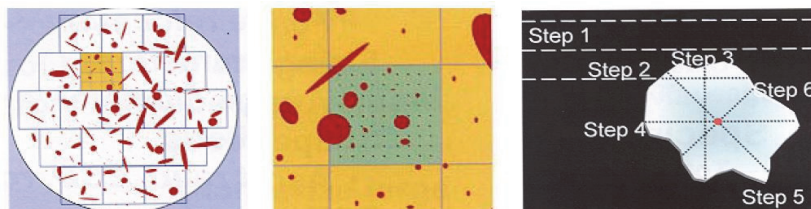


Рис. 5. Автоматический анализ включений: а - разделение изображения на поля; б - перемещение электронного пучка по полю в массиве; в - определение размеров частиц, обнаруженных обратно рассеянными электронами, центрирование пучка на каждой частице и получение состава с помощью МРСА

Как видно из таблицы, количество алюминия заметно снизилось. Причина этого в том, что часть алюминия входит в состав шлака в виде алюминатов. Алюминий с кремнием не реагирует. Титан также плохо растворяется в железе (растворимость титана в α -Fe не превышает 9,8 ат. %), но так как радиусы титана и железа почти одинаковы, они в кристаллической решетке МАХ-фазы заменяют друг друга. Часть углерода связана с титаном в виде карбидов.

Таблица

Общий состав элементов, в % по массе

Название спектра	Al	Si	Ti	C	Fe
Спектр 1	0,54	22,65	7,68	1,18	67,95
Спектр 2	0,46	22,84	6,85	1,33	68,52
Спектр 3	0,38	22,82	6,76	0,93	68,95
Усреднение	0,46	22,82	7,04	0,81	68,47

На рис. 6 показано распределение отдельных элементов в составе МАХ-фазы.

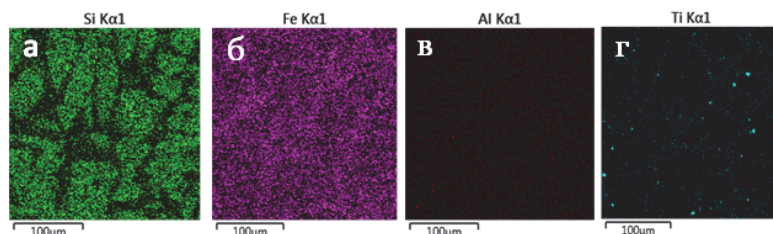


Рис. 6. Результаты исследования образца СВС продукта: а – г - результаты МРСА по карте

Как видно из этих рисунков, распределение отдельных элементов в сплаве также неравномерно. В основном в сплаве преобладают кремний, железо и титан. Количество алюминия небольшое (рис. 6в), что, по-видимому, связано с переходом его в шлак.

Проведена визуальная оценка вариаций химического состава. Пиксели со спектрами (одинакового состава) представлены одинаковым цветом.

На рис. 7а,б приведен концентрационный профиль распределения элементов по линиям 1 и 2 для образца 2.

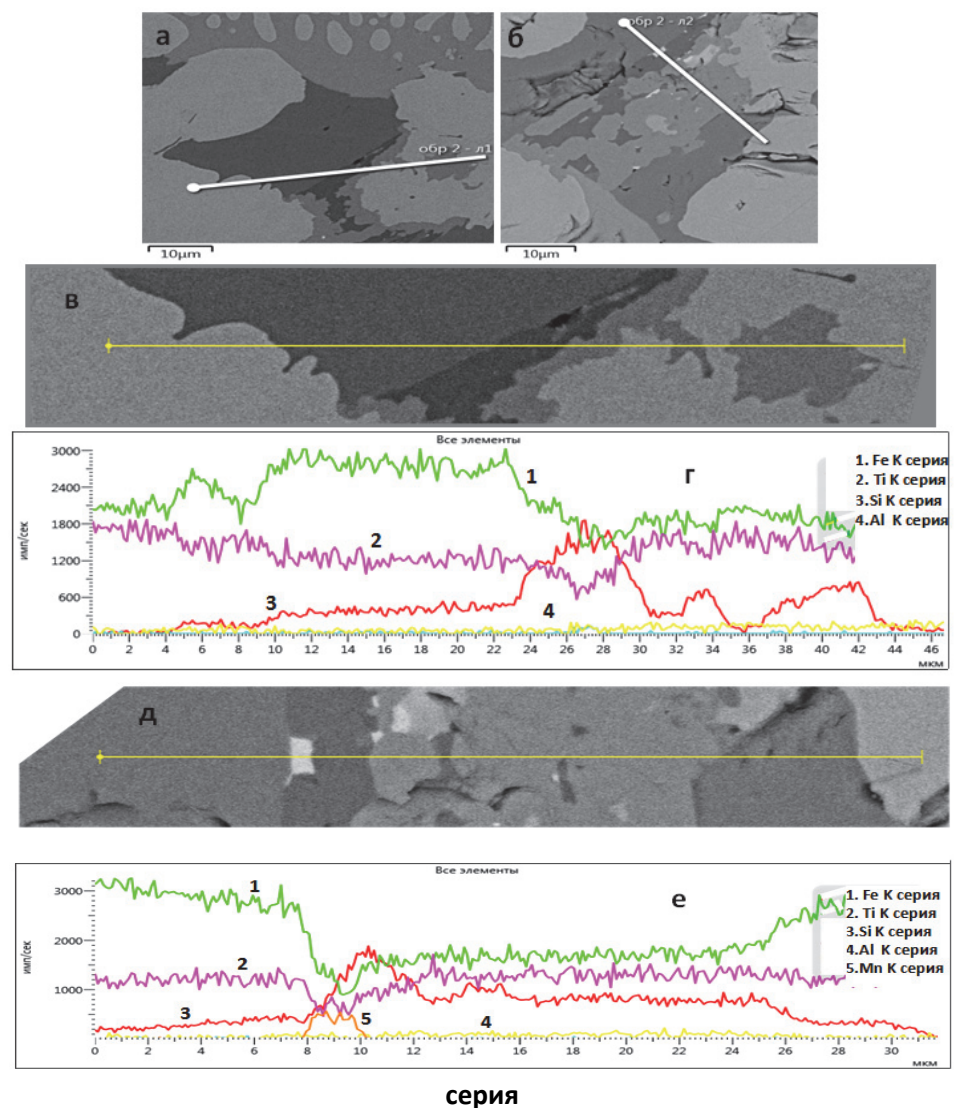


Рис. 7. Результаты МРСА по линиям образца № 2

Результаты МРСА показывают, что основные фазы представляют собой железо, кремний и титан (рис. 7г и е). По данным количественного РФА, содержание карбида титана (TiC) в образце наименьшее. Также обнаруживается 5% TiSi_2 . Но эти соединения на рентгенограммах (рис. 3) и на рисунках (рис. 7г и е) не фиксируются.

По линии 1 (рис. 7а,в,г) пространства размерами частиц 0...9 мкм находятся в гомогенной фазе. Но концентрационные профили показывают (рис. 7г), что вид кривых часто меняется в связи с образованием разных новых фаз. Пространства размерами частиц 9...21 мкм занимают большую территорию, напоминающую область силицидов железа (Fe_5Si_3), которая повторяется также от 34...40 мкм. Пространства размерами 24...30 мкм сопровождаются новообразованиями, которые тянутся по длине 34...42 мкм. Эти силициды находятся в гомогенной МАХ- фазе. В верхней части в нескольких местах линии заметны черные точки, напоминающие различные карбиды и силициды титана и алюминия. Это, по-видимому, связано с переходами богатых железом различных силицидов (Fe_5Si_3 , Fe_3Si , FeSi) разных форм.

По линии 2 (рис. 7 б,д,е) пространство размерами частиц до 8 мкм находится в гомогенной фазе. В пространстве размерами частиц 8...9 мкм образуется новая фаза, напоминающая квадрат. По-видимому, эта фаза напоминает включения карбида (TiC) или силицида титана (TiSi_2). Для пространств размерами частиц 9...11 мкм также характерно изменение фаз. Этот конгломерат похож на силицид железа (Fe_5Si_3). Пространство частиц размерами от 11...14 мкм напоминает образование новой фазы, чуть округленной формы, напоминающей другой силицид железа (Fe_3Si). Пространство размерами частицы 16...25 и 28...30 мкм - это основная МАХ фаза. Между ними фаза, напоминающая фазу 0...8 мкм, также гомогенная.

Таким образом, результаты МРСА подтвердили данные РФА. Полученная основная МАХ-фаза находится в смеси с другими фазами, т.е. разнородная. В основной гомогенной массе есть разные вкрапления силицидов, алюминидов и карбидов титана и железа, что также подтверждается данными РФА (рис. 3).

Экспериментальные исследования показали, что после инициирования горения в режиме СВС удастся получить продукт, который после охлаждения представляет собой слоистый, легкий и более устойчивый пористый материал (рис. 8). После измельчения получается порошкообразная МАХ-фаза, представляющая собой композит для получения различных материалов методом порошковой металлургии. Благодаря содержанию железа и кремния полученный продукт жесткий и сохраняет все свойства композитов, поскольку в нем, кроме карбидов железа и титана, содержатся также силициды этих металлов.

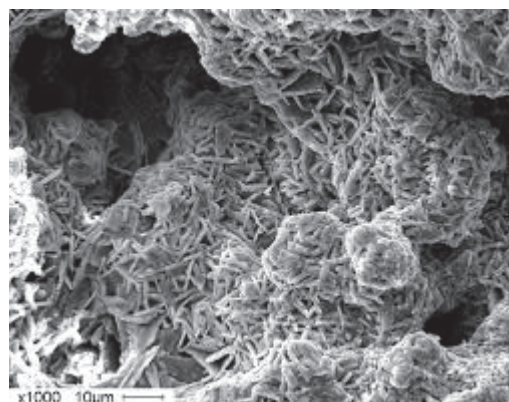


Рис. 8. Структура поверхности продукта синтеза в системе Ti–Fe–Si–Al–C, полученного методом СВС

Заключение. Эксперименты показали, что из порошков ферросилиция, титана, алюминия и сажи методом СВС можно получить МАХ-фазу неравномерного строения, содержащую основную массу $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ и вкрапления различного размера и формы твердых растворов силицидов и карбидов титана и железа. Следует отметить, что в ходе фазообразования титан и железо проявляют одинаковый характер по отношению к силицидам и карбидам.

Таким образом, в результате синтеза был получен неоднородный материал, содержащий кубическую фазу двойного карбида $(\text{Fe,Ti})\text{C}$ и МАХ-фазу $(\text{Fe,Ti})_3\text{Al, SiC}_2$. Проведенный с использованием структурных данных количественный анализ материала трех независимых экспериментов показал, что содержание включений составляет 10% по массе, а содержание фазы $(\text{Fe,Ti})_3(\text{AlSi})\text{C}_2$ достигает 90% по массе.

Определены основные кристаллографические параметры синтезированной фазы $(\text{Fe,Ti})_3\text{Al SiC}_2$. Установлено, что эта фаза относится к гексагональной сингонии и представляет собой твердый раствор со структурой, в которой атомы Ti и Fe расположены в металлоуглеродистом слое разупорядоченно, занимая в равных долях позиции в структуре. Наличие силицидов, богатых железом, придает полученной МАХ-фазе магнитные свойства. После получения МАХ-фазы путем измельчения образуются порошки продукта.

Таким образом, из смеси порошков ферросилиция, титана, алюминия и сажи методом СВС можно получить порошковый продукт, в котором содержание МАХ-фазы по формуле $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ составляет 90% по массе, а содержание включений, богатых железом кристаллов Fe_5Si_3 , Fe_3Si и FeSi , а также Al_4C_3 , Ti_5Si_3 и TiC составляет 10% по массе, что придает основной массе магнитные свойства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Армяно-Белорусского совместного гранта (грант 16.АБ-48).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ando K.** Magneto-optics of diluted magnetic semiconductors: New materials and applications // Magneto-Optics.- Springer.- Berlin, Germany, 2000.- Vol. 128.- P. 211-241.
2. **Otani Y., Miyajima R., Chikazumi S.** Large Barkhausen jumps observed in Nd-Fe-B sintered magnets at very low temperatures // IEEE Trans. Magn. – 1989.- V. 25, №5.- P. 3421-3433.
3. **Baranov N.V., Sinitsyn E.V., Ignatyev E.A., Andreev S.V.** Magnetization reversal of Nd-Fe-B sintered magnets at low temperatures // JMMM.-1994.- V. 130. – P. 133-137.
4. Nd-Fe-B permanent magnet materials / **M. Sagawa, S. Hirosawa, H. Yamaoto, et al** // J. Appl. Phys. – 1987.- V.26, № 6. – P. 785-800.
5. **Медведева Н.И., Еняшин А.Н., Ивановский А.Л.** Моделирование электронного строения, химической связи и свойств тройного силикокарбида Ti_3SiC_2 // Журнал структурной химии. – 2011. – Т. 52, №4. – С. 806–822.
6. **Barsoum M.** The M_n+1AX_n phases: a new class of solids // Prog. SolidSt. Chem. – 2000. – № 28. – P. 201–281.
7. **Получение Ti_3SiC_2** / **П.В. Истомин, А.В. Надуткин, Ю.И. Рябков и др.** // Неорганические материалы. – 2006. – Т. 42, № 3. – С. 292–297.
8. Диаграмма состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3-х томах. Т.2 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева.-М.: Машиностроение, 1997.-1024 с.
9. Определение оптимальных условий синтеза в тройной системе Ti–Al–N для получения продуктов, содержащих наибольшее количество MAX-фаз / **С.И. Колесников** и др. // Башкир. хим. журнал. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 162–165.
10. **Zhang Z.F., Sun Z.M., Hashimoto H.** Deformation and fracture behavior of ternary compound Ti_3SiC_2 at 25–1300 °C // J. Materials Letters. – 2003. – № 57. – P. 1295–1299.
11. **Lacaze J., Sundman B.** An assessment of the Fe-C-Si system // Metall. Trans.,A.- 1991.-V.22, №10.-P. 2211-2223.
12. **Ревенко А.Г.** Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1994. - 264 с.
13. **Сасунцян М.Э.** Высокотемпературный синтез моносилицида железа из производственных шлаков // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. Техн. наук. -2018.- Вып. 71, N1.-С. 3-9.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 12.09.2018.

Վ.Հ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Մ.Է. ՍԱՍՈՒՆՅԱՆ, Ն.Գ. ՍԱՀԱԿՅԱՆ

**ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԻՆՔՆԱՏԱՐԱԾՎՈՂ ՍԻՆԹԵԶԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ
ԵՐԿԱԹՈՎ ԵՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ MAX-ՖԱԶԻ ՓՈՇՈՒ ՍՏԱՑՈՒՄԸ**

Բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի եղանակով ուսումնասիրվել է ֆերոմագնիսական հատկություններով օժտված նոր տեսակի MAX-ֆազի ստացման հնարավորությունը, օգտագործելով FeSi-ի, Ti-ի Al-ի և ածխածնի փոշիառնությունը՝ վերցված տարբեր հարաբերություններով: Ընտրված են սինթեզի օպտիմալ պայմանները, որոնք թույլ են տալիս ստանալ MAX-ֆազ հետևյալ բանաձևով՝ $(\text{Fe,Ti})_3 (\text{Al,Si})\text{C}_2$, հիմնական նյութի 90% պարունակությամբ և 10% Fe_5Si_3 , Fe_3Si , FeSi , Al_4C_3 , TiC , Ti_5Si_3 արգասիքների ներգրավմամբ: Փորձարկումների արդյունքները հաստատագրվել են միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծության եղանակով:

Առանցքային բառեր. փոշիներ, տիտան, երկաթ, ֆերոսիլիցիում, MAX-ֆազ, կարբիդ, սիլիցիդ, ֆերոմագնետիկ:

V.H. MARTIROSYAN, M.E. SASUNTSYAN, N.G. SAHAKYAN

**OBTAINING MAX-PHASE POWDERS DOPED WITH IRON AND SILICON BY
THE METHOD OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS**

The possibility of obtaining a new type of MAX- phases, possessing ferromagnetic properties from a mixture of FeSi, Ti, Al and soot powders at different ratios has been studied by the method of self-propagating high-temperature synthesis. The optimal synthesis conditions for obtaining MAX phases were chosen according to the formula: $(\text{Fe, Ti})_3 (\text{Al, Si})\text{C}_2$, with a 90% content of the base material, with inclusions of 10% Fe_5Si_3 , Fe_3Si , FeSi , Al_4C_3 , TiC and Ti_5Si_3 . The results of the experiment have been confirmed by the method of micro-X-ray spectral analysis.

Keywords: powders, titanium, iron, ferrosilicon, MAX- phase, carbide, silicide, ferromagnet.

Է.Գ. ԶԱՔԱՐՅԱՆ

**ԹԵՂՈՒՏԻ ՆԱԽԱՊԵՍ ՄԵԽԱՆԱԱԿՏԻՎԱՑՎԱԾ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՅԻՆ
ԽՏԱՆՑՈՒԹՅՑ ՖԵՐՈՄՈԼԻԲԴԵՆԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Քննարկվում է Թեղուտի հարստացուցիչ ֆաբրիկայում արտադրվող մոլիբդենիտային խտանյութից ֆերոմոլիբդենի ստացման գործընթացը: Ցույց է տրվել, որ հանրապետությունում գործող երկու գործարանները, որոնք Քաջարանի մոլիբդենիտային խտանյութից սիլիկաջերմային վերականգնման եղանակով ստանում են ֆերոմոլիբդեն, անհրաժեշտաբար պետք է հաղթահարեն որոշակի դժվարություններ: Դեռևս լուծված չէ SO_2 -ի կորզման խնդիրը, որը բնապահպանական լուրջ դժվարություն է ստեղծում շրջակա միջավայրի համար: Այդ է պատճառը, որ վերջին տարիներին մեծ հետաքրքրություն է առաջացել Թեղուտի սուլֆիդային հանքանյութերի ալյումինաջերմային վերականգնման եղանակը, որի զուգակցումը նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման հետ կնպաստի օքսիդացման-վերականգնման գործընթացների հետագա ինտենսիվացմանը և սկզբունքորեն նոր, մոդիֆիկացված արգասիքների ստացմանը՝ միաժամանակ շրջանցելով թրծման վտանգավոր գործընթացը:

Փորձարարական հետազոտությունների արդյունքում որոշվել այն լավարկված պայմանները, որոնք թույլ կտան Թեղուտի նախապես մեխանաքիմիական ակտիվացման ենթարկված մոլիբդենային խտանյութից ստանալ ֆերոմոլիբդենային համաձուլվածք՝ 96,5% ելքով: Կատարված փորձերի արդյունքները հաստատագրվել են քիմիական, ռենտգենաֆազային և տեսաձևով էլեկտրոնային մանրադիտակային հետազոտություններով:

Առանցքային բառեր. մոլիբդենիտ, խտանյութ, ֆերոմոլիբդեն, մեխանաակտիվացում, համաձուլվածք, բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզ:

Ներածություն: ՀՀ տնտեսության զարգացման տեսանկյունից կարևոր տեղ է հատկացվում պահանջվող հատկություններով նյութերի ստեղծմանը և առաջատար տեխնոլոգիաներով դրանց ստացման եղանակների մշակմանը: Դա հատկապես վերաբերում է նոր կառուցվածքով համաձուլվածքների ստեղծմանը, որոնք աչքի են ընկնում բարձր ամրությամբ, մաշակայունությամբ և զանազան ագրեսիվ միջավայրերի նկատմամբ կոռոզիակայունությամբ: Այդպիսի համաձուլվածքներից է ֆերոմոլիբդենը, որը կիրառվում է հիմնականում որպես լեգիրող հավելանյութ պողպատի և մի շարք գունավոր մետաղների մետալուրգիայում [1, 2]: Ֆերոմոլիբդենի ստացման համար որպես ելանյութ կարող է ծառայել Թեղուտի պղնձամոլիբդենային հանքանյութերից ստացված մոլիբդենիտային խտանյութը՝ 52...55% մոլիբդենի պարունակությամբ:

Ներկայումս Քաջարանի հարստացուցիչ ֆաբրիկայում արտադրվող մոլիբդենիտային խտանյութերի հիմքի վրա հանրապետությունում գործում են «Մաքուր երկաթ» և «Արմենիան մոլիբդեն փրոդաքշն» գործարանները, որոնք սիլիկաջերմային վերականգնման եղանակով ստանում են ֆերոմոլիբդեն: Սակայն վերականգնման այս եղանակով ֆերոմոլիբդենի արտադրությունը հանրապետությունում կապված է որոշակի դժվարությունների հետ: Դեռևս չլուծված է մնում SO_2 -ի կորզման հարցը, որը բնապահպանական մեծ դժվարություն է ստեղծում շրջակա միջավայրի համար [1]: Այդ է պատճառը, որ մոլիբդենիտային խտանյութերի վերամշակման նոր եղանակը, որը շրջանցում է SO_2 -ի առաջացումը և արտանետումը շրջակա միջավայր, խիստ արդիական խնդիր է: Մշակելով ոչ ավանդական տեխնոլոգիա և շրջանցելով SO_2 -ի առաջացումը, հնարավորություն կստեղծվի փոքր տնտեսական ծախսերով կորզել մոլիբդենը և երկաթը ֆերոմոլիբդենի ձևով: Այս տեսակետից մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում սուլֆիդային հանքանյութերի մշակումը այլումինաջերմային վերականգնման եղանակով, այն զուգակցելով նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման հետ, որը կնպաստի հետագա օքսիդավերականգնման գործընթացների ինտենսիվացմանը և սկզբունքային նոր մոդիֆիկացված արգասիքների ստացմանը, միաժամանակ շրջանցելով թրծման վտանգավոր գործընթացը [3, 4]: Նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացումը կնպաստի խտանյութում պարունակվող մոլիբդենիտ միներալի քիմիական ակտիվացման մեծացմանը և հետագա այլումինաջերմային վերականգնման գործընթացի անհամեմատ ցածր ջերմաստիճաններում ընթանալուն, որն էլ իր հերթին կնպաստի ստացված ֆերոմոլիբդենի կառուցվածքի լավացմանը [5, 6]:

Այսպիսով, Թեղուտի մոլիբդենային խտանյութերից ֆերոմոլիբդենի ստացման ժամանակակից տեխնոլոգիայի մշակումը խիստ արդիական է և բխում է հանրապետության տնտեսության արդի պահանջներից:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Ելնելով վերոհիշյալից՝ աշխատանքի նպատակն է Թեղուտի նախապես մեխանաակտիվացված մոլիբդենիտային խտանյութերի այլումինաջերմային վերականգնման եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիական օրինաչափությունների մշակումը, որոնք թույլ կտան ստանալ համասեռ կառուցվածքով և առավելագույն ելքով ֆերոմոլիբդեն:

Հետազոտության համար ընտրվել է Թեղուտի մոլիբդենիտային խտանյութը հետևյալ բաղադրությամբ (աղ.):

Թեղուտի մոլիբդենիտային խտանյութի բաղադրությունը

Քիմիական բաղադրությունը, %										
MoO ₃	Mo	Cu	S	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Zn	CaO	MgO
74,25	49,5	0,85	35,6	1,7	2,9	3,5	0,02	0,002	2,0	1,0

Ռենտգենաֆազային հետազոտություններն իրականացվել է ED 2000 տիպի ատեստավորված ռենտգենաֆլյուրեսցենտային և “Oxford Instruments Analytical” (Մեծ բրիտանիա) ֆիրմայի սպեկտրաչափով [6, 7]:

Մակերեսների մորֆոլոգիական ուսումնասիրությունները կատարվել են բարձր ճշտություն ապահովող «Mira» ֆիրմայի «Tescan» (Չեխոսլովակիա) տեսաձրող էլեկտրոնային մանրադիտակի և «INCA Energy 350» տիպի միկրոռենտգենասպեկտրային անալիզատորի միջոցով [8].

Հետազոտության արդյունքները: Քննարկվել է Թեղուտի մոլիբդենիտային խտանյութի այրումինաջերմային վերականգնման գործընթացը՝ 36,84% Fe և 63,16% Fe բաղադրությամբ ֆերոմոլիբդենային համաձուլվածքի ստացման նպատակով [1, 2]: Ընտրվել է բովախառնուրդի հետևյալ բաղադրությունը՝ մոլիբդենիտային խտանյութ - 47,09%, երկաթի տաշեղներ - 10,51%, Al-ի փոշի - 18,99%, NaNO₃ - 4,71%, կիր - 15,82%, CaF₂ - 2,88%: Նշված բաղադրություններով կազմված բովախառնուրդը, բացի մոլիբդենիտային խտանյութից և երկաթի տաշեղներից, պարունակել է նաև այլ բաղադրիչներ: Մասնավորապես՝ բովախառնուրդի թերմիկությունը մեծացնելու նպատակով ավելացվել է NaNO₃, իսկ խարամագոյացման համար՝ CaO:

Նկ. 1 - ում ցույց է տրված ֆերոմոլիբդենի ստացման գործընթացը բովախառնուրդի այրման պահին: Փորձերից հետո ստացված մետաղական զանգվածը կշռվել և ենթարկվել է ինչպես քիմիական, այնպես էլ ռենտգենաֆազային և էլեկտրոնային տեսաձրող մանրադիտակային վերլուծության:

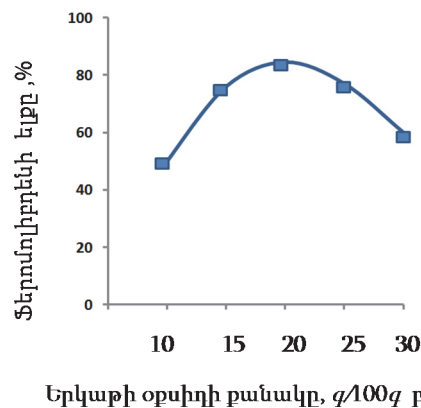


Նկ. 1. Ֆերոմոլիբդենի ստացումը բովախառնուրդի այրման պահին

Որոշվել է մետաղի գումարային ելքը, որը ներկայացրել է փորձի արդյունքում ստացված և տեսականորեն հաշվված ֆերոմոլիբդենի զանգվածների հարաբերությունը՝ արտահայտված տոկոսներով:

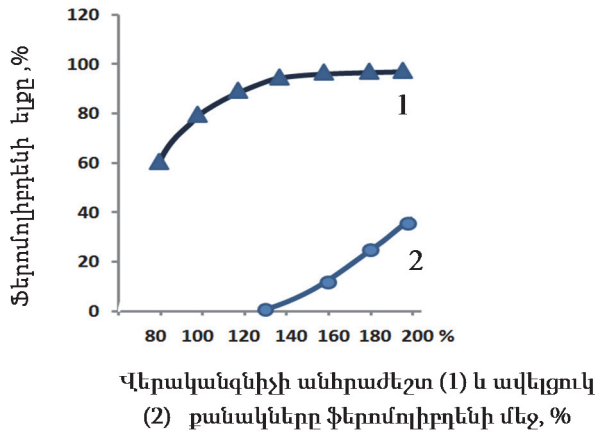
Առաջին փորձի ընթացքում ուսումնասիրվել է ֆերոմոլիբդենի ելքի կախումը երկաթի տաշեղների քանակից: Փորձերում երկաթի տաշեղների փոխարեն վերցվել է ավելի էժան Fe_2O_3 : Ըստ տեսական հաշվարկի՝ 10,51g երկաթին համարժեք է 15g Fe_2O_3 : Դա ստեխիոչափային քանակն է (100%): Փորձերի համար վերցվել են Fe_2O_3 -ի ստեխիոչափից բարձր տարբեր քանակներ: Բովախառնուրդը կազմող մնացած բաղադրիչների քանակները պահպանվել են ըստ վերը նշված բաղադրության:

Ինչպես երևում է նկ. 2-ից, ֆերոմոլիբդենի կորզման աստիճանն իր առավելագույն արժեքին հասնում է (84,5%) 20g Fe_2O_3 -ի պարունակության կամ ստեխիոչափային քանակից 130% ավելցուկի դեպքում, երբ համաձուլվածքը հիմնականում բաղկացած է երկաթից և մոլիբդենից՝ ալյումինի չնչին պարունակությամբ: Fe_2O_3 -ի քանակի հետագա մեծացումը հանգեցնում է ֆերոմոլիբդենի ելքի նվազման, քանի որ մետաղական ֆազ է անցնում նաև ալյումինը:



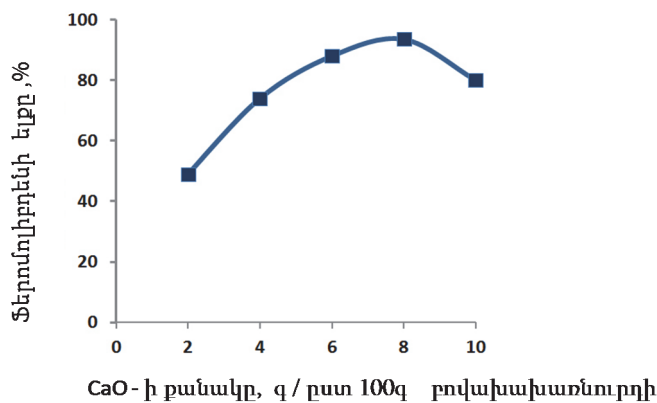
Նկ. 2. Ֆերոմոլիբդենի ելքը՝ կախված երկաթի օքսիդի քանակներից (q)

Ուսումնասիրվել է նաև ֆերոմոլիբդենի ելքի կախումը վերականգնիչի քանակից՝ Fe_2O_3 -ի 20g/100g բովախառնուրդում: Ինչպես երևում է նկ. 3 - ից, Al-ի տեսական քանակից 130% ավելցուկի պայմաններում ֆերոմոլիբդենի կորզման աստիճանն առավելագույնն է և կազմում է 92,4%: Վերականգնիչի քանակի հետագա ավելացումը հանգեցնում է մետաղի ելքի մեծացման, սակայն այս դեպքում համաձուլվածքի մեջ աճում է ալյումինի քանակը և տեսական քանակից 200% ալյումինի ավելցուկի դեպքում հասնում է իր առավելագույն արժեքին՝ մինչև 50% Al:



Նկ. 3. Վերականգնիչի քանակը՝ ըստ տեսականորեն անհրաժեշտ քանակի, % (1) և ստացված մետաղական ֆազում ալյումինի քանակը, % (2)

Ուսումնասիրվել է նաև մետաղի ելքի կախումը CaO -ի լավարկված քանակից՝ Fe_2O_3 -ի 20գ/100գ բովախառնուրդում և վերականգնիչի 130% ավելցուկի պայմաններում (նկ. 4): CaO -ն խարամագոյացնող հալանյութ է, որը բովախառնուրդի մեջ մտցնելու հիմնական նպատակը որոշակի ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերով խարամային հալույթի ստացումն է և մետաղական ֆազի ու խարամի հնարավորինս լրիվ բաժանման հնարավորության ապահովումը: CaO -ն կապում է թթվային օքսիդները՝ հատկապես ավելցուկ SiO_2 -ի և գոյացած Al_2O_3 -ի պարունակությունները խարամի մեջ, տեղաշարժելով վերականգնման ռեակցիայի հավասարակշռությունը ձախից աջ:

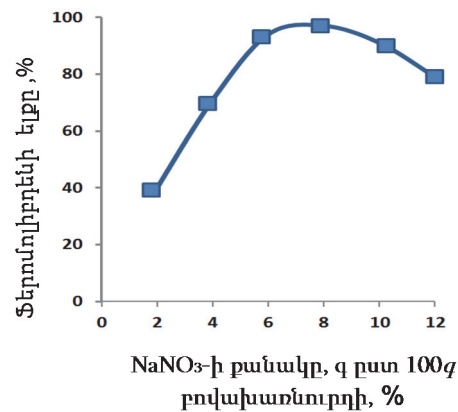


Նկ. 4. Ֆերոմոլիբդենի ելքի կախումը CaO -ի քանակից

Ուսումնասիրվել է ֆերոմոլիբդենի ելքի կախումը բովախառնուրդում NaNO_3 -ի քանակից (նկ. 5): NaNO_3 -ը մեծացնում է բովախառնուրդի թերմիկությունը,

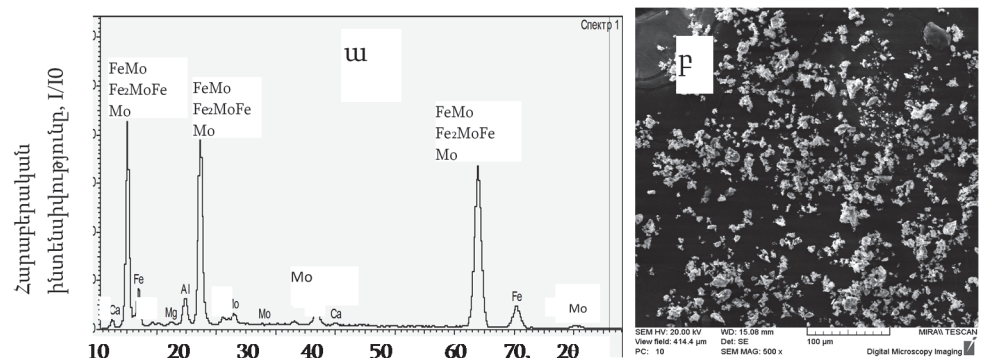
որը հանգեցնում է մետաղի կորզման աստիճանի մեծացման: Մինչև 6 %՝ ըստ բովախառնուրդի զանգվածի NaNO_3 -ի ավելացումից ֆերոմոլիբդենի կորզման աստիճանը հասնում է իր առավելագույն արժեքին՝ 95,6%: NaNO_3 -ի ավելի մեծ քանակների դեպքում ֆերոմոլիբդենի ելքը նվազում է՝ կապված մետաղի ցայտումների հետ:

Այլումինաջերմային վերականգնման գործընթացում բովախառնուրդի հեղուկահոսունությունը մեծացնելու նպատակով ավելացվում է նաև CaF_2 բովախառնուրդի զանգվածի 5%-ի չափով: Այսպիսով, բովախառնուրդի լավարկված բաղադրությունն է մոլիբդենիտային խտանյութի՝ Fe_2O_3 -ի 20գ, այլումինի փոշու տեսական քանակից 130% ավելցուկի և CaO -ի 8, NaNO_3 -ի 6 և CaF_2 -ի 5%, ըստ 100գ բովախառնուրդի զանգվածի պարունակությունները: Այդ պայմաններում ստացվում է մոնոֆերոմոլիբդեն՝ FeMo համաձուլվածքը, այլումինի չնչին հետքերով:



Նկ. 5. Ֆերոմոլիբդենի ելքի կախումը NaNO_3 -ի քանակից, %

Ստացված ֆերոմոլիբդենը ենթարկվել է նաև ռենտգենաֆազային (նկ. 6ա) և տեսաձրող էլեկտրոնային մանրադիտակային (նկ. 6բ) վերլուծության:



Նկ. 6. Մոլիբդենիտային խտանյութի այլումինաջերմային վերականգնումից ստացված մետաղական ֆազի ռենտգենագիրը (ա) և միկրոկառուցվածքը (բ)

Ինչպես երևում է ռենտգենագրերից, մետաղական ֆազը հիմնականում բաղկացած է հետևյալ արտացոլումներից՝ FeMo (2.00x; 1.82x; 1.198 Å), Fe₂Mo (2.03x; 1.173; 1.432 Å): Դա համապատասխանում է ֆերոմոլիբդենային համաձուլվածքին՝ FeMo բանաձևով (ա), որն ունի բավական համասեռ միկրոկառուցվածք (բ): Նկատվում են նաև Al-ի աննշան պարունակության արտացոլումներ: Այդ պայմաններում ստացված համաձուլվածքն ունի հետևյալ քիմիական բաղադրությունը՝ 36,80% Fe, 63,16% Mo և 0,4% Al: Ըստ Fe-Mo վիճակի դիագրամի՝ ստացված համաձուլվածքը գտնվում է Mo+FeMo տիրույթում:

Եզրակացություն: Վերլուծության արդյունքները հաստատում են, որ փորձնականորեն կարգավորելով տեխնոլոգիական պայմանները՝ հնարավոր է Թեղուտի նախապես մեխանակտիվացված մոլիբդենիտային խտանյութի ալյումինաթերմային վերականգնման եղանակով ստանալ արժեքավոր ֆերոմոլիբդեն՝ 95,6% մետաղի ելքով: Միաժամանակ լուծվում են բնապահպանական հարցեր: Հետևաբար, շնորհիվ մեխանաքիմիական ակտիվացման, մոլիբդենիտային խտանյութի ալյումինաթերմային վերականգնման ռեակցիաներն ընթանում են նոր, միանգամայն չնախատեսված ընթացքով, որը հանգեցնում է մաքուր՝ խառնուրդներից զուրկ, մետաղական ֆերոմոլիբդեն համաձուլվածքի ստացմանը: Դա կարևոր տեխնոլոգիական նշանակություն ունեցող խնդիր է մոլիբդեն պարունակող սուլֆիդային խտանյութերի ալյումինաթերմային վերականգնման ուղղակի անվառարան գործընթացի իրականացման առումով:

Այսպիսով, հնարավորություն է ստեղծվում ռեակցվող նյութերի դիսպերսության մեծացման հաշվին շրջանցել մոլիբդենիտային խտանյութի դժվարին և աշխատատար թրծման գործընթացները և կատարել խտանյութի ուղղակի ալյումինաթերմային վերականգնում: Դիսպերսայնության մեծացումը նպաստում է նաև վերականգնման գործընթացում տեղի ունեցող ռեակցիաների ինտենսիվության մեծացմանը:

Հետազոտությունն իրականացվել է Հայ-Բելառուսական համատեղ 16 ՀԲ-48 գիտական նախագծի՝ ՀՀ ԳԳՆ ԳՊԿ-ի կողմից տրամադրվող ֆինանսական աջակցության շրջանակներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Зеликман А.Н. Молибден. – М.: Металлургия, 1978. – 438 с.
2. Перельман Ф.М., Зворыкин А.Я. Молибден и вольфрам. – М.: Наука, 1968. – 214с.
3. Аввакумов Е.Г., Болдырев В.В., Кособудский И.Д. Механическая активация твердофазных реакций. Сообщ. 1: О взаимодействии пирита с железом // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук.-1972.- Вып. 4, N9.- С. 45-50.

4. **Болдырев В.В.** Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии / РАН.- 2006.- Т.75, вып. 3.- С. 203-216.
5. **Мержанов А.Г.** Процессы горения в физикохимии и технологии неорганических материалов // Успехи химии.- 2003.-Т. 72, № 4.- С. 323-339.
6. **Ищенко А.А., Киселев Ю.Н.** Рентгенофазовый анализ.- М.: МИТХТ им. Ломоносова, 2008.- 52с.
7. **Ревенко А.Г.** Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов.- Новосибирск: Наука, 1994.- 264 с.
8. **Ищенко А.А., Киселев Ю.Н.** Рентгенофазовый анализ.- М.: МИТХТ им. Ломоносова, 2008.- 52с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 07.05.2018:

Э.Г. ЗАКАРЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМОЛИБДЕНА ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ТЕХУТСКОГО МОЛИБДЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Обсуждаются вопросы получения ферромolibдена из молибденитового концентрата, полученного из обогащительных фабрик Техута. Действующие в республике два завода производят ферромolibден из Каджаранского концентрата силикотермическим методом восстановления, что вызывает определенные затруднения. Пока не решен вопрос утилизации SO_2 , что создает экологические затруднения для окружающей среды. С этой точки зрения представляет интерес разработка сульфидных концентратов Техута путем сочетания методов механоактивации и металлотермического восстановления, что будет способствовать интенсификации дальнейших окислительно-восстановительных процессов и получению принципиально нового модифицированного продукта, минуя опасный этап обжига.

Проведены экспериментальные исследования и определены оптимальные условия, позволяющие получить ферромolibден из предварительно механоактивированного Техутского молибденитового концентрата с 96,5% выходом. Полученные опытные данные подтверждаются химическим, рентгенофазовым и сканирующим электронным анализами.

Ключевые слова: молибденит, концентрат, ферромolibден, сплав, механоактивация, высокотемпературный синтез.

E.G. ZAKARIAN

**INVESTIGATING THE PROCESS OF OBTAINING FERROMOLYBDENUM
FROM THE TEGHUT PRELIMINARILY MECHANOACTIVATED
MOLYBDENITE CONCENTRATE**

The issues on obtaining ferromolybdenum from molybdenite concentrate obtained from the Teghut beneficiating plants are discussed. The two factories operating in the republic produce ferromolybdenum from the Kajaran concentrate with a silicothermic recovery method, which causes certain difficulties. So far, the issue of utilization of SO₂ has not been resolved, creating ecological problems for the environment. From this point of view, it is of interest to develop the Teghut sulphide concentrates by combining the mechanoactivation and metal-thermal reduction methods, which will contribute to the intensification of further oxidation-reduction processes and the production of a fundamentally new modified product, bypassing the dangerous stage of calcination.

Experimental studies have been carried out and optimal conditions have been determined that make it possible to obtain ferromolybdenum from a previously mechanoactivated Teghut molybdenum concentrate with a 96.5% yield. The experimental data obtained are confirmed by chemical, X-ray and scanning electron analyses.

Keywords: molybdenite, concentrate, ferromolybdenum, alloy, mechanoactivation, high-temperature synthesis.

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ն.Գ. ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ, Գ.Ն. ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ

**ԲԱԶՄԱԲԱՂԱԴՐԻՉ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ ԱՍԲԵՍՏԱԶԵՐԾ
ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ ԶԵՐՄԱԿԱՅՈՒՆ ԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ ՇՓԱՆՅՈՒԹԵՐԻ
ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Մշակվել են Բաստենիտ-9 անվամբ պոլիմերային հիմքով ասբեստազերծ արգելակային ջերմակայուն կոմպոզիտային նոր շփանյութ և նրա ստացման տեխնոլոգիան: Բացահայտվել է կառուցվածքագոյացման մեխանիզմը, համաձայն որի՝ թելքերը, նյութին տալով բարձր ամրություն, աշխատում են որպես ինքնուրույն լցանյութեր՝ քիմիական կապի մեջ չգտնվելով կապակցող պոլիմերի հետ, միաժամանակ բարձրացնելով կոմպոզիտի շփական հատկությունները: Ցույց է տրվել, որ Բաստենիտ-9 արգելակային կոմպոզիտային շփանյութն իր շփական հատկություններով ցուցաբերում է արգելակային բարձր ու կայուն արդյունավետություն և բնութագրերով բավարարում է Եվրոպական տնտեսական խորհրդի թիվ 13 ստանդարտի պահանջները:

Առանցքային բառեր. ասբեստազերծ, արգելակ, պոլիմեր, կոմպոզիտային շփանյութ, լցանյութ, թելք, ամրություն, ջերմակայունություն, հակամարմին, շփման գործակից:

Ներածություն. 20-րդ դարավերջին, արգելակային շփանյութերում օգտագործվող ասբեստաթելքի վնասակար հատկությունների բացահայտվելուց հետո, ՄԱԿ-ին առընթեր ԵՏԽ-ի որոշման համաձայն, 1988թ. հունվարի 1-ից կտրակա՝ նապես արգելվել է ասբեստաթելքի օգտագործումը արգելակային շփանյութերի բաղադրակազմերում: Ուստի ասբեստազերծ և էկոլոգիապես մաքուր շփանյութերի ստեղծումն այժմ հրատապ խնդիր է և տեխնիկական առաջընթացի պայմաններում դարձել է ժամանակակից շփական նյութագիտության գիտատեխնիկական կարևոր նշանակություն ունեցող և արդիական հիմնախնդիրներից մեկը [1-4]:

Ելնելով վերոհիշյալից, ՀՀ բազմաբաղադրիչ հանքանյութերի թափոններից ստացված թելքերը և փոշիները, ունենալով յուրահատուկ հատկություններ, կարող են հանդես գալ որպես էժանագին հումք ասբեստազերծ և էկոլոգիապես մաքուր պոլիմերային հիմքով արգելակային շփանյութերի բաղադրակազմերի մշակման համար, հիմնավորապես փոփոխելով սկզբնական նյութի շահագործողական բնութագրերն ու հատկությունները:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Ելնելով վերը նշվածից՝ հետազոտության նպատակն է Հայաստանի Հանրապետության տարածքում գտնվող հանքանյութերի բազմաբաղադրիչ թափոնների կիրառմամբ պոլիմերային հիմքով ասբեստազերծ արգելակային ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութերի ստաց-

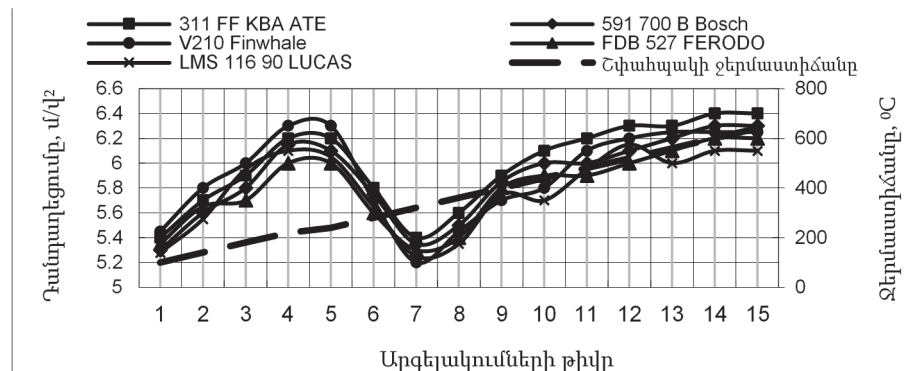
ման տեխնոլոգիայի մշակումը և կառուցվածքագոյացման գործընթացի ու հատկությունների հետազոտումը:

Արգելակային կոմպոզիտային շփանյութերի շփման և մաշման մեխանիզմներն ու կինետիկան առավել ընդգրկուն բացատրվում են շփման մոլեկուլային մեխանիկական և մաշման հոգնածային տեսություններով [5-7], համաձայն որի մաշումը բարդ գործընթաց է և կախված է արգելակների շահագործման պայմաններից: Այս տեսանկյունից ուշադրության է արժանի շերտատմամբ մաշման տեսությունը [8]: Անհրաժեշտ է նշել, որ արագությունների մեծացումը և բեռնատարողության ավելացումն անընդհատ նոր պահանջներ են առաջադրում շփանյութերին: Ընդ որում, դրանք ամրագրվում են միջազգային և պետական ստանդարտներով: Արգելակների շահագործման փորձը ցույց է տալիս, որ ներկայումս հեռանկարային են համակցված պոլիմերային հիմքով ասբեստազերծ շփանյութերը, որոնք պարունակում են կապակցող նյութեր, ամրանավորող տարրեր, նպատակային լցուկներ և շփումն ու մաշումը կարգավորող լցանյութեր:

Նկատի ունենալով ԱՊՀ երկրներում «Լադա» մակնիշի մարդատար ավտոմեքենաների լայնորեն տարածվածության փաստը, որպես փորձարկման բնական օբյեկտ ընտրվել և փորձարկվել են «Լադա Վազ 2113» ավտոմեքենայի առջևի կամրջակի սկավառակային արգելակները և դրանց արգելակային ներդիրները: Մասնավորապես փորձարկվել են գերմանական «Տեքստար», «Բոշ», «Ատե», անգլիական «Լուկաս», իտալական «Պիլենգա», ուկրաինական «Դաֆմի» և ռուսական «Տիիր» ֆիրմաների արտադրած շփական ներդիրները:

Հետազոտության արդյունքները. Հետազոտվել են բազմաբաղադրիչ նյութերի կիրառմամբ ասբեստազերծ ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութերի մաշման և շփման օրինաչափությունները բարձր ջերմաստիճաններում, որի արդյունքում բացահայտվել են արգելակային շփանյութերի մակերևութային շերտի քայքայման մեխանիզմն ու կինետիկան [9, 10]: Ցույց է տրված, որ արգելակային շփանյութերի շփման գործակիցները, ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց, աճում են և 220...280°C պայմաններում հասնում առավելագույնի: Ջերմային ռեժիմի հետագա բարձրացումը՝ մինչև 330...400°C, նպաստում է շփման գործակցի անկմանը, սակայն ջերմաստիճանի հետագա բարձրացումը կրկին հանգեցնում է շփման գործակցի արժեքի աճին: Այս նյութերի կիրառմամբ ասբեստազերծ շփանյութերի փորձարկման արդյունքների վերլուծությունը հնարավորություն է տալիս եզրակացնելու, որ ջերմային ռեժիմի ազդեցությունը շփանյութերի շփման գործակիցի և դանդաղեցման վրա արտահայտվում է երեք՝ շփման գործակցի աճի (մինչև 280°C), նվազման (280°C մինչև 400°C) և կրկնակի աճի (400°C բարձր) ջերմաստիճանային տիրույթներով (նկ. 1): Ջերմային ռեժիմի աճի հետևանքով շփման գործակցի արժեքի նվազումը և կապակցող նյութերի տրոհումը հաստատում են մե-

խանաքիմիական փոխակերպումների և մաշման մեխանիզմի փոփոխության առկայությունը: 220...280°C բարձր ջերմաստիճաններում, ըստ միջազգային ստանդարտների, հետազոտվել են համեմատաբար կայուն և բարձր շփման գործակիցներ ունեցող շփանյութերը: Արգելակումների թիվը ընտրվել է այնպես, որ գրանցումներն իրականացվեն 280°C մակերևութային ջերմաստիճանից, և վերջին արգելակումից առաջ այն չգերազանցի 600°C:



Նկ. 1. Տարբեր շփանյութերի դանդաղեցման կախվածությունը արգելակումների թվից տաքացման ռեժիմում արգելակելիս

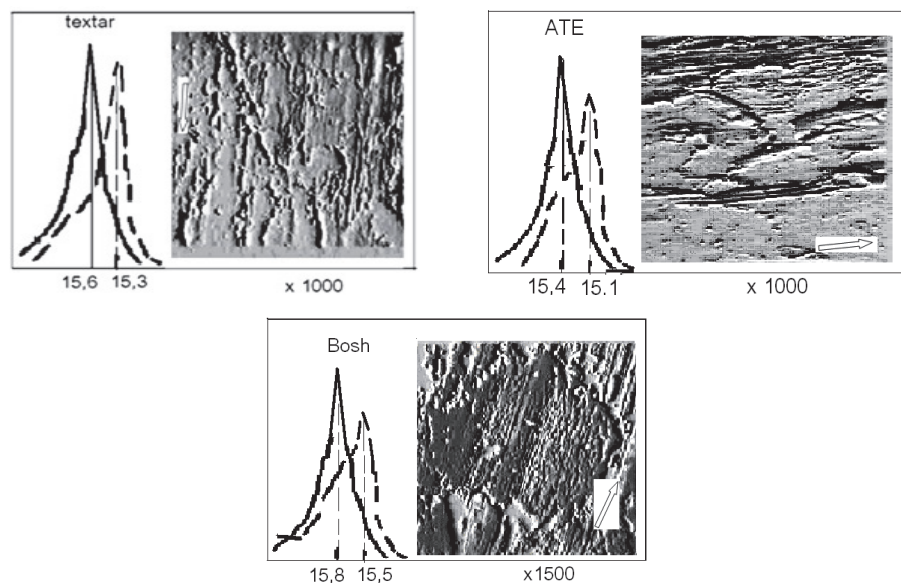
Ցույց է տրված, որ շփանյութերի գծային մաշման կախումը ջերմաստիճանից ունի աստիճանային կորերի տեսք, ինչը հավաստում է մաշման մեխանիզմի փոփոխությունը: Շփանյութի մաշակայունության և մեկ արգելակման ընթացքում ջերմաստիճանի աճի միջև որակական կապ հաստատելու նպատակով իրականացվել են փորձարկումներ շփագույգի իզոջերմային պայմաններում: Որպես արգելակման նախնական ջերմաստիճան ընտրվել է 280°C, քանի որ սկսած այդ ջերմաստիճանից՝ նկատվում է ընտրված շփանյութերի շփման գործակցի նվազման գործընթաց: Երբ շփագույգի մակերևութային ջերմաստիճանը հասել է 280°C, կատարվել են մեկական արգելակումներ, գրանցելով ջերմաստիճանի աճը: Ցուրաքանչյուր արգելակումից հետո տրվել է դադար, մինչև շփագույգի մակերևութային ջերմաստիճանը նվազի և կազմի 280°C: Սկզբնական արգելակումների ընթացքում (մինչև 4...7 արգելակում) նկատվել է ջերմաստիճանի աճի արժեքների մեծացում: Այնուհետև այն դադարել է, և սկսած 9-րդ արգելակումից՝ շփանյութերի ջերմաստիճանի աճի արժեքները դարձել են հաստատուն: Բացահայտվել է, որ յուրաքանչյուր շփանյութ ունի իր ջերմաստիճանային աճի հաստատուն արժեքը, և գոյություն ունի ուղիղ համեմատական կապ շփանյութի մաշակայունության և մեկ արգելակման դեպքում առաջացած ջերմաստիճանի աճի միջև: 280°C բարձր ջերմաստիճանների պայմաններում աշխատող շփանյութերի դեպքում որքան

մեծ է ջերմունակության գործակիցը (փոքր է ջերմաստիճանի աճը), այնքան մաշակայուն է շփանյութը: Այս հանգամանքը կարևոր է բազմաբաղադրիչ նյութերի կիրառմամբ ասֆեստազերծ ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութերի բաղադրակազմերի մշակման տեսանկյունից, քանի որ բարձր ջերմունակությամբ լցուկների օգտագործումը հնարավորություն կտա մեծացնելու շփանյութերի մաշակայունությունը:

Փորձարկման արդյունքների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ ջերմային ռեժիմի ազդեցությունը շփանյութերի մակերևութային շերտերի վրա բնութագրվում է ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների և մեխանաքիմիական ու լարվածադեֆորմացման փոխակերպումների փոփոխություններով:

Դիֆերենցիալ-ջերմաձանրաչափական և ջերմաձանրաչափական մեթոդներով ուսումնասիրվել են ընտրված շփանյութերի նմուշների ջերմաֆիզիկական հատկությունները: Ցույց է տրվել, որ դիֆերենցիալ-ջերմաձանրաչափական կորերն ունեն էկզոջերմային բնույթ, իսկ ջերմաձանրաչափական կորերն ապացուցում են, որ տաքացման ընթացքում տեղի է ունեցել շփանյութերի նմուշների զանգվածի կորուստ: Մակերևութային շերտերի մեխանաքիմիական փոփոխությունների ջերմաստիճանային տիրույթների սիթեզի արդյունքում բացահայտվել են տեղի ունեցող մեխանաքիմիական փոխակերպումները և մեխանիզմները: Ցույց է տրվել, որ մեխանաքիմիական փոփոխություններն ունեն բազմափուլ բնույթ և սկսվում են դեռևս ցածրջերմաստիճանային շփման պայմաններում: Մինչև 325°C տեղի է ունենում մակերևութային շերտի ամրության նվազում և բաղադրակազմի ցնդող տարրերի ցածր մոլեկուլային քաշային պիրոլիզ (I տիրույթ): Մինչև 450°C նկատվում է կապակցող նյութի տրոհում (II տիրույթ): Մինչև 725°C տեղի է ունենում ամրանային տարրի տրոհում (III տիրույթ), և 725°C բարձր պայմաններում նկատվում է մակերևութային շերտի ածխածնացում (IV տիրույթ), ընդ որում, փոխակերպումներն ուղեկցվում են ջերմության անջատումով: Մեխանաքիմիական գործընթացները տվյալ ջերմային ռեժիմի պայմաններում գերակայող են, քանի որ ջերմաստիճանի գրադիենտը հասնում է մեծ արժեքների ($d\theta/dt > 50 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$): Դա լուրջ ազդեցություն է գործում շփման գործակցի արժեքի փոքրացման և մաշման սաստկության աճի վրա: Շփանյութերի մակերևութային շերտերի լարվածադեֆորմացման վիճակի գնահատման նպատակով առաջացած մաշման հատիկները և շփանյութերի նմուշների շփման մակերևութներն ուսումնասիրվել են ռենտգենյան դիֆրակցիայի և էլեկտրոնային մանրադիտակային մեթոդներով (նկ. 2), արդյունքում պարզվել է, որ մակերևութային շերտերը կոդմոնորոշված են շփման ուղղությամբ, և առկա են միկրոճաքեր: Ընդ որում, միկրոճաքերը տարածված են ինչպես շփման վեկտորի, այնպես էլ նրան ուղղահայաց ուղղություններով: Ավելի շատ ճաքեր առկա են համեմատաբար ցածր մաշակայունություն ունեցող ATE շփանյութի մակերևութային շերտերում:

Ռենտգենագրերից երևում է, որ մակերևույթին ընկնող ճառագայթները, կախված շփման ուղղությունից, ունեն տարբեր անկյունային ռեֆլեքսներ: Դա հաստատում է, որ մակերևույթի բարակ շերտերում գործում են մնացորդային լարումներ, ընդ որում, շփման վեկտորի ուղղությամբ դրանք ձգող լարումներ են (σ_1), իսկ ուղղահայաց ուղղությամբ՝ ձգող լարումներից փոքր սեղմող լարումներ (σ_3): Լարումների այսպիսի անհամաչափ բաշխումը շփման վեկտորի ուղղությամբ մակերևութային շերտերի կողմնորոշման արդյունք է և հանգեցնում է մակերևութային շերտերում շփման ուղղությամբ տարածվող միկրոճաքերի առաջացմանը, ինչը երևում է նաև նկ. 2-ում բերված միկրոկառուցվածքներից:

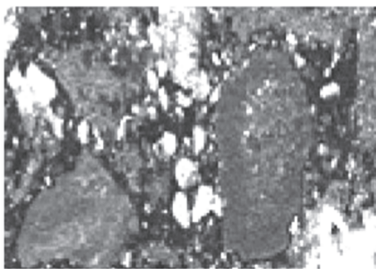


Նկ. 2. Շփանյութերի շփման մակերևութների միկրոկառուցվածքները և ամրանավորող տարրի անկյունային ռեֆլեքսի (ռենտգենյան ճառագայթի առաջնային փնջի անկման անկյուն) արժեքները շփման ուղղությանը զուգահեռ (----) և ուղղահայաց (—) ճառագայթների անկման դեպքում (սլաքով պատկերված է շփման ուղղությունը)

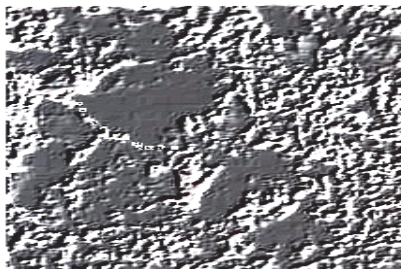
Արգելակային շփանյութերում 250...400°C ջերմաստիճանային միջակայքում առկա է մեխանաքիմիական փոխակերպումների և շփանյութերի շփագիտական բնութագրերի միջև ուղիղ համեմատական կապ. որքան ցածր ջերմաստիճաններում են կատարվում մեխանաքիմիական փոխակերպումները, այնքան վաղ են սկսվում շփման գործակցի արժեքի նվազումն ու մաշման սաստկության անցումը չափավորից դեպի ուժգինը: Հետազոտման արդյունքում պարզվել է, որ ասբեստազերծ ջերմակայուն կոմպոզիտային նոր շփանյութերի մշակման գործընթացում կապակցող նյութերի, ամրանային տարրերի և նպատակային լցուկների ընտրման միջոցով շփանյութերի չափավոր մաշումից ուժգին մաշմանն անցման ջերմաս-

տիճանային տիրույթն անհրաժեշտ է տեղաշարժել դեպի ավելի բարձր ջերմաստիճաններ, ուղենիշ ունենալով շփագույզի աշխատունակության բարձրացումը:

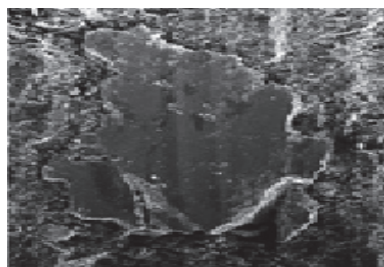
Բարձր ջերմաստիճաններում ասբեստազերծ ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութերի մաշման և շփման գործընթացի հետազոտումը կատարվել է՝ հաշվի առնելով բարձրջերմաստիճանային պայմաններում առաջացած մաշման հատիկների ձևաբանությունը, շփանյութերի ջերմային ընդարձակման դինամիկան և մետաղական հակամարմնի շփման մակերևույթի վիճակի վրա շփանյութերի ազդեցությունը: Ցույց է տրված, որ մաշման հատիկները թերթաձև են (նկ. 3) և տարբերվում են իրենց չափերով՝ կախված շփանյութերի բաղադրակազմերից: Ամենամեծ չափեր ունեն ATE շփանյութի մաշումից առաջացած մասնիկները, իսկ ամենափոքրը՝ Textar՝ համեմատաբար բարձր մաշակայունություն ունեցող շփանյութի մաշումից առաջացած հատիկները: Թերթաձև մաշման հատիկների առաջացումը հաստատում է նաև այն վարկածը, որ բարձրջերմաստիճանային շփման և շփանյութերի ուժգին մաշման պայմաններում տեղի է ունենում մաշման ֆիզիկական մոդելի փոփոխություն. հոգնածային մաշման մեխանիզմը փոխակերպվում է շերտատմամբ մաշման մեխանիզմի:



Textar (x 300)



ATE (x 300)



Bosch (x 500)

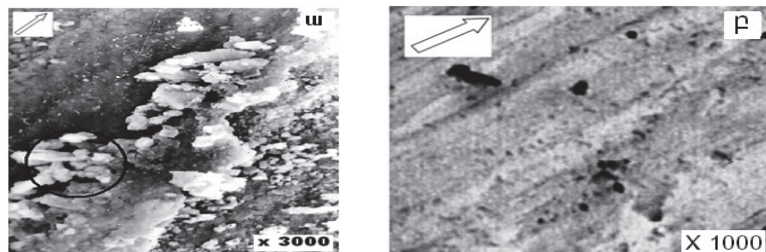
Նկ. 3. Շփանյութերի բարձր ջերմաստիճաններում շփումից առաջացած տիպային մաշման հատիկների միկրոկառուցվածքները

Նշված փոխակերպման հավաստիությունը գնահատելու և շփանյութերի ջերմային ընդարձակման դինամիկան ուսումնասիրելու նպատակով իրականաց-

վել են շփանյութերի ընդարձակաչափական վերլուծություններ: Շփանյութերը միմյանցից տարբերվում են իրենց ջերմային ընդարձակման գործակիցների փոփոխման օրինաչափություններով: Ջերմաստիճանի բարձրացման ընթացքում աճում է բնութագրող կորի կազմած անկյունը ջերմաստիճանի առանցքի նկատմամբ, ինչը վկայում է շփանյութերի ջերմային ընդարձակման գործակիցների աճի և ենթամակերևութային շերտում միկրոճաքերի առաջացման մասին: Ավելի բարձր (մեծ 600°C) ջերմաստիճանային պայմաններում շփանյութերի ջերմային ընդարձակումները դադարում են:

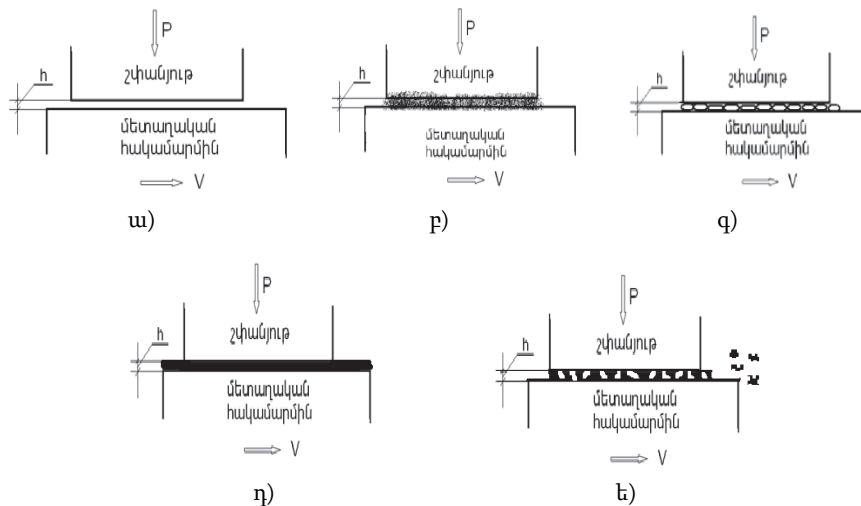
Ջերմային ռեժիմի աճի հետևանքով, շփման գործակցի արժեքի աճի նվազումից հետո, մաշման սաստկության անցումը չափավորից դեպի ուժգինի և կապակցող նյութերի միաժամանակյա տրոհումը հաստատում են մեխանաքիմիական փոխակերպումների և մաշման մեխանիզմի փոփոխության առկայությունը:

Մետաղական հակամարմնի շփման մակերևույթի վիճակի վրա շփանյութերի ազդեցության ուսումնասիրությունները հաստատում են, որ անկախ կապակցող նյութերի տիպից՝ շփանյութերն ունակ են մետաղական հակամարմնի շփման մակերեսին ձևավորելու շփափոխանցման հետևանքով առաջացած շերտեր (նկ. 4, ա), որոնց առկայության դեպքում շփման գործակիցը դառնում է առավելագույնը: Մետաղական հակամարմնի վրա այդպիսի շերտերի բացակայության դեպքում (նկ. 4, բ) շփանյութն անմիջական հպման մեջ է գտնվում մետաղական հակամարմնի մակերևույթի հետ, որն էլ շփման գործակցի նվազման պատճառներից մեկն է:



Նկ. 4. Մետաղական հակամարմնի շփման մակերեսների միկրոկառուցվածքները ռեժիմային կապակցող շփանյութերի հետ շփումից հետո առավելագույն (ա) և նվազագույն (բ) շփման գործակիցների դեպքում

Ուսումնասիրելով մաշումից առաջացած հատիկների երկրաչափությունը, կառուցվածքը և ջերմային հատկությունները, բացահայտվել են արգելակային շփանյութերի մակերևութային շերտի քայքայման մեխանիզմը և կինետիկան, մշակվել է ֆիզիկական մոդելը (նկ. 5) [11]:



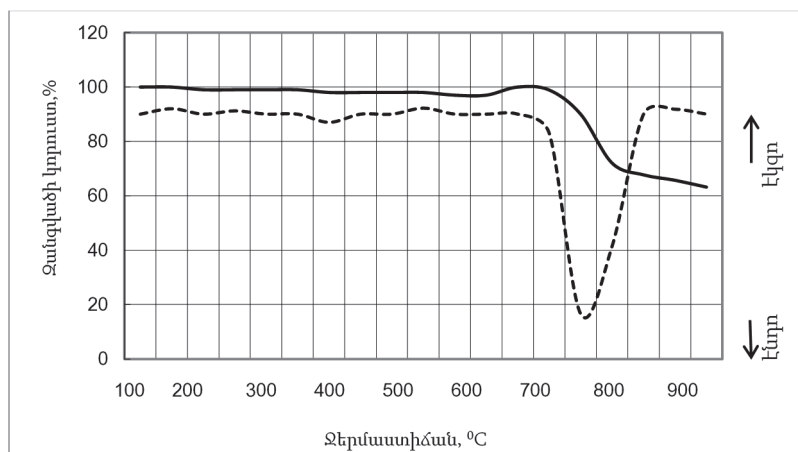
Նկ. 5. Արգելակային շփանյութերի բարձրջերմաստիճանային մաշման ֆիզիկական մոդելը

Սկզբում շփանյութը շփվում է հակամարմնի մակերևույթին շրջապատից աղսորդված շերտի հետ (նկ. 5, ա), որը շատ արագ մաքրվում է: Այնուհետև առաջանում են մաշման առաջին հատիկները, որոնց մի մասը դուրս է նետվում շփման տիրույթից, իսկ որոշ մասը ադիզիվայի հետևանքով կպչում է մետաղական հակամարմնին (նկ. 5, բ): Նկատվում է շփման գործակցի մեծացում: Ջերմաստիճանի հետագա բարձրացումը նպաստում է մետաղական հակամարմնի շփման մակերեսին աստիճանաբար շփանյութափոխանցված կայուն և պինդ վիճակում գտնվող թաղանթի ձևավորմանը (նկ. 5, գ), որի առկայության դեպքում նկատվում է շփման գործակցի առավելագույն արժեքը: Շփման հետևանքով շփահպակում նկատվում է ջերմաստիճանի շարունակական աճ, որը հանգեցնում է շփանյութափոխանցված թաղանթի հալված վիճակին (նկ. 5, դ): Նկատվում է շփման գործակցի նվազագույն արժեք: Ջերմաստիճանի հետագա աճը և տեղի ունեցող մեխանաքիմիական փոխակերպումները քայքայում են շփանյութափոխանցված թաղանթը, և առաջանում են մաշման հատիկները (նկ. 5, ե): Շփման գործակցի կրկնակի մեծացման պայմաններում մետաղական հակամարմնի շփման մակերեսին շփանյութափոխանցված թաղանթը վերանում է:

Բազմաբաղադրիչ ասբեստազերծ ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութերի մշակման նպատակով, որպես ամրանավորող բաղադրիչներ, ուսումնասիրվել են Հայաստանի հանքաքարերից ստացված բազալտաթելքը և ապակեթելքը, ինչպես նաև գրաֆիտաթելքը և ասբեստաթելքը: Դիֆերենցիալ-ջերմաձանրաչափական վերլուծությունները ցույց են տալիս, որ բոլոր թելքերի ուժգին տրոհման հիմնական գործընթացները էկզոթերմային բնույթի են և սկսվում են հիմնականում 550°C-ից բարձրջերմաստիճանային պայմաններում: Դա լրացուցիչ կերպով

բարձրացնում է շփահպակի ջերմաստիճանը և մեծացնում ջերմաստիճանային գրադիենտը, նպաստելով շփանյութերի ավելի արագ քայքայմանը, ինչն ուղենիշ է բազմաբաղադրիչ ասֆեստազերծ կոմպոզիտային նոր և ջերմակայուն շփանյութերի մշակման և առաջարկման համար: Հնարավորություն է ստեղծվում բարձրացնելու շփանյութերի ջերմակայունությունը և շփամաշվածքային բնութագրերը բարձր ջերմաստիճաններում, դրանց բաղադրակազմերում օգտագործելով այնպիսի նպատակային լցուկներ, որոնց տրոհման ջերմաստիճանները գտնվում են 550°C-ից մինչև 850°C ջերմաստիճանային տիրույթում, և տրոհման գործընթացները էնդոթերմային բնույթի են: Վերլուծությունները ցույց են տալիս, որ նշված հատկություններով օժտված են, մասնավորապես, կալցիումի, բարիումի սուլֆիդները և կարբոնատները:

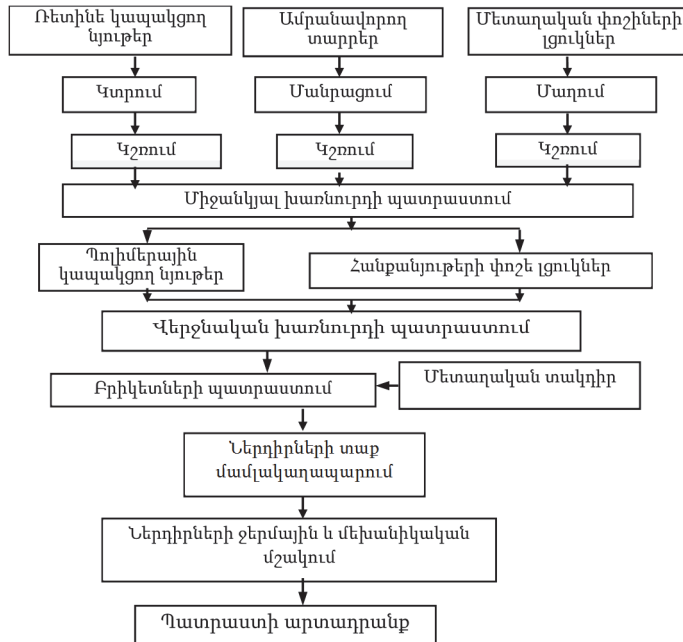
Նպատակ ունենալով բազմաբաղադրիչ նյութերի կիրառմամբ ասֆեստազերծ ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութերի բաղադրակազմերում կիրառելու Հայաստանի հանքանյութերից ստացված փոշիները, ընտրվել և փորձագիտական հետազոտության է ենթարկվել կալցիումի կարբոնատով հարուստ մարմարի հանքաքարերի փոշին: Ջերմաձանրաչափական մեթոդով ուսումնասիրվել են կալցիումի կարբոնատի ջերմադինամիկական հատկությունները (նկ. 6), համաձայն որոնց՝ կալցիումի կարբոնատի ուժգին տրոհումը սկսվում է մոտավորապես 750°C և ավարտվում 900°C-ում: Տեղի է ունենում մոտ 40% զանգվածի կորուստ, ինչը պայմանավորված է տրոհման ընթացքում օքսիդների առաջացմամբ:



Նկ. 6. Կալցիումի կարբոնատի ջերմաձանրաչափական (—) և դիֆերենցիալ ջերմաձանրաչափական (----) վերլուծությունների կորերը

Այսպիսով, կալցիումի կարբոնատով հարուստ Հայաստանի բազմաբաղադրիչ հանքանյութերից մարմարի փոշու օգտագործումն արգելակային շփանյութերում ապահովում է տեխնիկական նոր արդյունավետություն: Շփանյու-

Շփանյութերի կապակցող նյութերի, լցուկների և շփման գործակցի կարգավորիչների ուսումնասիրման արդյունքում մշակվել է բազմաբաղադրիչ նյութերի կիրառմամբ ասբեստազերծ ջերմակայուն նոր՝ «Բաստենիտ-9» անվամբ կոմպոզիտային շփանյութ (նկ. 7), որը ներառում է ջերմառեակտիվ կապակցանյութեր, թեթևավոր միներալային լցանյութեր՝ ապակեթելք և բազալտաթելք, անօրգանական լցանյութեր՝ քարիտային խտանյութ, տիտանի երկօքսիդ և շփման ու մաշման կարգավորիչ՝ գրաֆիտ, և լրացուցիչ պարունակում է նաև անօրգանական լցանյութ՝ հեղուկ ապակի և մարմարի փոշի, իսկ որպես շփման և մաշման կարգավորիչ՝ նատրիումի տետրաբորատ: Բազմաբաղադրիչ նյութերի կիրառմամբ ասբեստազերծ արգելակային ջերմակայուն կոմպոզիտային Բաստենիտ-9 շփանյութը նախատեսված է մեծ արագությունների և տեսակարար ճնշումների պայմաններում աշխատող ավտոմոբիլային սկավառակային արգելակների կոճղակների պատրաստման համար: Միայն հեղուկ ապակու, մարմարի փոշու և նատրիումի տետրաբորատի համատեղ կիրառումն է ապահովում առաջադրված խնդրի լուծումը:



277

Եզրակացություն. Բացահայտվել է, որ բազմաբաղադրիչ նյութերի կիրառմամբ պոլիմերային հիմքով ասֆեստազերծ արգելակային կոմպոզիտային շփանյութերում լայն տարածում գտած ամրանային լցուկների տրոհման գործընթացները էկզոթերմային են և սկսվում են հիմնականում 550°C-ից բարձրջերմաստիճանային պայմաններում: Արդյունքում՝ հնարավորություն է ստեղծվում՝ բարձրացնելու շփանյութերի ջերմակայունությունը և շփամաշվածքային բնութագրերը բարձր ջերմաստիճաններում, դրանց բաղադրակազմերում օգտագործելով այնպիսի նպատակային լցուկներ, որոնց տրոհման ջերմաստիճանները գտնվում են 550°C-ից մինչև 850°C ջերմաստիճանային տիրույթում, և տրոհման գործընթացները էնդոթերմային բնույթի են: Բացահայտվել է, որ կալցիումի կարբոնատի ուժգին տրոհումը սկսվում է մոտավորապես 750°C-ից և ավարտվում 900°C-ում: Այն էնդոթերմային բնույթի է: Տեղի է ունենում մոտ 40% զանգվածի կորուստ, ինչը պայմանավորված է տրոհման ընթացքում օքսիդների առաջացմամբ: Շփանյութերի բաղադրակազմերում կալցիումի կարբոնատի օգտագործման դեպքում՝ 750°C-ից բարձր ջերմաստիճաններում շփման պայմաններում, երբ տեղի է ունենում կապակցող նյութի և ամրանային տարրի տրոհում, անջատված ջերմության լրացուցիչ քանակությունը կլանում է կալցիումի կարբոնատը: Ցույց է տրված, որ մարմարի փոշու օգտագործումն արգելակային շփանյութերում ապահովում է շփման գործակիցների բարձր և կայուն արժեքներ՝ շնորհիվ մարմարի փոշով շփանյութերի բաղադրակազմերի ամրանային տարրերի տրոհման գործընթացներում անջատված ջերմության լրացուցիչ քանակի կլանման: Արդյունքում՝ մշակվել է Բաստենիտ-9 անվամբ պոլիմերային հիմքով ասֆեստազերծ արգելակային ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութ և դրա ստացման տեխնոլոգիան:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Chandgude S.B., Ganiger S.G.** Development of Composite Material for Automobile Disc Brake Pad // International Engineering Research Journal.- 1987.- P. 144-149. <http://www.ierjournal.org/pupload/>.
2. Производители тормозных колодок-<http://diski-kolodki.com.ua/proizvoditeli/>.
3. **Մելիքսեթյան Գ.Ն.** Արգելակային շփանյութերի զարգացման հիմնական ուղղությունները // Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի Լրաբեր.Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Մաս 2.- Երևան, 2016.- Էջ 622-628:
4. **Погосян А.К.** Трение и износ наполненных полимерных материалов.- М.: Наука, 1977.-138 с.
5. Фрикционные композиты на основе полимеров / **А.К. Погосян, П.В. Сысоев, Н.Г. Меликсетян и др.**— Минск: Информтрибо, 1992.- 218 с.
6. **Պողոսյան Ա.Կ.** Շփագիտության հիմունքներ.- Երևան: Լույս, 1994.- 296 էջ:

7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ.- М.: Машиностроение, 1977.- 526 с.
8. Suh N.P. The Delamination Theory of Wear // Wear.- 1973. -Vol. 25.– P.111-124.
9. Агбалян С.Г., Меликсетян Н.Г., Меликсетян Г.Н. Фрикционный перенос при трении безасбестовых тормозных материалов // Сб. тр. XXIV Межд. науч.- техн. конф. “Машиностроение и техносфера XXI века”.- Севастополь, 2017.- С.160-164.
10. Агбалян С.Г., Меликсетян Г.Н. Исследование работоспособности тормозного фрикционного композита, изготовленного из многокомпонентных материалов // Вестник НПУА: Металлургия, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2017.- N1.- С. 26-33.
11. Меликсетян Н.Г., Агбалян С.Г., Меликсетян Г.Н., Карапетян А.Н. Физическое моделирование высокотемпературного трения тормозных фрикционных материалов // Вестник НПУА: Механика, машиноведение, машиностроение.- Ереван, 2017.- N 1.- С. 92-100.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 22.06.2018:

С.Г. АГБАЛЯН, Н.Г. МЕЛИКСЕТАН, Г.Н. МЕЛИКСЕТАН

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗАСБЕСТОВЫХ ТОРМОЗНЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработан новый теплостойкий безасбестовый фрикционный композит Бастенит-9 на полимерной основе. Выявлен механизм структурообразования, согласно которому волокна обеспечивают высокую прочность композиции, одновременно повышая трибологические характеристики композита, работают как самостоятельные наполнители, не находясь в химической связи с полимерным связующим. Показано, что тормозной фрикционный композит Бастенит-9 обладает высокой и стабильной эффективностью торможения и по фрикционным характеристикам отвечает требованиям стандарта N13 Европейского Экономического Комитета.

Ключевые слова: безасбестовый, тормоз, полимер, фрикционный композитный материал, наполнитель, волокно, прочность, теплостойкость, контртело, коэффициент трения.

S.G. AGHBALYAN, N.G. MELIKSETYAN, G.H. MELIKSETYAN

**DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING ASBESTOS-FREE BRAKE
HEAT-RESISTANT FRICTION COMPOSITES APPLYING MULTICOMPONENT
MATERIALS**

A new polymer - based heat-resistant asbestos-free friction composite material called Bastenite-9 has been developed. A structurization mechanism has been revealed, according to which, the fibers provide high strength, and simultaneously increasing the tribological characteristics of the composite, they work as independent fillers, not being in the chemical bond with the polymer binder. It is shown that the Bastenit-9 braking friction composite has a high and stable braking efficiency, and by its friction characteristics meets the requirements of the N13 Standard of the European Economic Committee.

Keywords: asbestos-free, brake, polymer, friction composite material, filler, fiber, strength, heat resistance, counterbody, coefficient of friction.

R.R. VARDANYAN, V.K. DALLAKYAN

ANALYSIS OF PARAMETERS OF LINEAR FRESNEL REFLECTOR SOLAR ENERGY CONCENTRATOR

The optical efficiency and concentration rate of linear Fresnel reflector solar concentrator are investigated. The mathematical model and a simulation program are developed. The dependences of optical efficiency and concentration rate on different parameters are investigated. It is shown that during the design of linear Fresnel reflector concentrators the focal distance can be increased, and to obtain the required optical efficiency and concentration rate, the mirror width and the distance between the mirrors must be optimized.

Keywords: linear Fresnel concentrator, solar, mirror, optical efficiency, concentration rate, focus, reflector.

Introduction. Concentrating solar power is one of several preferred methods of solar energy using. Different types of point focus and linear focus concentrators are developed. Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators (LFRSC) have several advantages in comparison with parabolic trough systems [1, 2]. Linear Fresnel mirror reflecting concentrators capture the sun's energy with flat mirrors that reflect and focus the sunlight onto a fixed linear receiver tube. The receiver contains a fluid that is heated by the sunlight and then used to heat a traditional power cycle that spins a turbine that drives a generator to produce electricity. Linear Fresnel mirror reflecting concentrators consist of a large number of mirrors in parallel rows that are typically aligned in a north-south direction to maximize the annual and summer energy collection. With a single-axis sun-tracking system, this configuration enables the mirrors to track the sun from east to west during the day, which ensures that the sun reflects continuously onto the receiver tubes. These types of concentrators are used generally in the solar field for electricity generation.

In comparison with parabolic trough mirror reflecting concentrators, the optical losses in LFRSC are more due to the shading and blocking effects of neighboring mirrors. Therefore, the optical efficiency of LFRSC or the thermal energy production generally is analyzed depending on different parameters [1-4]. Fewer investigations are devoted to the analysis of another important parameter - the concentration rate of LFRSC. The analysis of concentration ratio is significant not only for thermal energy generating systems, but also for concentrating photovoltaic systems (CPV) which are predicted to have an important role in future solar energy systems [5].

In this paper, a full analysis of a linear Fresnel mirror reflecting concentrator is conducted and the dependence of both optical efficiency and concentration ratio on different parameters is investigated.

Modelling of a linear Fresnel reflector solar concentrator. LFRSC consists of flat mirrors and a linear receiver placed on the focal area. Each mirror is reflecting the incident solar rays onto the receiver (Fig. 1). The width of the mirrors, and the distance between the mirrors are constant values. The receiver is fixed and the mirrors are tracking the sun during the day.

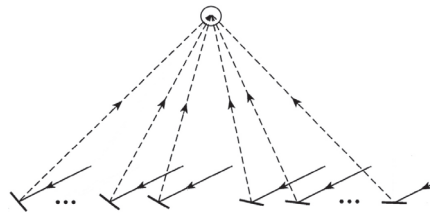


Fig. 1. Linear Fresnel reflector solar concentrator

In Fig. 2, the half of the LFRSC is presented for simplicity.

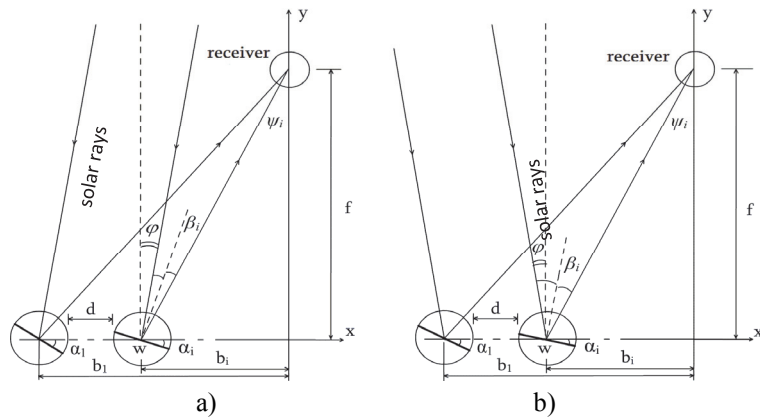


Fig. 2. The structure of linear Fresnel mirror reflectors

The angle between the incident rays and the horizontal axis is acute (a) and obtuse (b)

The position of the first mirror center is (the mirrors are enumerated from left to right):

$$b_1 = -0.5 * [(n - 1) * (w + d)],$$

where n is the total number of mirrors, w is the mirror's width; d is the distance between the two neighboring mirrors. The second mirror center position will be:

$$b_2 = b_1 + (w + d).$$

In this way, the position of each mirror's center can be calculated as:

$$b_i = b_{i-1} + w + d, \quad (1)$$

where i is the mirrors' number, b_{i-1} - the position of the previous mirror's center. Note that if the mirrors' number is odd the middle mirror center lies on axis y , and if the mirrors' number is even, axis y passes between the two central mirrors.

To calculate the inclination angle α of each mirror, let us consider the following two cases.

1) The angle between the incident rays and the horizontal x axis is acute (Fig. 2a):

$$\begin{cases} \alpha_i = \beta_i + \varphi \\ \alpha_i = \psi_i - \beta_i \end{cases} \Rightarrow 2\alpha_i = \psi_i + \varphi \Rightarrow \alpha_i = \frac{1}{2}(\arctg(\frac{b_i}{f}) + \varphi).$$

2) The angle between the incident rays and the horizontal x axis is obtuse (Fig. 2b):

$$\begin{cases} \alpha_i = \beta_i - \varphi \\ \alpha_i = \psi_i - \beta_i \end{cases} \Rightarrow 2\alpha_i = \psi_i - \varphi \Rightarrow \alpha_i = \frac{1}{2}(\arctg(\frac{b_i}{f}) - \varphi).$$

By combination of the two formulae presented above, for α we shall have:

$$\alpha_i = \frac{1}{2}[\arctg(\frac{b_i}{f}) \pm \varphi]. \quad (2)$$

Thus, having the total number of mirrors, the width, the distance between the mirrors, the focal distance and the incident angle of solar rays, the position and inclination angle for each mirror can be defined by formulae (1) and (2). Note that φ is the transversal angle, and the longitudinal angle is not considered.

The optical efficiency of LFRSC is the ratio of the sum of effective reflected beams on the receiver and the aperture of the concentrator. It can be presented as follows:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{(2b_1 + w)}, \quad (3)$$

where t_i is the effective reflected beam width from i - th mirror. Note that, as the effective reflected beam is assumed the beam which reaches the receiver.

The effective reflected beam width depends on all parameters of LFRSC and it can be changed due to the shading and blocking effects of the neighboring mirrors (Fig. 3).

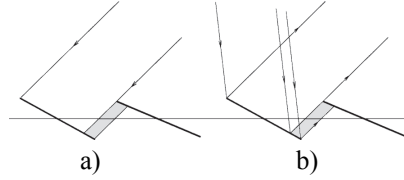


Fig. 3. Optical losses in the system: a - shading, b - blocking

The effective reflected beam width depends also on the receiver width and the reflected beam width. To determine the effective reflected beam width let's consider the following four possible cases presented in Fig. 4.

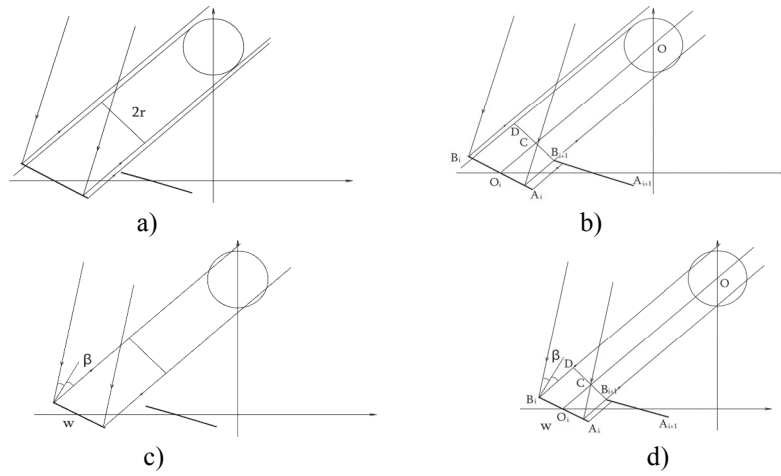


Fig. 4. The reflected beam on the receiver surface. The reflected beam width is: a - greater than the receiver diameter; b - greater than the receiver diameter and there are shading or blocking losses, c - smaller than the diameter of the receiver, d - smaller than the diameter of the receiver and there are shading or blocking losses

Case Fig. 4a). The width of the reflected beam is greater than the receiver width, part of the reflected beam passes near the receiver, and there is no shading or blocking effect. In this case the effective reflective beam width is equal to the width of the receiver:

$$t_i = 2 * r.$$

Case Fig. 4b). The width of the reflected beam is greater than the receiver width, part of the reflected beam passes near the receiver, and there are additional optical losses due to shading or blocking. In this case, the effective reflective beam width is calculated by the following equation:

$$t_i = B_{i+1}C + CD,$$

where $B_{i+1}C$ is the distance of point B_{i+1} from line O_iO , and $CD = r$.

Case Fig. 4c). The width of the reflected beam is smaller than the receiver diameter, the reflected beam fully reaches the receiver, and there is no shading or blocking effect. Thus the effective reflective beam width equals the reflected beam width:

$$t_i = w * \cos\beta,$$

where β is the half of the angle between the incident and reflected rays, and the mirror's width.

Case Fig. 4d). The width of the reflected beam is smaller than the receiver diameter, and there are additional optical losses due to shading or blocking. The effective reflected beam width can be calculated as follows:

$$t_i = B_{i+1}C + CD,$$

where $B_{i+1}C$ is the distance of point B_{i+1} from line O_iO , and CD is calculated as:

$$CD = \frac{w}{2} * \cos\beta.$$

Having the coordinates of points $O(0; f)$ and $O_i(b_i; 0)$, we can get the equation of line O_iO . The coordinates of point B will be

$$(b_{i+1} + \frac{w}{2} \cos\alpha_{i+1}, \frac{w}{2} \sin\alpha_{i+1}),$$

where b_{i+1} is the mirror center distance from the axis y calculated by equation (1) and α_{i+1} is the angle between the mirror and axis x calculated by equation (2). Using the formula of linear geometry for the distance from a point to a line, we can calculate the distance $B_{i+1}C$. In particular, when point B_{i+1} lies above the line O_iO , the distance $B_{i+1}C$ will have a negative sign. Generally, the concentration rate is determined as the ratio of the aperture area of the concentrator to the receiver area. For LFRSC, the concentration rate is determined as the ratio of overall effective reflected beam width to the diameter of the receiver:

$$c = \sum_{i=1}^n t_i / (2 * r). \quad (4)$$

Thus, by using equations (3) and (4), the optical efficiency and concentration rate of LFRSC can be determined.

Analysis of the optical efficiency and concentration rate of LFRSC.

Based on the above presented model, a computer program for the analysis and optimal design of LFRSC is developed. The dependences of optical efficiency and the concentration ratio of the LFRSC on the parameters as the focal distance, the mirror width, the distance between the mirrors and the angle of incident rays are investigated.

In Fig. 5, the dependences of optical efficiency and concentration rate on the focal distance are presented. The parameters used during calculations are: the radius of the tube – 50 mm, mirror width – 120 mm, distance between the mirrors – 20 mm, the total number of mirrors – 10. The dependences are presented for 0° , 45° and 60° incident angles.

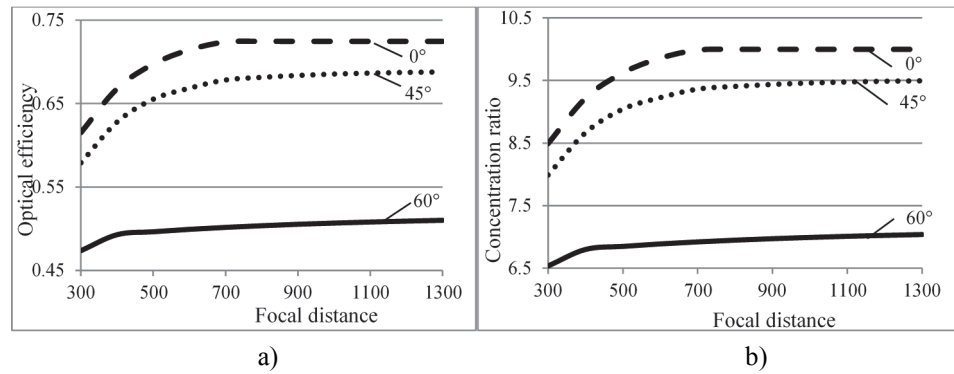


Fig. 5. Optical efficiency (a) and concentration ratio (b) versus focal distance

It can be seen from Fig. 6 that both the optical efficiency and concentration rate increase by increasing the focus distance. Starting from some values of the focus distance (700...800 mm), the concentration ratio is increasing slowly due to the reduction of shading and blocking effects. As it could be expected, the optical efficiency and concentration rate decrease with the increase of the light incident angle.

In Fig. 6, the dependences of optical efficiency and concentration ratio on the mirror width for different incident angles are presented. The parameters are as in the previous case, and the focal distance is 700 mm.

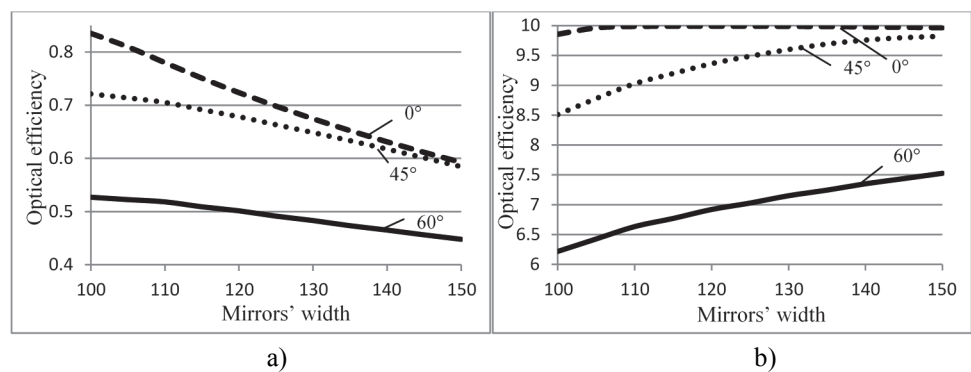


Fig. 6. The optical efficiency (a) and concentration rate (b) versus the mirrors' width

As shown in Fig. 6, the optical efficiency decreases with the increase of the mirrors' width. It happens due to the increase in the optical losses due to the shading and blocking effects and the increase in the aperture of the concentrator. The concentration rate increases with the increase in the mirrors' width. With an increase in the incident angle, the optical efficiency and concentration rate decrease due to the increase of the influence of the blocking and shadowing effects. Comparing the dependences of optical efficiency and concentration rate on the mirror width (Fig. 6), it can be concluded that the mirrors' width must be optimized during the design of LRFSC.

In Fig. 7, the dependences of optical efficiency and concentration rate on the distance between the mirrors are presented. The rest of parameters are the same and the mirror width is 120 mm.

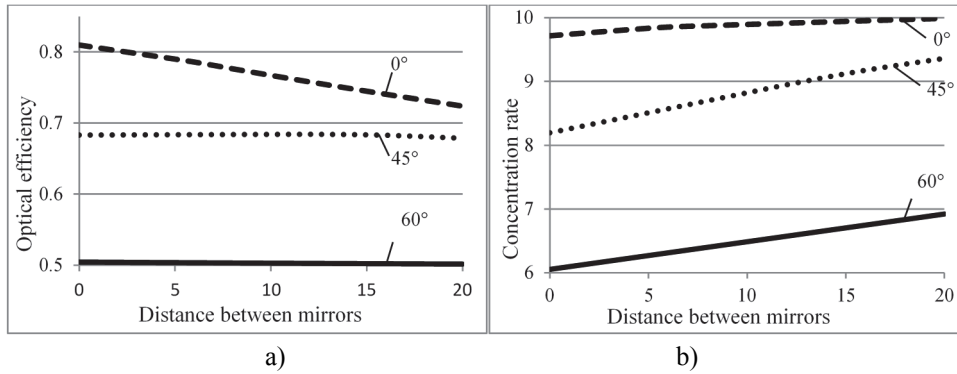


Fig. 7. The optical efficiency (a) and concentration rate (b) versus distance between the mirrors

As it is expected, the optical efficiency decreases with the increase in the distance between the mirrors. Due to the influence of the shading and blocking effects, the concentration rate increases with the increase of the distance between the mirrors. It follows that the distance between the mirrors also must be optimized during the design to obtain the required optical efficiency and concentration rate. Note that the optical efficiency and concentration ratio are higher when the incident angle is small, as it could be expected.

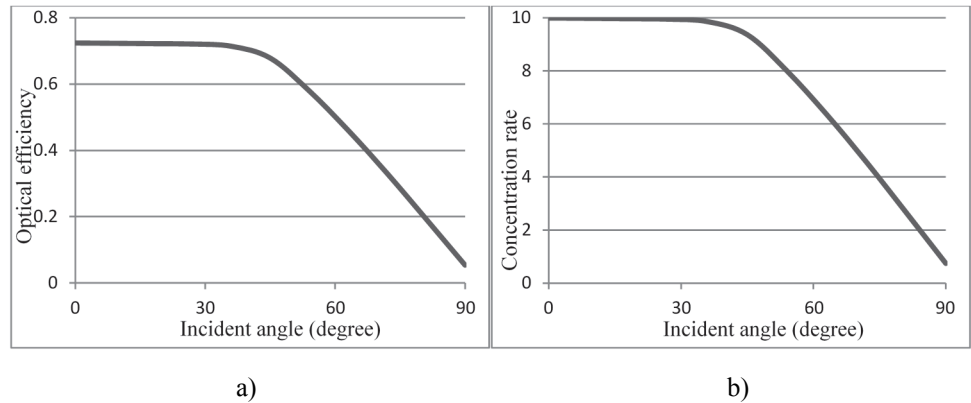


Fig. 8. The optical efficiency (a) and concentration rate (b) versus incident angle versus:
a - optical efficiency, b - concentration ratio

It can be seen from Fig. 8 that the optical efficiency and concentration rate are nearly constant when the incident angle is between 0 and 40 degrees, and then after 45 degree, they sharply decrease. Thus, LFRSCs are operating effectively during the daytime, but in the morning and evening, the efficiency reduces significantly due to the shading and blocking effects.

Conclusions

1. The developed mathematical model allows to determine the optical efficiency and concentration ratio of Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators (LFRSC), depending on all parameters. The developed computer program allows to analyze the optical efficiency and concentration ratio of LFRSC.
2. The shading and blocking effects are the main optical losses in LFRSC. LFRSC are collecting the solar rays during the daytime more effectively when the incident angle of rays is small (up to about 45 degrees).
3. To increase the optical efficiency and the concentration rate of LFRSC, the focus distance can be as high as possible. But the increase in the rate of the optical efficiency and concentration rate reduces at higher values of the focal distance. Therefore the focal distance must be optimized during the design.
4. The mirror width and the distance between the mirrors must be optimized to get the required optical efficiency and concentration rate.

REFERENCES

1. **Günther M.** Advanced CSP Teaching Materials.- Chapter 6.- Linear Fresnel Technology. - 2011.- P.1-43.
2. **Feldhoff J.F.** Linear Fresnel Collectors. A Technology Overview / SFERA Summer School, June 28. - Almeria, Spain, 2012.- P. 1-59.

3. **Walker G.S.** Development of a low cost linear Fresnel solar concentrator. - Stellenbosh University, 2013.-136 p.
4. **Song J., Zhan J. Ma, Z., Dai Y.** Optical Analysis and Optimization of the Linear Fresnel Collector's Mirror Field// International Forum on Energy, Environment Science and Materials. - 2015. - P. 474-478.
5. **Piylipps S.P., Bett A.W., Horowitz K., Kurtz S.** Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology. - Fraunhofer ISE, NREL, Version 1.2, February 2016.- P. 26.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received 15.05.2018.

Ռ.Ռ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Վ.Կ. ԴԱԼԼԱԿՅԱՆ

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ՖՐԵՆԵԼԻԱՅԻՆ ԳԾԱՅԻՆ ԱՆԴՐԱՊԱՐԺՆՈՂ ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՏՈՐ ՊԱՐԱՄԵՏՐՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

Հետազոտվել են արևային էներգիայի ֆրենելային գծային անդրադարձնող կոնցենտրիչի օպտիկական արդյունավետությունը և կոնցենտրացման աստիճանը: Մշակվել են մաթեմատիկական մոդել և բոմվիդությունների ծրագիր: Հետազոտվել են օպտիկական արդյունավետության և կոնցենտրացման աստիճանի կախվածությունները տարբեր պարամետրերից: Ցույց է տրվել, որ արևային էներգիայի ֆրենելային գծային անդրադարձնող կոնցենտրիչների նախագծման ընթացքում ֆոկուսային հեռավորությունը կարող է մեծացվել, և որ պահանջվող օպտիկական արդյունավետությունը և կոնցենտրացման աստիճանը ստանալու նպատակով հայելիների լայնությունը և դրանց միջև հեռավորությունը պետք է օպտիմալացվեն:

Առանցքային բառեր. գծային ֆրենելային կոնցենտրիչ, արևային, հայելի, օպտիկական արդյունավետություն, կոնցենտրացման աստիճան, ֆոկուս, անդրադարձիչ:

Р.Р. ВАРДАНЯН, В.К. ДАЛЛАКЯН

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ФРЕНЕЛЬНОГО ЛИНЕЙНО-ОТРАЖАЮЩЕГО КОНЦЕНТРАТОРА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Исследованы оптическая эффективность и степень концентрации френельного линейно-отражающего концентратора солнечной энергии. Разработаны математическая модель и программное средство. Исследованы зависимости оптической эффективности и степени концентрации от различных параметров. Показано, что при проектировании френельных линейно-отражающих концентраторов солнечной энергии фокусное расстояние может быть увеличено. Для получения необходимой оптической эффективности и степени концентрации ширина зеркал и расстояние между ними должны быть оптимизированы.

Ключевые слова: френельный линейный концентратор, солнечный, зеркало, оптическая эффективность, степень концентрации, фокус, отражатель.

Տ.Ս. ԳՆՈՒՆԻ, Գ.Լ. ԿՈԼՅԱՆ

**ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՏԱՐԲԵՐԻ ԾԱՌԱՅՈՒԹՅԱՆ ՄՆԱՅՈՐԴԱՅԻՆ
ԺԱՄԿԵՏԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ**

Մշակվել է էներգահամակարգի տարրերի փոխարինման վերաբերյալ որոշման կայացման մեթոդիկա, որը հնարավորություն է տալիս նվազեցնել փոխարինման վերաբերյալ որոշում կայացնելու ռիսկը:

Առանցքային բառեր. էներգահամակարգի տարրեր, փոխարինում, որոշման կայացում, ռիսկ, ոչ սիմետրիկ գաուսյան ֆունկցիա:

Ներածություն. Տեխնիկական սարքավորումների կամ դրանց համալիրների ծերացմամբ պայմանավորված սերնդափոխությունը էներգետիկական օբյեկտների բնականոն գործընթաց է: Էլեկտրաէներգետիկական համակարգի զարգացման երկարաժամկետ պլանավորման ժամանակ դրա տարրերի կյանքի տևողության որոշման հարցն արդիական է դառնում: Ծերացման արդյունքում նվազում է սարքավորման աշխատանքի հուսալիությունը, որի արդյունքում էլ աճում են վթարների հաճախականությունը, դրանց վերացման տևողությունը և ծախսերը:

Հաշվի առնելով, որ էներգահամակարգի տարրերի ծերացման վրա ազդող գործոնների փոփոխության մակարդակները ժամանակի ընթացքում անորոշ են, ուստի առաջարկվում է նշված խնդրի լուծման ստորև բերված մոտեցումը:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Էլեկտրաէներգետիկական համակարգի զարգացման երկարաժամկետ պլանավորման ժամանակ հարկավոր է հաշվի առնել որոշ տարրերի ծերացման հանգամանքը և հնարավորինս ճշգրիտ գնահատել այդ տարրի ծառայության մնացորդային ռեսուրսը: Կախված սարքավորումների վերաբերյալ առկա տեղեկատվությունից՝ կարող են կիրառվել գնահատման տարբեր մեթոդներ: Առավել ճշգրիտ արդյունքներ հնարավոր է ստանալ էներգահամակարգի տարրերի ամբողջական տեխնիկական ուսումնասիրության արդյունքում: Նշված մեթոդը զգալի ծախսեր է պահանջում, այդ իսկ պատճառով գործնականում կիրառվում է եզակի դեպքերում [1]:

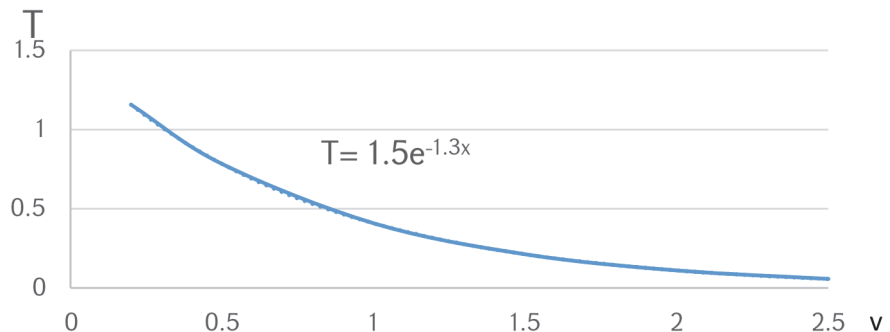
Սարքավորումների ծերացման ֆիզիկական գործընթացների վրա հիմնված մնացորդային ռեսուրսի անհատական կանխատեսման մեթոդները նույնպես գործնական լայն կիրառություն չեն գտել՝ կապված աշխատատարության և պատահական գործընթացների տեսության բարդ մաթեմատիկական ապարատի կիրառման հետ [2]:

Մահմանափակ տեղեկատվության և գնահատման ենթակա մեծաքանակ տարրերի առկայության պայմաններում գնահատման առավել պարզեցված տեխնոլոգիաների անհրաժեշտություն է առաջացել, որոնք հնարավորություն կընձեռեն գնահատումն իրականացնել նվազագույն մուտքային տեղեկատվության պարագայում [3]: Նշված պահանջներին բավարարում են գծային կամ էքսպոնենտային բաշխմամբ մաշվածության մոդելների վրա հիմնված տեխնոլոգիաները [4]: Հարկ է նշել, որ այդօրինակ տեխնոլոգիաների հիմքում դրված են մաշվածության դետերմինացված մոդելները, և ծառայության մնացորդային տևողությունը հաշվարկվում է որպես սարքավորման ծառայության նորմատիվային ժամկետի և արդյունավետ տարիքի տարբերություն:

Վերջին տարիներին լայն կիրառություն են գտել սարքավորումների հուսալիության տեսության շրջանակներում տեղ գտած մեթոդաբանության վրա հիմնված մոտեցումները, որոնց համաձայն՝ սարքավորման մնացորդային ժամկետը պատահական մեծություն է, որը հնարավոր է նկարագրել միայն հավանականային մոդելներով [5, 6]:

Հուսալիության հաշվարկներում նշված մոտեցման կիրառությունը հնարավորություն կտա սարքավորման փոխարինման վերաբերյալ որոշման կայացման ընթացքում հաշվի առնել, որ շահագործման փաստացի ժամկետը կարող է զգալիորեն գերազանցել նորմատիվայինը:

Հավանականային մեթոդների կիրառմամբ և նվազագույն մուտքային տեղեկատվության պայմաններում սարքավորման ծառայության ժամկետի կանխատեսման նպատակով կիրառվում է շահագործման նախորդող ժամանակահատվածի և մնացորդային միջին ժամկետի կախվածության կորը [7]: Նման կորի օրինակ բերված է նկ. 1-ում, որտեղ T -ն ծառայության մնացորդային ժամկետն է՝ ներկայացված հարաբերական միավորներով, և որոշվում է՝ հաշվի առնելով մնացորդային ժամկետի բաշխման խտությունը, իսկ v -ն՝ գնահատման պահին օբյեկտի տարիքը՝ ներկայացված հարաբերական միավորներով, և որոշվում է շահագործման փաստացի τ , և նորմատիվային τ_b , ժամկետների հարաբերակցությամբ հետևյալ արտահայտությամբ՝ $v = \frac{\tau}{\tau_b}$:



Նկ. 1. Ծառայության մնացորդային ժամկետի (T) կախվածությունը նախորդող ծառայության ժամկետից (v)

Ծառայության մնացորդային ժամկետի կանխատեսման ելակետային տվյալները տարրի շահագործման նորմատիվային և գնահատմանը նախորդող փաստացի ժամկետներն են: Նշված մեթոդում անուղղակիորեն հաշվի են առնվում ծերացման մեխանիզմները, որոնք հաշվի են առնված ծառայության ժամկետի վարիացիայի գործակցում, որն ընկած է հաշվարկների հիմքում: Նշվածը ապահովում է մեթոդի արդյունավետությունը և հանդիսանում պարզեցված մեթոդների համեմատ հիմնական առավելություններից մեկը:

Հարկ է նշել, որ մեթոդում կիրառված հաշվարկներում հաշվի է առնվել, որ շահագործման նորմատիվային ժամկետը, որը նշվում է տեխնիկական անձնագրերում և շահագործման փաստաթղթերում, ներկայացնում է օբյեկտի շահագործման նվազագույն ժամկետը, որի ընթացքում սարքավորումը չի կարող հասնել իր սահմանային նշանակությանը: Սակայն, քանի որ այդպիսի հնարավորությունը բացառել չի կարելի, ընդունվել է, որ ոչ ավելի, քան 10% դեպքերում սարքավորումը հանվում է շահագործումից մինչև շահագործման նորմատիվային ժամկետի լրանալը: Պարզ է, որ այդպիսի ենթադրությունների արդյունքում սարքավորման ծառայության ժամկետը, որը դիտարկվում է հետագա հաշվարկներում, գերազանցում է նորմատիվայինը: Միևնույն ժամանակ, տարբեր են նաև ծերացման մեխանիզմները:

Փաստորեն, հաշվարկների արդյունքում բերված կորի ստացման ընթացքում դիտարկված տվյալները նույնպես անորոշություն են պարունակում, որոնց բացասական ազդեցությունը փոխարինման վերաբերյալ որոշման կայացման վրա մեղմելու նպատակով առաջարկվում է դիտարկել ծառայության մնացորդային ժամկետի հաշվարկման հնարավոր սցենարներ: Մասնավորապես, հոռետեսական սցենարում կորի ստացման համար իրականացվող հաշվարկում դիտարկել, որ մինչև շահագործման նորմատիվային ժամկետի լրանալը՝ շահագործումից հանվող սարքավորումների քանակը չի գերազանցում 20%-ը, իսկ լավատեսական սցենարում՝ 5%-ը:

Համաձայն վերը դիտարկված մոդելի՝ բաշխման խտությունն ունի հետևյալ տեսքը.

$$f(t, \kappa, \sigma) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-(\ln t - \kappa)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (1)$$

$$t > 0, -\infty < \kappa < \infty, \sigma > 0,$$

որտեղ τ – ն ծառայության ժամկետն է, τ_b – ն՝ նորմատիվային ժամկետը, t –ն՝ վերջինների հարաբերակցությունը:

t պատահական մեծության մաթեմատիկական սպասումը՝ T , դիսպերսիան՝ D , և վարիացիայի գործակիցը՝ ρ , որոշվում են հետևյալ արտահայտություններով.

$$T = e^{\kappa + \sigma^2/2}, \quad (2)$$

$$D = e^{2\kappa + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1), \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\sqrt{D}}{T} : \quad (4)$$

Մեթոդի հեղինակների կողմից վարիացիայի գործակցի որոշման համար հիմք են ընդունվել համապատասխան գրականության ուսումնասիրության արդյունքները [1, 2, 8, 9], որոնք ցույց են տալիս, որ մեքենաների և սարքավորումների համար վարիացիայի գործակիցն ընկած է 0,3-ից 0,4 միջակայքում: Իրականացված հաշվարկներում վարիացիայի գործակիցն ընդունվել է հավասար 0,3-ի:

Ներկայացված հոռետեսական և լավատեսական սցենարների համար դիտարկենք որոշակի θ , որը բնութագրում է մինչև շահագործման նորմատիվային ժամկետի լրանալը շահագործումից հանվող սարքավորումների քանակը և հոռետեսական սցենարում ընդունում է 0,2 արժեքը, իսկ լավատեսական սցենարում՝ 0,05 արժեքը:

Վարիացիայի գործակցի 0,3 արժեքի և θ նշված մեծությունների դեպքում դիտարկվող սցենարներին համապատասխան ծառայության միջին մնացորդային ժամկետները ներկայացված են աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Ծառայության միջին մնացորդային ժամկետը՝ T , և դիսպերսիան՝ D

Ցուցանիշը	Հոռետեսական սցենար	Լավատեսական սցենար
θ	0,2	0,05
T	1,349859	1,716007
D	0.16399	0.26502

Հաշվի առնելով ներկայացված ենթադրությունները և օգտվելով (2)-(4) արտահայտություններից՝ կարող ենք հաշվարկել լոգարիթմական նորմալ բաշխման բնութագրերը՝ κ -ն և σ -ն, որոնք բնութագրում են օբյեկտը շահագործումից դուրս բերելու գործընթացի հավանականային հատկությունները:

Այդ նպատակով լուծենք հետևյալ հավասարությունների համակարգերը համապատասխանաբար հոռետեսական և լավատեսական սցենարների համար, որոնց արդյունքները ներկայացված են աղ. 2-ում:

$$\begin{cases} e^{\kappa+\sigma^2/2} = T_{hnm} \\ e^{2\kappa+\sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1) = D_{hnm} \end{cases} \quad (5)$$

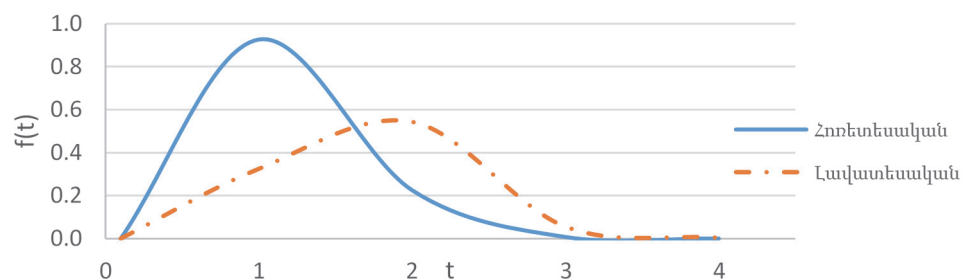
$$\begin{cases} e^{\kappa+\sigma^2/2} = T_{lwf} \\ e^{2\kappa+\sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1) = D_{lwf} \end{cases} \quad (6)$$

Աղյուսակ 2

Լոգարիթմական նորմալ բաշխման բնութագրերը

Բնութագրերը	Հոռետեսական սցենար	Լավատեսական սցենար
κ	0,256911	0,496911
σ	0,29356	0,29356

Այս դեպքում հոռետեսական և լավատեսական սցենարների համար սարքավորման ծառայության ժամկետի բաշխման խտությունները կունենան նկ.2-ում պատկերված տեսքերը:



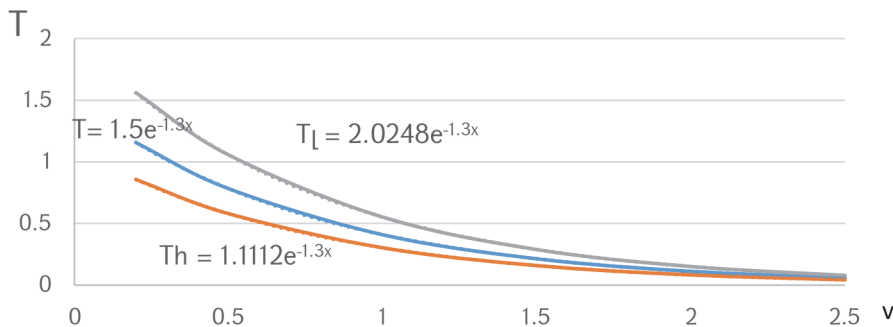
Նկ. 2. Ծառայության ժամկետի բաշխման խտությունն ըստ սցենարների

Հաշվի առնելով, որ շահագործման միևնույն պայմանների դեպքում օբյեկտի շահագործման ժամկետի ընթացքում նվազում է դրա ծառայության մնացորդային արժեքը, գնահատվող օբյեկտի մնացորդային ժամկետի բաշխվածությունը հաշվարկվել է՝ ելնելով հավանականության պայմանական բաշխվածությունից: Լոգարիթմական նորմալ բաշխվածության պայմանական խտությունը, արտահայտ-

ված հարաբերական միավորներով, որը բավարարում է այն պայմանին, որ օբյեկտը շահագործվում է մինչև որոշակի τ տարիք, որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ.

$$f(t) \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\kappa\sigma t}} e^{-\frac{(\log t - \kappa)^2}{2\sigma^2}}, t > \frac{\tau}{\tau_b}, \\ 0, t \leq \frac{\tau}{\tau_b}: \end{cases} \quad (7)$$

Ունենալով վերոնշյալ արտահայտությամբ որոշվող ծառայության մնացորդային ժամկետի բաշխվածությունը և հաշվի առնելով աղ. 2-ում ներկայացված բնութագրերը, կարող ենք որոշել ծառայության մնացորդային ժամկետի միջին մեծությունը հարաբերական միավորներով՝ T -ն, այն դեպքում, երբ օբյեկտը գնահատման պահից առաջ որոշակի τ ժամանակ շահագործվել է: T -ի շահագործման փաստացի ժամկետից կախվածության որոշումն իրականացվել է նշված բաշխման խտությամբ գեներացված պատահական մեծությունների վիճակագրական մոդելավորմամբ: Հաշվարկման արդյունքները ներկայացված են նկ. 3-ում:



Նկ. 3. Ծառայության մնացորդային ժամկետի (T) կախվածությունը նախորդող ծառայության ժամկետից (v) ըստ սցենարների՝ T_l – լավատեսական սցենար, T_h – հոռետեսական սցենար և T հաշվարկային

Էներգահամակարգի տարրերի բնականոն փոխարինման ժամկետի որոշման նպատակով առաջարկվում է կիրառել ոչ հստակ բազմությունների տեսությունը [10]:

ԷԷՀ տարրերի փոխարինման վերաբերյալ որոշման կայացման նպատակով ոչ հստակ բազմությունների կիրառության միջոցով հնարավորություն է ստեղծվում ստանալ ռիսկերի քանակային հաշվարկման մաթեմատիկական մոդել:

Դիտարկենք այնպիսի դեպք, երբ սարքավորման ծառայության որևէ i -րդ տարում կատարվում է ծառայության մնացորդային ժամկետի գնահատում երկու եղանակով՝ վերոնշյալ եղանակով և փորձագիտական գնահատման եղանակով,

որը հաշվի է առնում շահագործման պայմանների առանձնահատկությունները (բեռնավորվածության մակարդակ, կլիմայական պայմաններ, խափանումների քանակ և այլն): Ինչպես նշվեց, սարքավորման աշխատանքի մնացորդային ժամկետը կարող է հաշվարկվել հոռետեսական կամ լավատեսական սցենարներով: Այս անորոշությունը կարելի է ներկայացնել ոչ հստակ բազմության միջոցով, որի պատկանելության ֆունկցիան նշանակենք $\mu_T(x)$: Փորձագետի գնահատականը նույնպես կարող է լինել ոչ հստակ: Այս անորոշությունը նույնպես ներկայացնենք ոչ հստակ բազմության միջոցով, որի պատկանելության ֆունկցիան նշանակենք $\mu_G(x)$: Առաջանում է սարքավորման ծառայության մնացորդային ժամկետի սխալ գնահատման ռիսկ: Այսպիսի սխալ գնահատումը կհանգեցնի սարքավորման բնականոն փոխարինման ժամկետների սխալ պլանավորման, ինչը, իր հերթին, կառաջացնի տեխնիկատնտեսական վնասներ:

Վերջին տարիներին ռիսկերի գնահատման նպատակով առավել մեծ կիրառություն են ստանում ոչ հստակ բազմություններով մոդելները [11-13], որոնցում, ոչ հստակ փոփոխականները բնութագրվում են պատկանելության ֆունկցիայի՝ $\mu(x)$ միջոցով: Առաջադրված խնդրի լուծման նպատակով օգտագործենք ոչ սիմետրիկ գաուսյան ֆունկցիաներով ներկայացված ոչ հստակ եզրակացությունների հետ կապված ռիսկերի գնահատման բանաձևը [14], որտեղ որպես կորստի ֆունկցիա կիրառվում է Տագուտիի միջին կորուստների ֆունկցիան, ինչը հնարավորություն է տալիս գնահատել ոչ միայն կորուստների քանակական մեծությունը, այլև փոփոխելով ռիսկի մեծությունը՝ մոդելավորել որոշում կայացնողի վերաբերմունքը ռիսկի նկատմամբ:

Հետազոտության արդյունքները. Ներկայացված մեթոդիկայի գործնական կիրառության նպատակով դիտարկենք բարձր լարման տրանսֆորմատորի փոխարինման վերաբերյալ որոշում կայացնելու ռիսկերի գնահատում:

Համաձայն ուժային տրանսֆորմատորների տեխնիկական անձնագրերի՝ նորմատիվային ծառայության ժամկետը 25 տարուց ոչ պակաս է, այն դեպքում, երբ շահագործման ընթացքում ժամանակին փոխարինվել են սարքավորման տարրերը և կոմպլեկտավորողները, որոնք ծառայության ավելի կարճ ժամկետ ունեն [15]: Մեր օրինակում դիտարկվող տրանսֆորմատորի վերաբերյալ առկա են հետևյալ տվյալները.

ծառայության նորմատիվային ժամկետը՝ τ_b , 25 տարի,

ընթացիկ տարիքը՝ τ , 20 տարի:

Օգտվելով վերոհիշյալ մեթոդիկայից և նկ. 3-ում ներկայացված սցենարներից՝ հաշվարկենք տրանսֆորմատորի ծառայության միջին ժամկետը: Ներկայացված օրինակի համար ծառայության ժամկետը, արտահայտված հարաբերական միավորներով, ունի $v = \frac{\tau}{\tau_b} = \frac{20}{25} = 0.8$ արժեքը:

Նկ. 3-ում բերված գրաֆիկների միջոցով հաշվարկված մնացորդային ծառայության ժամկետները հարաբերական միավորներով հետևյալն են. $T_h = 0.4$, $T = 0.5$, $T_l = 0.4$: Այստեղից՝ միջին մնացորդային ժամկետը հաշվարկվում է հարաբերական միավորներով ծառայության միջին ժամկետի և ծառայության նորմատիվային ժամկետի արտադրյալով և ներկայացված է աղ. 3-ում:

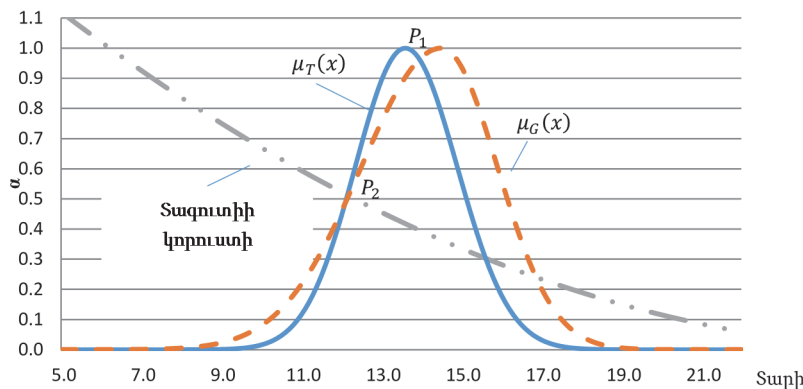
Փորձագետի կողմից իրականացվել է տրանսֆորմատորի շահագործման նախորդ 15 տարիների հուսալիության բնութագրերի և ներկայիս տեխնիկական վիճակի ուսումնասիրություն, և ներկայացված փորձագիտական եզրակացության մեջ նշվել է, որ տրանսֆորմատորի տեխնիկական տեսապես նպատակահարման շահագործման ժամկետը կարող է կազմել 15...20 տարի՝ կախված ընթացիկ պահպանման պայմաններից: Փորձագետի գնահատականը նույնպես ներկայացված է աղ. 3-ում [16]:

Աղյուսակ 3

Ծառայության միջին մնացորդային ժամկետի գնահատականներն ըստ եղանակների և սցենարների

№	Գնահատման եղանակները	Հոռետեսական	Բազային	Լավատեսական
1	Վիճակագրական մեթոդով հաշվարկված ծառայության միջին ժամկետը, տարի	9,8	13,6	17,9
2	Փորձագետի գնահատականը, տարի	8	14,5	19

Հաշվի առնելով աղ. 3-ում ներկայացված տվյալները, ըստ գնահատման մեթոդների և սցենարների ծառայության մնացորդային ժամկետի պատկանելության ֆունկցիաները կունենան հետևյալ տեսքը (նկ. 4):



Նկ. 4. Ծառայության մնացորդային ժամկետի որոշման պատկանելության ֆունկցիաները՝ $\mu_G(x)$ – փորձագիտական գնահատականի հիման վրա, $\mu_T(x)$ – ծառայության միջին ժամկետի հաշվարկման մեթոդի հիման վրա

Ինչպես երևում է նկ. 4-ից, $\mu_T(x), \mu_G(x)$ ֆունկցիաները հատվում են $P_1(13.9; 0.96)$ և $P_2(12.1; 0.49)$ կետերում: P_1 կետը ռիսկի տիրույթի վերին սահմանն է, և $\alpha \geq P_1$ ցանկացած կտրվածքում ռիսկը բացակայում է, իսկ $\varepsilon \leq \alpha < P_1$ տիրույթում ռիսկային իրավիճակ է առաջանում:

Նշված դեպքի համար ներկայացված ռիսկերի հաշվարկման մոդելի միջոցով իրականացված հաշվարկների արդյունքում ռիսկի մեծությունն է՝ Risk=0.81:

Եզրակացություն. Մշակվել է էներգահամակարգի տարրերի փոխարինման մեթոդիկա, որը հնարավորություն է տալիս նվազեցնել փոխարինման վերաբերյալ որոշման կայացման ռիսկը: Ոչ սիմետրիկ գաուսյան ֆունկցիաներով ներկայացված ոչ հստակ եզրակացությունների հետ կապված ռիսկերի գնահատման բանաձևի կիրառությունը հնարավորություն է ստեղծում՝ ստանալու ռիսկերի քանակային հաշվարկման մաթեմատիկական մոդել և տարրերի փոխարինման վերաբերյալ կայացնելու արդյունավետ որոշում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 томах.- М.: Машиностроение, 1987. - 351с.
2. **Болотин В.В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. -312 с.
3. **Ковалев А.П., Курова Е.В.** Массовая оценка оборудования: методика и проблемы // Вопросы оценки. - 2003. - №№ 1, 2.-С.14-19,48-51.
4. **Андрианов Ю.В., Юдина В.** Систематизация методов расчета при оценке машин и оборудования. - <http://www.valnet.ru/m7-157.phtml>
5. **Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З.** Надежность машин.- М.: Высшая школа, 1988. - 238 с.
6. **Шинкевич О.К.** Проблемы определения среднего срока службы оборудования// Материалы научной конференции молодых ученых и студентов “Инновации в экономике. – 2007”: Тезисы докладов.- М.: ИЦ МГТУ “Станкин”, 2007. – С.21-25.
7. **Лейфер Л.А., Кашникова П.М.** 2007, Он-лайн библиотека оценщиков LABRATE.RU, 2002–2007.
8. **Лейфер Л.А.** Методы прогнозирования остаточного ресурса машин и их программное обеспечение.- М.: Знание, 1988. - 60 с.
9. **Лейфер Л.А., Разживина В.С.** Вероятностное описание характеристик усталости на основе распределения Кептейна// В кн.: Точность и надежность механических систем. Исследование деградации машин. -Рига, 1988.- С.73- 91.
10. **Buckley J.** The Fuzzy Mathematics of Finance// Fuzzy Sets & Systems. -1987. - №21.- P. 257-273.
11. **Непомнящий Е.Г.** Инвестиционное проектирование: Учебное пособие. –Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. -262 с.

12. **Дубров А.М., Лагоша Б.И., Хрусталева Е.Ю.** Моделирование рискованных ситуаций в экономике и бизнесе: Учебное пособие /Под ред. Б.А. Лагоши.-М: Финансы и статистика, 2000.-176с.
13. **Недосекин А.О.** Методологические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко-множественных описаний: Дис. ...докт. экон. наук. - СПб., 2003. - 280 с.
14. **Շնյան Գ.Լ.** Անորոշության պայմաններում ներդրումային նախագծերի ռիսկի գնահատման մեթոդ՝ ոչ հստակ բազմությունների կիրառմամբ // «Մխիթար Գոշ» գիտամեթոդական հանդես: -Երևան, 2013.- 7-9(38).- էջ 153-156:
15. Технический паспорт, трансформаторы силовые ТМ, ТМГ, ТМЭ, ТМЭГ, ТМБГ, ТМСУ, ТМГСУ, http://www.mitek.spb.ru/files/pasport_tmg_1351076945.pdf
16. **Осотов В.Н.** Особенности оценки состояния силовых трансформаторов с большим сроком службы <http://forca.ru/stati/podstancii/ostatochnyy-resurs-silovyh-transformatorov.html>.

Հայաստանի Հանրապետության հանրային ծառայությունները կարգավորող հանձնաժողով: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 17.09.2018:

Т.С. ГНУНИ, Г.Л. КОЛЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Разработана методика принятия решения о замене элементов энергосистемы, которая дает возможность снизить риск принятия решения о замене.

Ключевые слова: элементы энергосистемы, замена, принятие решения, риск, несимметричная гауссова функция.

T.S. GNUNI, G.L. KOLYAN

DEFINING THE ENERGY SYSTEM ELEMENT RESIDUAL SERVICE LIFE UNDER THE CONDITIONS OF UNCERTAINTY

The methodology of decision making on the energy system element replacement has been developed, which provides an opportunity to reduce the decision making risk.

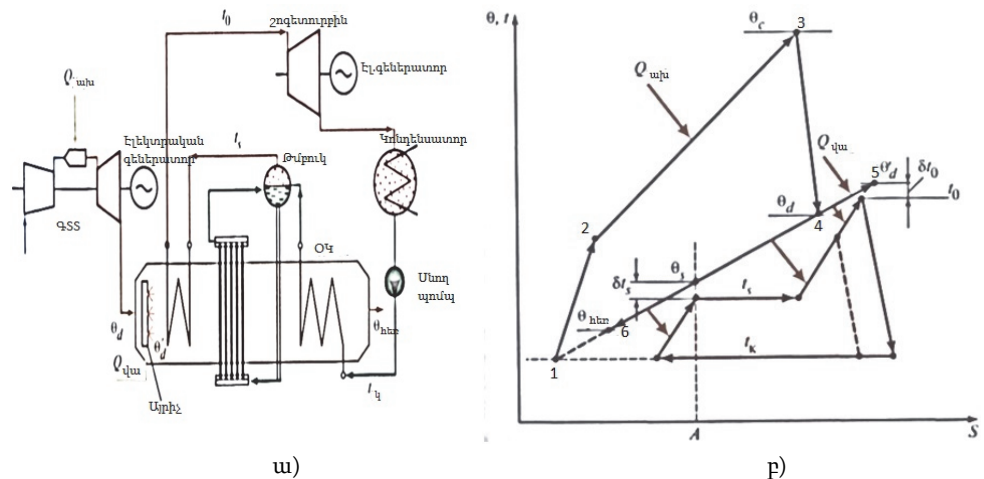
Keywords: energy system elements, replacement, decision making, risk, asymmetric gaussian function.

Ռ.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Լ.Ս. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Ա.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ
 ՎԱՌԵԼԻՔԻ ԼՐԱՅՐՄԱՆ ԱՍՏԻՃԱՆԻ ՈՐՈՇՄԱՆ
 ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ՑԻԿԼՈՎ ՋԵՐՄԱՅԻՆ
 ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐՈՒՄ

Մի շարք դեպքերում ինչպես մեկ, այնպես էլ մի քանի ճնշումների օգտահանիչ կաթսայով (ՕԿ) շոգեգազային տեղակայանքներում (ՇԳՏ) նպատակահարմար է կիրառել վառելիքի լրացուցիչ այրում գազատուրբինային տեղակայանքից (ԳՏՏ) արտանետվող գազերի միջավայրում: Ուսումնասիրվել են ՇԳՏ-ի օ.գ.գ.-ի վրա ՕԿ-ում վառելիքի լրացուցիչ այրման ազդեցությունը և լրայրման օպտիմալ աստիճանի որոշման մեթոդական հիմքերը:

Առանցքային բառեր. շոգեգազային տեղակայանքներ, վառելիքի լրայրում, ջերմային արդյունավետություն, օգտահանիչ կաթսա:

Վառելիքի լրացուցիչ այրումը ԳՏՏ-ից արտանետվող գազերի միջավայրում (նկ.1) հնարավորություն է տալիս բարձրացնել ՕԿ-ում արտադրվող գոլորշու սկզբնական պարամետրերը՝ ջերմաստիճանը՝ T_0 և ճնշումը՝ p_0 , ինչպես նաև ավելացնել դրա ծախսը՝ D_0 , ինչի շնորհիվ մեծանում է ՇԳՏ-ի կազմում շոգետուրբինային տեղակայանքի (ՇՏՏ) հզորությունը:



Նկ. 1. Լրայրմամբ պարզագույն ՇԳՏ-ի սխեման (ա) և ջերմային ցիկլը (բ)

ՕԿ-ում վառելիքի այրումը, առանց լրացուցիչ օդի մատուցման, կայուն այրման պայմանի համաձայն, հնարավոր է ԳՏՏ-ից հետո $100...150^{\circ}\text{C}$ -ից բարձր

ջերմաստիճաններով արտանետվող գազերի հոսքում օքսիդիչի բավարար կոնցենտրացման դեպքում՝ $O_2 \geq 12...14\%$ (օդի ավելցուկի գործակիցը՝ $\alpha_{վտ} > 2$) [1]: Ժամանակակից ԳՏՏ-ների մեծ մասի դեպքում օդի ավելցուկը արտանետվող գազերում կազմում է $\alpha_{վտ} = 3...4$, իսկ ջերմաստիճանը՝ $450...580^\circ\text{C}$: Այդ պատճառով վառելիքի լրայրման համար լրացուցիչ օդի մատուցում չի պահանջվում:

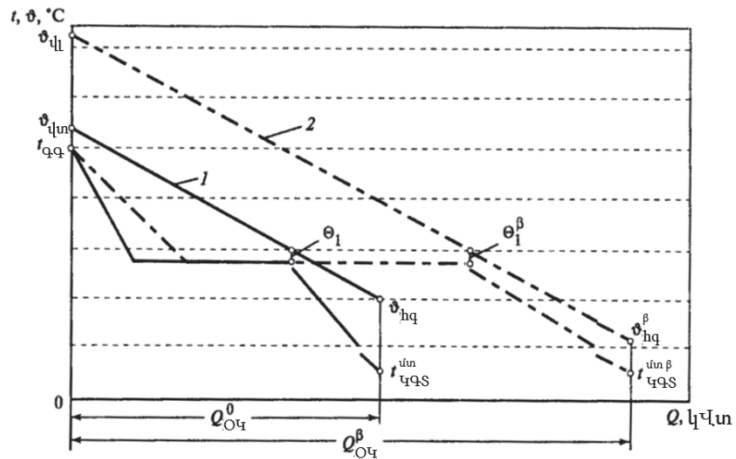
ՇԳՏ-ի միակոնտուր սխեմա: Ընդհանուր առմամբ, վառելիքի լրացուցիչ այրումը միակոնտուր օգտահանիչ կաթսաներով ՇԳՏ-ի ջերմային սխեմայում կարող է իրականացվել շոգետուրբինային մասի գոլորշու սկզբնական անփոփոխ պարամետրերի պայմաններում կամ անցում կատարելով նոր, ավելի բարձր պարամետրերի: Շոգու նոր սկզբնական պարամետրերին անցնելու դեպքում շոգետուրբինային մասում տեղի է ունենում ինչպես շոգու ծախսի, այնպես էլ շոգետուրբինում ջերմանկման փոփոխություն, ինչին համապատասխան փոփոխվում են և՛ ՇՏՏ-ի էլեկտրական հզորությունը, և՛ արդյունավետությունը:

Շոգու անփոփոխ սկզբնական պարամետրերի դեպքում վառելիքի լրայրման կիրառման շնորհիվ ավելանում է ՕԿ-ի շոգեարտադրողականությունը և, հետևաբար, գոլորշային կոնտուրի հզորությունը: Ընդ որում, դրանով պայմանավորված՝ ՇՏՏ-ի ցիկլի արդյունավետության բարձրացում տեղի չի ունենում:

Վառելիքի լրայրում շոգու անփոփոխ սկզբնական պարամետրերի դեպքում ($t_{qg} = const$) կարող է կատարվել, մասնավորապես, ՇԳՏ-ի կազմում տվյալ տիպի գազատուրբինային և շոգետուրբինային տեղակայանքների արդյունավետ ինտեգրման համար: Օրինակ, այն դեպքում, երբ ԳՏՏ-ի արտանետվող գազերի ջերմային պոտենցիալը բավարար չէ ՇՏՏ-ի աշխատանքին համապատասխանող պարամետրերով շոգու անհրաժեշտ քանակությունն արտադրելու համար:

ՕԿ-ում արտադրվող շոգու ջերմաստիճանը (t_{qg}) հաստատուն մակարդակի վրա պահպանելու նպատակով մեծացվում է ջերմաստիճանային էջքը ՕԿ-ի մուտքում, որը տվյալ դեպքում ֆունկցիա է լրայրման աստիճանից՝ $\beta_{լր}$:

Սկզբնական անփոփոխ պարամետրերի դեպքում գոլորշու արտադրության առանձնահատկությունն այն է, որ գոլորշու ծախսի ավելացումը տեղի է ունենում ոչ միայն լրայրման արդյունքում ջերմության լրացուցիչ քանակության $Q_{լր}$ մատուցման հաշվին, այլև ԳՏՏ-ի արտանետվող գազերում պարունակվող ջերմության լրացուցիչ օգտահանման հետևանքով: Վերջինս արտահայտվում է ՕԿ-ի հեռացող գազերի ջերմաստիճանի նվազմամբ (նկ.2): Այլ կերպ ասած՝ օգտահանիչ կաթսայի մուտքում լրայրման հետևանքով գազերի ջերմաստիճանի բարձրացումը հանգեցնում է միակոնտուր ՕԿ-ի տաքացման մակերևույթների միջև գազերի ջերմային հոսքի այնպիսի վերաբաշխման, որը նպաստում է, առանց համեմատելով լրայրման սխեմային ($Q_{ՕԿ}^0$), ԳՏՏ-ի գազերի ջերմային պոտենցիալի ավելի խոր օգտահանմանը:



Նկ.2. Արտադրվող շոգու անփոփոխ պարամետրերի դեպքում միակոնտուր ՕԿ-ում տեղի ունեցող ջերմափոխանակություն պրոցեսների Q - t դիագրամները ՇԳՏ-ի սխեմայի դեպքում.

1. առանց լրայրման, 2. ՕԿ-ից առաջ վառելիքի լրայրման օգտագործմամբ, $\vartheta_{\text{վ}}$ -ը գազերի ջերմաստիճանն է լրայրման սարքավորումների բլոկից հետո, « β »-ն համապատասխանում է լրայրմամբ ՕԿ-ի համար բանող մարմինների պարամետրերին

Այդ դեպքում ՕԿ-ում օգտահանվող ջերմության քանակությունը՝ $Q_{\text{ՕԿ}}^{\beta}$, կարելի է ներկայացնել հետևյալ տեսքով.

$$Q_{\text{ՕԿ}}^{\beta} \approx Q_{\text{ՕԿ}}^0 + \beta_{\text{լր}} Q_{\text{ախ}} + G_{\text{վտ}} (h_{\text{hq}} - h_{\text{hq}}^{\beta}), \quad (1)$$

որտեղ h_{hq} , h_{hq}^{β} -ը հեռացող գազերի էնթալպիաներն են՝ համապատասխանաբար առանց լրայրման և լրայրման կիրառմամբ տարբերակների դեպքում:

ՕԿ-ից առաջ վառելիքի լրայրմամբ ՇԳՏ-ի ջերմային սխեմայի (նկ.1) հաշվարկի մեթոդը ընդհանուր դեպքում նույնատիպ է առանց լրայրման սխեմայի տարբերակին: Սակայն այնպիսի տարրի առկայության հետևանքով, ինչպիսին է լրայրման սարքավորումների բլոկը (ԼՄԲ), առկա են որոշ առանձնահատկություններ:

ՕԿ-ով ՇԳՏ սխեմաների համար վառելիքի լրացուցիչ այրման առկայությունը և աստիճանը բնութագրող կարևորագույն ցուցանիշներից մեկը լրայրման աստիճանն է՝ $\beta_{\text{լր}}$, որը որոշվում է ՕԿ-ից առաջ լրացուցիչ այրվող վառելիքի ջերմության՝ $Q_{\text{լր}}$ հարաբերությամբ ԳՏՏ-ի այրման խուց տրվող վառելիքի ջերմությանը՝ $Q_{\text{ախ}}$.

$$\beta_{\text{լր}} = \frac{Q_{\text{լր}}}{Q_{\text{ախ}}} = \frac{B_{\text{լր}}}{B_{\text{ախ}}}. \quad (2)$$

ԼՄԲ-ում լրայրվող վառելիքի ծախսը՝ $B_{\text{լր}}$, $lq/4$, որոշվում է լրայրման խցի հաշվեկշիռի հավասարումից [2].

$$G_{\text{վտ}} h_{\text{վտ}} + B_{\text{լր}} (Q_{\text{u}}^{\text{p}} + h_{\text{վ}}) \eta_{\text{լր}} = (G_{\text{վտ}} + B_{\text{լր}}) h_{\text{լր}}, \quad (3)$$

որտեղ $G_{\text{վտ}}$ -ը գազային տուրբինից հետո գազերի ծախսն է, $lq/4$, $h_{\text{վտ}}$ -ը՝ ԳՏՏ-ից հետո գազերի էնթալպիան (ՕԿ-ի լրայրման խցի մուտքում), UQ/lq , $h_{\text{լր}}$ -ը՝ գազերի էնթալպիան ԼՄԲ-ից հետո, UQ/lq , $h_{\text{վ}}$ -ը՝ լրայրման տրվող վառելիքի էնթալպիան, UQ/lq , Q_{u}^{p} -ը՝ վառելիքի այրման բանվորական ստորին ջերմությունը, UQ/lq , $\eta_{\text{լր}}$ -ը՝ լրայրման խցի օ.գ.գ.-ն:

Լրայրման կիրառման դեպքում ՕԿ-ով ՇԳՏ-ԿԷԿ-ի էլեկտրաէներգիայի արտադրության բրուտո օ.գ.գ.-ն որոշվում է հետևյալ բանաձևով.

$$\eta_{\text{ՇԳՏ}}^{\text{է,բր}} = \frac{N_{\text{ՇՏՏ}}^{\text{է}} + N_{\text{ՇՏՏ}}^{\text{է}}}{Q_{\text{ախ}} (1 + \beta_{\text{լր}})}. \quad (4)$$

Հայտնի է, որ ֆունկցիայի աճման պայմանը դրա դրական առաջին ածանցյալն է: Էլեկտրաէներգիայի արտադրության օ.գ.գ.-ի աճը, որը որոշում է լրայրման օգտագործման շահավետությունը ջերմային արդյունավետության տեսակետից, տեղի կունենա հետևյալ պայմանի դեպքում.

$$\frac{\partial \eta_{\text{ՇԳՏ}}^{\text{է,բր}}(\beta_{\text{լր}})}{\partial \beta_{\text{լր}}} > 0: \quad (5)$$

Միակոնտուր ՕԿ-ներով ՇԳՏ-ԿԷԿ-երում լրայրման օգտագործման արդյունավետության վերաբերյալ ընդհանրացված եզրակացություններ կատարելու և առաջարկություններ մշակելու համար ընդունենք, որ յուրաքանչյուր լրայրման աստիճանին $\beta_{\text{լր}}$ համապատասխանում է օգտահանիչ կաթսայի առանձնահատուկ կառուցվածք: Այսինքն, եթե նշված չեն կաթսայական ագրեգատի հարմարադասման հատուկ պայմաններ, հնարավոր է տարբեր $\beta_{\text{լր}}$ -ների համար նախագծել բավականին նույնական աերոդինամիկական դիմադրությամբ միակոնտուր ՕԿ-ներ: Այդ դեպքում բավարար է մեկ անգամ հաշվի առնել այդ դիմադրության ագրեգությունը այն ԳՏՏ-ի բնութագրերի վրա, որի հիման վրա ձևավորվել է դիտարկվող շոգեգազային տեղակայանքը: Լրայրման սարքավորումների բոլոր հավելյալ աերոդինամիկական դիմադրության ագրեգությունը ԳՏՏ-ի բնութագրերի վրա աննշան է:

Այդ դեպքում, հաշվի առնելով (4) կախվածությունը և (5)-ում կատարելով համապատասխան ձևավորություններ՝

$$\frac{\frac{\partial}{\partial \beta_{lp}} N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp})}{Q_{\text{wh}}(1+\beta_{lp})} - \frac{N_{\text{qss}}^t + N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp})}{Q_{\text{wh}}(1+\beta_{lp})^2} > 0,$$

$$\frac{\frac{\partial}{\partial \beta_{lp}} N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp}) \cdot (1+\beta_{lp}) - (N_{\text{qss}}^t + N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp}))}{Q_{\text{wh}}(1+\beta_{lp})^2} > 0, \quad (6)$$

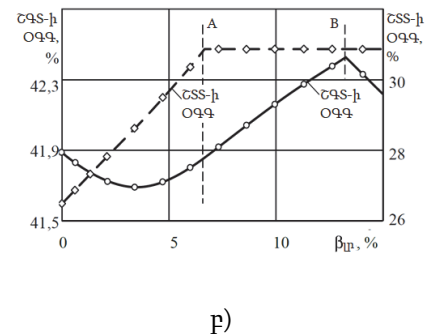
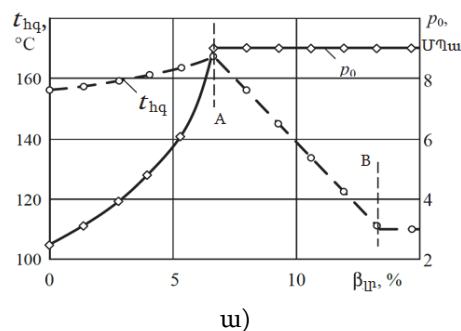
$$\frac{\partial}{\partial \beta_{lp}} N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp}) \cdot (1+\beta_{lp}) - (N_{\text{qss}}^t + N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp})) > 0,$$

ստանում ենք լրայրման օգտագործման դեպքում ՇԳՏ-ԿԷԿ-ի ջերմային արդյունավետության աճի պայմանը.

$$\frac{\frac{\partial N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp})}{\partial \beta_{lp}}}{N_{\text{qss}}^t + N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp})} > \frac{\partial \beta_{lp}}{1+\beta_{lp}} \quad \text{կամ} \quad \frac{\frac{\partial N_{\text{CSS}}^t(\beta_{lp})}{\partial \beta_{lp}}}{N_{\text{qss}}^t(\beta_{lp})} > \frac{\partial \beta_{lp}}{1+\beta_{lp}}. \quad (7)$$

Այսպիսով, (7)-ից հետևում է, որ վառելիքի լրայրման կիրառման դեպքում ՕԿ-ով ՇԳՏ-ԿԷԿ-ի էլեկտրաէներգիայի արտադրության օ.գ.գ.-ի աճ տեղի ունի այն դեպքում, երբ լրայրման հետևանքով ՇԳՏ-ի կազմում ՇՏՏ-ի էլեկտրական հզորության հարաբերական աճն ավելի բարձր է, քան ընդհանուր առմամբ տեղակայանք տրվող վառելիքի լրացուցիչ քանակության հարաբերական աճը:

ՇԳՏ-ների սխեմաների հաշվարկի և գոլորշու օպտիմալ սկզբնական պարամետրերի ընտրության որոշակի բարդությունը պայմանավորված է հետևյալով. միակոնտուր ՇԳՏ-ի ՕԿ-ում արտադրվող շոգու ծախսը՝ D_0 , կախված է դրա պարամետրերից, որոնք ազդում են նաև շոգետուրբինում աշխատանքային ջերմանկման H_{CS} մեծության վրա: Այդ պատճառով ԼՄԲ-ից հետո տարատեսակ ջերմաստիճաններին՝ T_{qI} , ինչպես նաև գոլորշու գերտաքացուցիչում՝ Θ_{qg} և էկոնոմայզերում՝ Θ_1 ջերմաստիճանային տարբերություններին համապատասխանում է գերտաք շոգու սկզբնական ճնշման ուրույն օպտիմալ արժեքը p_0^{opt} , որը աճում է β_{lp} -ն ավելացնելիս (նկ.3ա):



Նկ.3. Համեմատաբար ցածր օ.գ.գ.-ով ՊՏՏ-ի օրինակով լրայրման աստիճանի ազդեցությունը

Ընդ որում, p_0 -ի աճը հնարավոր է մինչև որոշակի առավելագույն արժեքը, որը որոշվում է մետաղի ամրության բնութագրերով: Փոքր հզորությամբ ՇՏՏ-ների դեպքում p_0 -ի բարձր արժեքներին անցում կատարելը խնդրահարույց է նաև՝ պայմանավորված շոգեփոխման առաջին աստիճանների արդյունավետ աշխատանքով: Այդ դասի տուրբինների համար $9U\eta u$, 550°C կարգի թարմ շոգու սկզբնական պարամետրերը կարող են գնահատվել որպես առավելագույն [3]: Այսպիսով, p_0 -ի և t_0 -ի բարձրացման հետ մեկտեղ կատարվում է $\eta_{\text{ՇՏՏ}}$ -ի հավասարաչափ աճ՝ ընդհուպ մինչև p_0 -ի առավելագույն արժեքին հասնելը (A), ինչից հետո $\eta_{\text{ՇՏՏ}}$ -ը չի փոխվում (նկ.3բ): ՕԿ-ի օ.գ.գ.-ն, որը նույնպես ազդում է ամբողջ ՇԳՏ-ի շահավետության վրա, p_0 -ի աճին զուգընթաց, ընդհակառակը, նվազում է արտադրվող գոլորշու ծախսի՝ D_0 և գազերի հոսքի փոխանցած ջերմության ընդհանուր քանակության կրճատման հետևանքով: Արդյունքում աճում է $T_{h,q}$ -ն ՕԿ-ի ելքում:

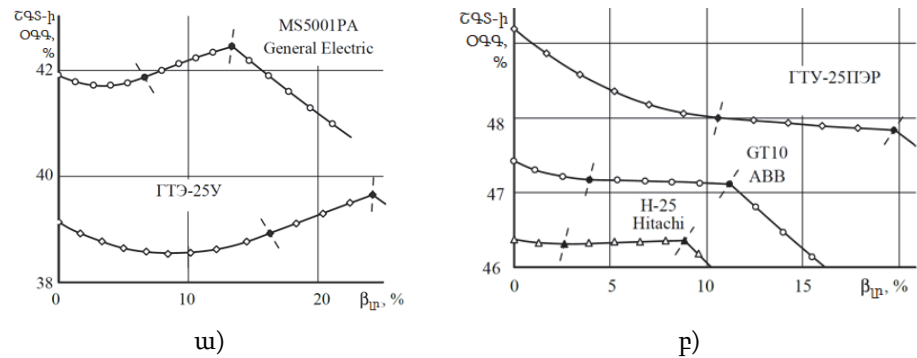
Գոլորշու պարամետրերի առավելագույն արժեքներին ($9U\eta u$, 550°C) հասնելուց հետո β_{pr} -ի մեծացումը հանգեցնում է ՕԿ-ի գոլորշու գերտաքացուցիչի տաք ծայրին ջերմաստիճանային տարբերության աճին: Ինչպես վերը նշվել է (նկ. 2), անփոփոխ Θ_1 -ի պայմաններում D_0 ծախսի ավելացման հետևանքով նվազում է ՕԿ-ից հետո հեռացող գազերի ջերմաստիճանը՝ $T_{h,q}$ -ը, և բարձրանում $\eta_{\text{ՕԿ}}$ -ը: Հենց հեռացող գազերի ջերմության ավելի խոր օգտահանման ու ՕԿ-ի օ.գ.գ.-ի բարձրացման շնորհիվ է ՇԳՏ-ի օ.գ.գ.-ի կախվածությունը շարունակում աճել՝ գործնականորեն չփոխելով իր բնույթը նաև ՇՏՏ-ի ցիկլի առավելագույն արդյունավետության հասնելուց հետո (նկ.3բ):

ՕԿ-ի ցածրջերմաստիճանային տաքացման մակերևույթների կոռոզիայի կանխարգելման պայմանից ելնող $T_{h,q}^{min}$ թույլատրելի նվազագույն արժեքին հասնելիս (B) արդյունավետության հետագա բարձրացումը դադարում է: β_{pr} -ի հաջորդող աճով պայմանավորված՝ համակցված ցիկլի բինարության նվազեցումը ՇՏՏ-ում և ՕԿ-ում արդյունավետության բարձրացման պաշարների բացակայության պայմաններում հանգեցնում է ՇԳՏ-ի օ.գ.գ.-ի զգալի կրճատման (նկ.3բ):

Տարբեր ԳՏՏ-ների պարագայում ՕԿ-ում վառելիքի լրայրման աստիճանի մեծացման հետևանքով միակոնտուր ՇԳՏ-ի ջերմային արդյունավետության փոփոխության բնույթը միանման չէ (նկ.4): Նկարում ընդհատ գծերով հաջորդաբար նշված է արդյունավետության բարձրացման վերին շեմը ՇԳՏ-ի կազմի մեջ մտնող ՇՏՏ-ի և ՕԿ-ի համար:

Համեմատաբար ցածր օ.գ.գ.-ով ԳՏՏ-ների դեպքում, օրինակ՝ MS5001PA (General Electric) և ITD-25Y (Ռուսաստան), ՕԿ-ում լրայրվող վառելիքի քանակությունն ավելացնելիս մինչև $T_{h,q}^{min}$ -ին հասնելու պահը հանգեցնում է ՇԳՏ-ի արդյունավետության բարձրացման: Hitachi H-25 ԳՏՏ-ի դեպքում $\eta_{\text{ՇԳՏ}}$ -ի փոփո-

խություն գործնականորեն տեղի չի ունենում, իսկ բարձր արդյունավետությամբ ABB GT10-ի դեպքում $\beta_{\text{ը}}$ -ի մեծացումը միանշանակորեն նվազեցնում է ՇԳՏ-ի արդյունավետությունը (նկ.4բ):



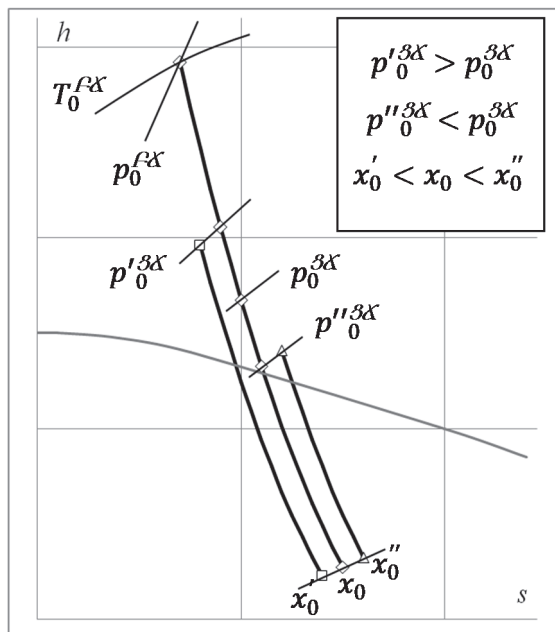
Նկ. 4. Տարբեր արդյունավետությամբ ԳՏՏ-ների հիմքով միակոնստուր ՇԳՏ-ների օ.գ.գ.-ների փոփոխության վրա վառելիքի լրայրման աստիճանի ազդեցությունը

ՇԳՏ-ի երկկոնստուր սխեմա: Երկկոնստուր ՕԿ-ում հեռացող գազերի ջերմության խոր օգտահանման և ՑՃ կոնստուրում գոլորշու արտադրության հաշվին տեղի է ունենում $T_{\text{հգ}}$ -ի ցածրացում մինչև նվազագույն թույլատրելի հաշվարկային մակարդակը՝ բնական գազի դեպքում, որպես կանոն, 100...110°C, իսկ $p_0^{\text{հգ}}$ -ի բարձրացումը չի հանգեցնում $T_{\text{հգ}}$ -ի բարձրացման և, որպես հետևանք, ՕԿ-ի արդյունավետության նվազման: Այդ պատճառով երկկոնստուր ՇԳՏ-ի դեպքում ԲՃ կոնստուրի գոլորշու սկզբնական պարամետրերի բարձրացումը, այլ անփոփոխ պայմանների դեպքում, միանշանակորեն հանգեցնում է ՇԳՏ-ի արդյունավետության բարձրացման՝ շոգետուրբինային ցիկլի օ.գ.գ.-ի և շոգետուրբինի հզորության բարձրացման շնորհիվ:

Այդուհանդերձ, ՇՏՏ-ի հոսքային մասի տրված η_{0i} -ի և կոնդենսատորում $p_{\text{կ}}$ -ի դեպքում $p_0^{\text{հգ}}$ -ի բարձրացումը հանգեցնում է ընդարձակման պրոցեսի վերջնական կետի տեղաշարժման՝ խոնավ գոլորշու տիրույթ խոնավության $y_{\text{կ}}$ ավելի բարձր արժեքներով: Այսպիսով, $p_0^{\text{հգ}}$ -ի բարձրացումը կանխում են $p_{\text{կ}}$ -ն, $y_{\text{կ}}$ -ն և η_{0i} -ն, իսկ T_0 -ի բարձրացումը $\beta_{\text{ը}}$ -ի փոքր արժեքների դեպքում պայմանավորված է ՕԿ-ի լրայրման խցից հետո գազերի ջերմաստիճանով $T_{\text{կլ}}$ և ԲՃ գոլորշու գերտաքացուցիչում ջերմաստիճանային էջքի մեծությամբ, ավելի բարձր $\beta_{\text{ը}}$ -ի և $T_{\text{կլ}}$ -ի դեպքում՝ մետաղի ամրության բնութագրերով: Լրայրումն իրականացվում է լրայրման խցից հետո գազերի 750...900°C-ը չգերազանցող ջերմաստիճանների պայմաններում՝ կաթսայի իրանը և այլ տարրերը չվնասելու համար:

Վերլուծենք ցածր ճնշման կոնստուրի գոլորշու ճնշման $p_0^{\text{հգ}}$ ազդեցությունը ՇԳՏ-ի արդյունավետության վրա: Հիմնական հոսքի հետ խառնման տրվող ՑՃ

գոլորշին ունի որոշակի պոտենցիալ, և որքան վերջինս բարձր է, այնքան ավելի մեծ է ՅՃ գոլորշու ջերմանկումը շոգետուրբինում: Համեմատաբար ցածր p_0^{3x} -ի դեպքում ԲՃԳ-ից հետո խառնման կետ տրվող գոլորշին ունի ավելի բարձր ջերմաստիճան, քան տուրբինում մասամբ ընդարձակված հիմնական հոսքի տեղական ջերմաստիճանն է: Այս դեպքում խառնման արդյունքում տեղի է ունենում գոլորշու ընդհանուր ջերմաստիճանի և էնթալպիայի, ինչպես նաև բանաձ շոգու վերջնական չորության աստիճանի բարձրացում (նկ.5): Համեմատաբար բարձր p_0^{3x} -ի դեպքում կատարվում է հակառակը՝ խառնումից հետո հիմնական հոսքի ջերմաստիճանը նվազում է, իսկ ընդարձակման պրոցեսի վերջնական կետը տեղաշարժվում է ավելի մեծ խոնավության տիրույթ: Քանի որ ՅՃ գոլորշու քանակությունը և հզորության արտադրության մասնաբաժինը ավելի ցածր են, քան ԲՃ կոնստուրի գոլորշունը, ՇԳՏ-ների նախագծման ընթացքում որոշիչ են ԲՃ կոնստուրի պարամետրերը, իսկ ՅՃ կոնստուրի պարամետրերն ընտրվում են այնպես, որ տուրբինում երկու հոսքերի խառնման դեպքում դրանց ջերմաստիճանները և էնթալպիաները մոտ լինեն, և խառնվելիս ՅՃ կոնստուրի գոլորշին ազդեցություն չունենա հիմնական հոսքի պարամետրերի վրա: Վերոնշյալն իրականացվում է p_0^{3x} -ի և Θ_{qg}^{3x} -ի համապատասխան ընտրությամբ:



Նկ. 5. p_0^{3x} -ի ազդեցությունը ՇՏՏ-ում գոլորշու վերջնական խոնավության վրա

Երկկոնստուր ՇԳՏ-ում հեռացող գազերի ջերմաստիճանը ՕԿ-ից հետո նվազագույն մակարդակի վրա է, որը կախված չէ արտադրվող գոլորշու ճնշումից:

Այդ պատճառով, ի տարբերություն միակոնտուր ՕԿ-ի, այստեղ հնարավորություն չկա բարձրացնելու ՕԿ-ի օ.գ.գ.-ն՝ β_{lp} -ն ավելացնելով, կա միայն շոգետուրքինային մասի պարամետրերի և արդյունավետության բարձրացման որոշակի պաշար: Այն իրացվում է ինչպես տուրբինում աշխատանքային ջերմանկման բարձրացմամբ, այնպես էլ ՑՃ կոնտուրով արտադրվող համեմատաբար ոչ բարձր պոտենցիալով գոլորշու մասնաբաժնի կրճատմամբ: Ինչպես արդեն ցույց էր տրվել, β_{lp} -ի բարձրացումը միակոնտուր ՕԿ-ի համար $p_0 = const$ դեպքում նվազեցնում է T_{hq} -ն: Դա նշանակում է, որ երկկոնտուր ՕԿ-ի համար տվյալ դեպքում տեղի կունենա ՑՃ կոնտուրում փոխանցվող ջերմության քանակության նվազեցում, այսինքն՝ $D_0^{\beta K}$ -ի նվազեցում:

$\eta_{CQS} = f(\beta_{lp})$ ֆունկցիան ունի մեկ բեկման կետ. մինչև β_{lp} -ի որոշակի արժեքը գազերի ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց տեղի է ունենում բարձր ճնշման կոնտուրի գոլորշու ծախսի ավելացում և ՇՏՏ-ի ցիկլի սկզբնական պարամետրերի ($t_0^{\beta K}$ և $p_0^{\beta K}$) բարձրացում, ինչը պայմանավորում է շոգետուրքինի օ.գ.գ.-ի ավելի արագ բարձրացման տեմպը: Շոգու սկզբնական պարամետրերի առավելագույն արժեքներին հասնելիս տեղի է ունենում ֆունկցիայի բեկում, դանդաղում է ՇՏՏ-ի օ.գ.գ.-ի աճը՝ որոշվող միայն $D_0^{\beta K}$ -ի նվազմամբ, իսկ ՇԳՏ-ի արդյունավետությունը նվազում է ավելի մեծ ինտենսիվությամբ:

Ամփոփելով՝ նշենք, որ վառելիքի լրայրման կիրառման նպատակահարմարությունը երկկոնտուր ՕԿ-ով ՇԳՏ-ների սխեմաներում առաջին հերթին կախված է ԳՏՏ-ի արդյունավետությունից և դրա ելքում աշխատած գազերի ջերմաստիճանից:

Ցածր արդյունավետությամբ ԳՏՏ-ների համար (մինչև 30% օ.գ.գ.-ով) վառելիքի լրայրումը ՕԿ-ում շահավետ է կիրառել β_{lp} -ի ողջ տիրույթում: Միջին մակարդակի արդյունավետությամբ տեղակայանքների համար (ԳՏՏ-ի օ.գ.գ.-ն 30...33%) նպատակահարմար է վառելիքի լրայրումը հասցնել միայն մինչև գոլորշու բարձր պարամետրերին անցնելու և ՇՏՏ-ի ավելի արդյունավետ ցիկլին հասնելու պահը: Բարձր արդյունավետությամբ գազային տուրբինների համար (35%-ից ավելի օ.գ.գ.-ով) վառելիքի ցանկացած լրայրումը, այսինքն՝ ՇԳՏ-ի բինարության նվազեցումը, անդրադառնալու է տեղակայանքում էլեկտրաէներգիայի արտադրության շահավետության նվազման վրա:

Եզրակացություններ

1. ՇԳՏ-ում ԳՏՏ-ից հետո արտանետվող գազերում վառելիքի լրացուցիչ այրման կիրառման նպատակահարմարությունը պետք է որոշվի ՇԳՏ-ի ընտրված սխեմայի գոլորշու պարամետրերի մանրամասն լավարկային հաշվարկների հետ կապակցված:

2. Վառելիքի լրայրման օգտագործումը թույլ է տալիս բարձրացնել ՇՏՏ-ի արդյունավետությունը և հզորությունը, ինչպես նաև նվազեցնել հեռացող գազերի ջերմաստիճանը միակոնտուր ՕԿ-ի ելքում, ինչը որոշակի պայմաններում, կախված է սխեմայի հիմնական բաղադրիչների բնութագրերից, կարող է հարուցել ընդհանուր առմամբ ՇՖՏ-ի օ.գ.գ.-ի որոշ չափով բարձրացում:

3. Ինչպես ՇՖՏ-ի համեմատաբար պարզ միակոնտուր սխեմայի փոխարեն առավել կատարյալ երկկոնտուր սխեմա ընտրելիս, այնպես էլ ՇՖՏ-ում ավելի արդյունավետ ՉՏՏ-ներ օգտագործելիս ՕԿ-ում վառելիքի լրայրում իրականացնելու արդյունավետությունը նվազում է:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Торжков В.Е.** Дожигание топлива в тепловой схеме конденсационных парогазовых установок с котлами-утилизаторами одного давления: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 48 с.
2. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремизов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учеб. пособие для вузов / Под ред. **С.В. Цанева.** – 2-е изд., стереот. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 584 с.
3. **Яковлев Б.В., Гринчук А.С.** Оптимизация начальных параметров и степени дожигания топлива в котлах-утилизаторах ПГУ с одним и двумя давлениями пара // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2007. – № 6. – С. 69 – 77.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.10.2018:

Ր.Գ. ХАЧАТРЯН, Л.С. ОГАНЕСЯН, А.Г. ХАЧАТРЯН

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ДОЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО ЦИКЛА

В ряде случаев на парогазовых установках (ПГУ) с котлом-утилизатором (КУ) как одного, так и нескольких давлений целесообразно применение дополнительного сжигания топлива в среде выхлопных газов газотурбинной установки. Исследованы воздействие дополнительного сжигания топлива в КУ на коэффициент полезного действия ПГУ и методические основы определения оптимальной степени дожигания.

Ключевые слова: парогазовые установки, дожигание топлива, тепловая эффективность, котёл-утилизатор.

R.G. KHACHATRYAN, L.S. HOVHANNISYAN, A.G. KHACHATRYAN
**PECULIARITIES OF DETERMINING THE DEGREE OF SUPPLEMENTARY
FIRING IN COMBINED CYCLE THERMAL POWER PLANTS**

In some cases, at combined-cycle (CCGT) power plants with a heat recovery steam generator (HRSG) of both one and several pressures, it is advisable to use additional fuel combustion in the environment of exhaust gases of the gas turbine. The effect of burning additional fuel in the HRSG on the efficiency of the CCGT and the methodological basis for determining the optimal degree of supplementary firing are investigated.

Keywords: combined-cycle gas turbine, duct firing, thermal efficiency, heat recovery steam generator.

П.О. ХАЧАТРЯН, Л.А. ВАРДАНЯН

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ
ОБКЛАДКАМИ И ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

Исследуются секции конденсаторов с полипропиленовым диэлектриком и комбинированными обкладками, охлаждаемыми с помощью двух змеевиков, припаянных к торцу пакета секций. Показано, что в результате применения полипропиленового диэлектрика, обладающего малым тангенсом угла диэлектрических потерь, и водяного охлаждения с помощью двух змеевиков удастся увеличить частоту конденсатора до 100 кГц и выше.

Ключевые слова: конденсатор, комбинированные обкладки, полипропиленовый диэлектрик, охлаждающие змеевики, частота, малые диэлектрические потери, высокая электрическая прочность, большой срок службы.

Введение. Создание быстродействующих тиристорных преобразователей с малыми временами восстановления свойств позволяет в настоящее время увеличить частоту коммутаций до 100 кГц и выше. Это стало возможным с помощью конденсаторов с комбинированными обкладками, охлаждаемыми с помощью двух змеевиков, при наличии полипропиленовой пленки (ПП). Применение комбинированных обкладок из фольги и двусторонней металлизированной бумаги позволяет сочетать все положительные качества бумажно-фольговых конденсаторов и двусторонней металлизированной бумаги, являющейся одновременно фитилем для качественной пропитки.

В настоящее время тиристорные преобразователи широко используются в электротранспорте, поэтому увеличение удельных характеристик конденсатора позволяет улучшить удельные параметры всего преобразователя.

Наряду с высокими параметрами к коммутирующим конденсаторам предъявляются особые требования по надежности, определяемые также спецификой их применения.

Для существующих конструкций, применяемых в конденсаторостроении, достигнутый уровень удельных характеристик явно не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к удельным параметрам коммутирующих конденсаторов, применяемых в электротранспорте. Поэтому необходимы более совершенные конструкции конденсаторов с применением наиболее качественных диэлектриков.

В настоящее время наиболее качественным диэлектриком, применяемым в конденсаторостроении, является ПП, обладающая высокой электрической прочностью и малым тангенсом угла диэлектрических потерь [1].

Результаты исследований секций конденсаторов с комбинированными обкладками и полипропиленовым диэлектриком при наличии двух охлаждаемых змеевиков дают возможность увеличить частоту конденсаторов до 100 кГц и выше [2].

Постановка задачи и обсуждение результатов исследования. Важнейшей характеристикой конденсатора, определяющей его качество, является прежде всего его электрическая прочность. Известно [3,4], что кратковременная электрическая прочность слоистой изоляции зависит от токопроводящих включений и краевого эффекта обкладок. Однако наличие свойства самовосстановления позволяет практически исключить влияние токопроводящих включений на кратковременную электрическую прочность конденсатора и применять однослойный диэлектрик минимально возможной толщины.

В настоящей работе исследуется поле у краев плоского конденсатора с учетом толщины обкладок и закругления углов на краях обкладок [5].

Термическая стабильность конструкции конденсатора при высокой удельной мощности обеспечивается как достижением малого угла потерь, так и улучшением внутренней теплопроводности при наличии двух охлаждающих змеевиков.

Условие оптимального выполнения высоковольтных конденсаторов заданной мощности в отношении минимального превышения напряженности электрического поля на краях обкладок путем разбивки на последовательно соединенные секции обеспечивается в данной конструкции схемным решением без дополнительных внешних соединений [6]. На рис.1 показан только случай для двух последовательно соединенных емкостей.

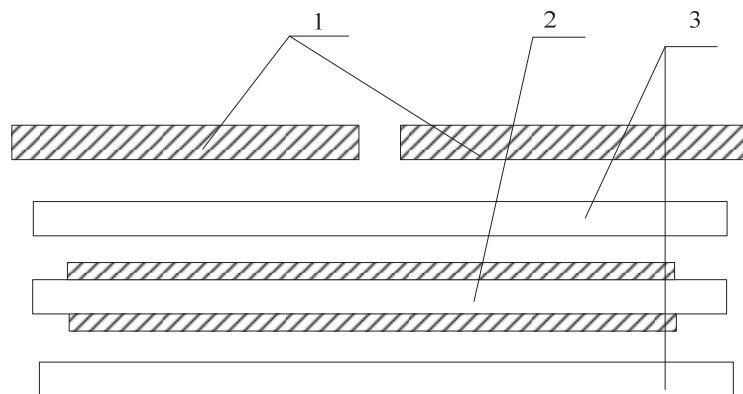
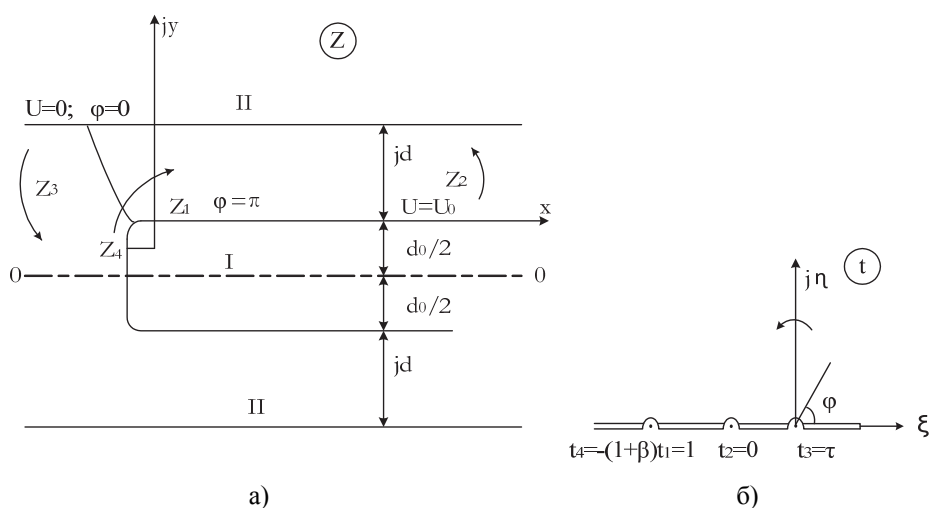


Рис.1. Схема намотки секции нового коммутационного конденсатора с комбинированными обкладками:

1 - фольговые обкладки, 2 - двусторонняя металлизированная бумага, 3 – полипропиленовый диэлектрик

Область плоского конденсатора с неоднородным полем у краев обкладок представляется схематически в виде, показанном на рис.3.



313

Исследование электрического поля между обкладками (I) и (II) ввиду симметричности картины поля относительно силовой линии 0...0 (рис.3) решается путем конформных преобразований с применением уравнения Кристоффеля-Шварца:

$$\frac{E_Z}{E_0} = \sqrt{1 + \frac{1}{\left[a(d_0/2d+1)(1 \pm \gamma \sqrt{1+\beta(1-\gamma^2)}/a^2(d_0/2d+1)^2)/1-\gamma^2 \right]^2 - 1}} \times \frac{1+\gamma\sqrt{1+\beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}, \quad (1)$$

где E_Z - напряженность на закругленном краю обкладки; $E_0 = U/d$ - рабочая напряженность поля в однородной области поля; d_0 - толщина обкладок; d - толщина диэлектрика, а a и γ определяются параметрами конденсатора.

Как видно из уравнения (1), отношение напряженностей зависит от отношения толщины обкладок к толщине диэлектрика $n = d_0/d$ и радиуса закругления кромок ρ , максимальное значение которого не может превышать $\rho_{max} = d_0/2$.

Полученное выражение (1) связывает напряженность поля на краю обкладки E_Z с напряженностью равномерной области E_0 для случая однородной среды (среда считается однородной, так как диэлектрические проницаемости полипропилена и кремнийорганической жидкости примерно равны).

Значения отношения напряженности электрического поля на закругленном краю обкладки к напряженности равномерной области в зависимости от параметров конденсатора рассчитывались с помощью специальной программы для $n = 0,01; 0,1; 1; 10$ и сравнивались с существующими эмпирическими выражениями, полученными в [3,7]. Результаты расчетов приведены в табл. 1-4, где также приведены значения, рассчитанные по [3,7].

Таблица 1

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 0,01$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1 + \gamma\sqrt{1+\beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$\sqrt{\frac{d}{\pi\rho}}$ [3]
0,01	0,010	0,965	0,00000	20,400	202,60	-
0,10	0,011	0,960	0,00003	6,600	63,25	90,00
0,50	0,012	0,850	0,00023	3,390	30,40	33,80
1,00	0,014	0,750	0,00061	2,730	23,12	22,70
5,00	0,0188	0,480	0,00211	2,016	14,80	12,30
10,00	0,020	0,377	0,00280	1,880	13,34	10,60
40,00	0,023	0,213	0,00396	1,750	11,55	8,95
100,00	0,024	0,142	0,00434	1,700	11,00	8,50
400,00	0,025	0,070	0,00482	1,670	10,52	8,10

Таблица 2

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 0,1$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1 + \gamma\sqrt{1+\beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$1,4 \sqrt[3]{\frac{2+n}{n}}$
0,01	0,103	0,998	0,00001	20,00	65,00	65,00
0,10	0,107	0,960	0,00029	6,59	21,00	21,15
0,50	0,124	0,856	0,00253	3,38	10,00	10,20
1,00	0,139	0,767	0,00554	2,70	7,70	7,90
5,00	0,190	0,498	0,01970	1,99	4,90	5,20
10,00	0,210	0,390	0,02690	1,85	4,40	4,70
40,00	0,248	0,220	0,03800	1,72	3,85	4,20
100,00	0,260	0,149	0,04200	1,67	3,67	4,06
400,00	0,273	0,078	0,04600	1,63	3,53	3,90

Таблица 3

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 1$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1 + \gamma\sqrt{1+\beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$\sqrt[3]{\frac{2+n}{n}}$ [7]
0,01	1,25	0,994	0,00006	20,00	26,90	25,50
0,10	1,31	0,972	0,00173	6,56	8,67	8,34
0,50	1,52	0,889	0,01517	3,32	4,27	4,05
1,00	1,737	0,817	0,03367	2,63	3,30	3,23
5,00	2,70	0,588	0,13183	1,85	2,17	1,97
10,00	3,30	0,485	0,19311	1,70	1,93	1,73
40,00	4,64	0,307	0,31403	1,52	1,68	1,47
100,00	5,40	0,217	0,37604	1,46	1,59	1,39
400,00	6,28	0,120	1,43668	1,42	1,52	1,32

Таблица 4

Отношение напряженности поля E_Z к напряженности равномерной области поля конденсатора при $n = 10$

β	τ	γ	$\frac{d_0}{2d}$	$\frac{1 + \gamma\sqrt{1+\beta}}{\gamma\sqrt{\beta}}$	$\frac{E_Z}{E_0}$	$\sqrt[3]{\frac{2+n}{n}}$ [7]
0,01	35,10	0,985	0,00010	20,19	20,48	21,54
0,10	36,70	0,980	0,00304	6,54	6,63	6,95
0,50	42,93	0,920	0,02663	3,269	3,30	3,55
1,00	49,70	0,867	0,05950	2,560	2,59	2,60
5,00	88,00	0,694	0,24650	1,73	1,74	1,72
10,00	122,00	0,615	0,38034	1,56	1,56	1,53
40,00	257,00	0,0477	0,72350	1,34	1,34	1,33
100,00	439,00	0,404	0,98800	1,25	1,25	1,26
400,00	1029,00	0,317	1,417	1,15	1,15	1,19

Как видно из таблиц, результаты полученных аналитических расчетов хорошо согласуются с результатами расчетов существующих эмпирических выражений.

Данные, приведенные в табл. 1-4, показывают, что при изменении отношения d_0/d на три порядка ($n = 0,01 \dots 10$) выражение $1 + \gamma\sqrt{1+\beta}/\gamma\sqrt{\beta}$ практически не изменяется, поэтому при исследовании оптимальности d_0/d из условия обеспечения максимальной удельной мощности конденсатора влиянием этого выражения в формуле (1) можно пренебречь.

Не допуская погрешности более 0,3%, для практических значений отношения $d_0/d = 1$ можно упростить выражение (1), представив его в следующем виде:

$$E_Z = E_0 \sqrt{\frac{1+4}{n^2+4n}} \cdot \sqrt[3]{\frac{n+2}{n}}, \quad (2)$$

где $n = d_0/d$ - отношение толщины обкладок к толщине диэлектрика.

Определяя значение отношения выражения удельной реактивной мощности конденсатора и выражая значение емкости и активного объема через геометрические параметры, для намотанных конденсаторов получим

$$q = \frac{U^2 \omega C}{V} = \frac{8,85 E_0^2 \omega \varepsilon}{1+d_0/d} = \frac{8,85 E_0^2 \omega \varepsilon}{1+n}, \quad (3)$$

где V - объем конденсатора.

Подставляя значение E_0 из (2) в (3), получим

$$q = \frac{8,85 E_Z^2 \omega \varepsilon}{(1+n)(1+4/n^2+4n) \sqrt[3]{1+(d/\rho)^2}} = \frac{A E_Z^2}{(1+n)(1+4/n^2+4n) \cdot \sqrt[3]{(2+n/n)^2}}, \quad (4)$$

где ω - угловая частота; ε - диэлектрическая проницаемость; а A – постоянная, равная

$$A = 8,85 \omega \varepsilon.$$

Исходя из технологических соображений и учитывая оптимальное значение q , отношение толщины обкладок к толщине диэлектрика принимается равным 1,5 (рис.4).

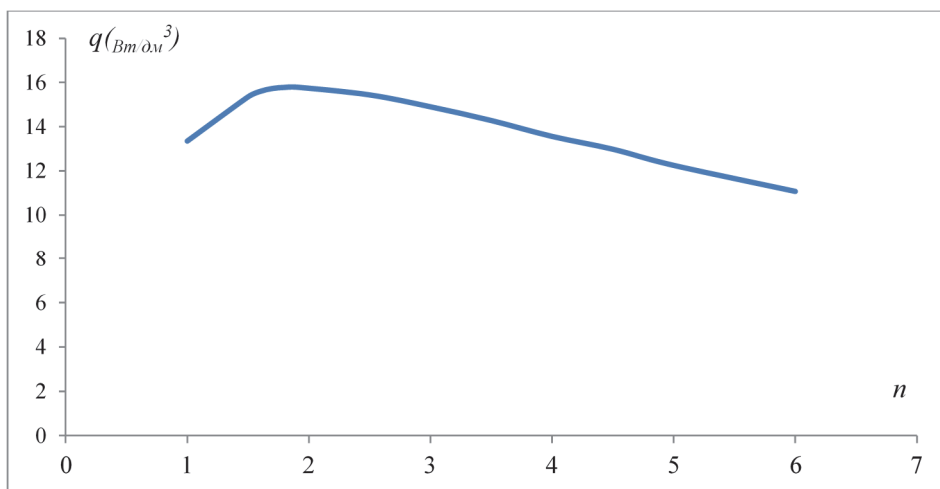


Рис.4. Зависимость q от отношения $n = d_0/d$

Таким образом, в результате проведенных теоретических исследований электрического поля между обкладками конденсатора, имеющего определенную толщину обкладок и закругления краев, получено новое выражение, позволяющее рассчитать и оптимально проектировать конденсаторы с минимальным превышением напряженности поля у краев обкладок.

Показано, что как прямое следствие этой закономерности, при минимальном заданном превышении напряженности у краев обкладок конденсатора с отношением $d_0/d = 1,5$ получается максимальная удельная мощность.

Выводы

1. Полученные общие аналитические выражения хорошо согласуются с существующими в литературе эмпирическими выражениями для расчета превышения напряженности поля на краю обкладки.
2. Однослойный диэлектрик с минимально возможной толщиной можно применять благодаря свойству самовосстановления конденсатора.
3. Применение ПП минимально возможной толщины позволяет резко увеличить удельные параметры конденсатора с комбинированными обкладками.
4. Применение комбинированных обкладок и ПП при наличии двух охлаждающих змеевиков дает возможность увеличить частоту конденсатора до 100 кГц и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “Dielectrics” каталог фирмы “BOLLORÉ TECHNOLOGIES”, 2006.
2. Արտոնագիր №3224А. Ջրային հովացումով կոնդենսատոր / **Լ.Ա. Վարդանյան, Մ.Զ. Բաղդասարյան, Պ.Հ. Խաչատրյան, Է.Վ. Կուրդինյան**. - Հրապարակված է 01.10.2018թ.
3. **Кучинский Г.С.** Высоковольтные импульсные конденсаторы.- М.: Энергия, 1973.- 176 с.
4. **Бабаджаниян А.С., Хачатрян П.О., Кургинян Э.В., Мартикян Э.Х.** Конденсаторы для высокочастотной силовой электроники // Вестник ГИУА: Сборник научных и методических статей.- 2010.- Т.2, №1.- С. 133-137.
5. **Хачатрян П.О., Акопян В.А., Сараджев В.А., Чатинян Ю.С.** Исследование электрического поля на краю обкладки с учетом ее толщины и закругления кромки // Межвуз. сб. науч. тр. Сер. XIII “Электротехника”.- Ереван, 1976.- Вып. 3.- С. 176-191.
6. **Хачатрян П.О., Кургинян Э.В., Варданян Л.А.** Новая конструкция секции самовосстанавливающегося конденсатора // Вестник НПУА: Сб. научн. ст.- Ереван, 2017.- Часть 1.- С. 56-66.
7. Техника высоких напряжений / Под ред. **М.В. Костенко**.- М.: Высш. школа, 1973.- 528 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 10.10.2018.

Պ.Հ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Լ.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ԿՈՍՄԵՆՏԱՑՎԱԾ ՇՐՋԱՊԻՐՆԵՐՈՎ ԵՎ ՋՐԱՅԻՆ ՀՈՎԱՑՈՒՄՈՎ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվում են պոլիպրոպիլենային դիէլեկտրիկով և կոմբինացված շրջադիրներով սեկցիաներ, որոնք հովացվում են երկու գալարախողովակի միջոցով՝ զոդված սեկցիայի փաթեթին ճակատային մասերում: Փոքր դիէլեկտրիկական կորուստների անկյան տանգենսով պոլիպրոպիլենային դիէլեկտրիկի և երկու գալարախողովակի միջոցով ջրային հովացման կիրառման դեպքում հաջողվում է կոնդենսատորի հաճախությունը մեծացնել մինչև 100 կՀց և ավելի:

Առանցքային բառեր. կոնդենսատոր, կոմբինացված շրջադիրներ, պոլիպրոպիլենային դիէլեկտրիկ, հովացնող գալարախողովակներ, հաճախություն, փոքր դիէլեկտրիկական կորուստներ, բարձր էլեկտրական ամրություն, երկարատև ծառայության ժամկետ:

P.H. KHACHATRYAN, L.A. VARDANYAN

**INVESTIGATION OF CAPACITORS WITH COMBINED COATINGS
AND WATER COOLING**

The sections of capacitors with a polypropylene dielectric and combined coatings cooled with two coils soldered to the package section are studied. It is shown that by using a polypropylene dielectric with a small tangent of the dielectric loss angle and water cooling by means of two coils, it is possible to increase the frequency of the capacitor to about 100 *kHz* and higher.

Keywords: capacitor, combined coatings, polypropylene dielectric, cooling coils, frequency, low dielectric losses, high electric strength, large service life.

N.H. ABROYAN, S.C. MORAL

**USING A HYBRID DISCRIMINATIVE-GENERATIVE MODEL FOR
CLASSIFICATION OF REAL-TIME DATA**

Discriminative and generative classification algorithms solve the same type of problems, but different principles lie under them and each type has their advantages and drawbacks. Considering that fact, one can infer that it would be nice to have a model which will derive best properties from each type of algorithm. In this paper, a new and a more generic hybrid discriminative-generative generic model is proposed. Also, a new hybrid model structure finding and building an effective algorithm is proposed. We present the theoretical justification of advantages of the hybrid model over its constituent and previous algorithms, then perform experiments and compare the results.

Keywords: machine learning, classification, real-time data, generative algorithms, discriminative algorithms, hybrid model.

Introduction. Data classification is a very common task and is used in many different spheres of research and industry. In the scope of this work we concentrate on the classification of real-time data, which has some properties [1]. Due to those properties, the machine learning model should have some additional properties and the most important one is that the model should be adaptive. In addition, it is very common to have missing values in real-time data. For instance, some fields in a bank's client's account can be missing, which will lead to additional difficulties for the classification task. Also, as the classification system should work in real-time, it must have high performance. We can infer that the model, which carries out the classification of the real-time data should be adaptive, able to handle the missing values, have high performance.

In our previous research, we mainly used neural networks (which are a part of discriminative algorithms) for the classification of real-time data, after which we compared them with Bayesian networks (which are a part of generative algorithms) [2, 3]. Although neural networks outperform all the other algorithms, they have some drawbacks, such as non-adaptivity, disability to deal with the missing values, training time resource and time consumption. On the other hand, Bayesian networks successfully handle those problems [4]. Thus, we can infer that it would be nice to have a method to combine the positive properties of those two approaches. Moreover, it would be nice to make the model generic, which will be

possible to be built over not only just neural networks, but other discriminative algorithms as well. Considering all the facts mentioned above, in this work, we propose a literature-based, more generic hybrid discriminative-generative model, which includes the best properties from each of those algorithms. This work concentrates only on binary classification tasks and if the data set has more than two classes, one-vs-all method can be applied [5].

Related works and methodology. In the last several years, there have been some investigations and proposals on hybrid discriminative-generative models [6-12]. In literature, the proposed models for the discriminative part, a logistic regression algorithm has been used and for the generative part naive Bayes, tree-augmented naive Bayes, linear discriminant analysis algorithms have been used in different works. Also, different methods for feature distribution among the constituent algorithms, i.e. constructing the hybrid model, are proposed in each paper.

Although in case of classification both discriminative and generative algorithms solve similar problems and can be presented as graphs, there are principle differences between them. In case of classification tasks, discriminative algorithms learn $p(y|x)$ directly, but generative algorithms learn $p(x|y)$ and $p(y)$, after which they compute $p(y|x)$ with Bayes theorem [4, 13, 14].

Examples of discriminative algorithms are logistic regression (LR), support vector machines (SVM), decision trees, random forests, neural networks (NN) etc. Examples of generative algorithms can be Bayesian networks, in particular naive Bayes and tree-augmented naive Bayes [14].

The hybrid discriminative-generative model combines those two algorithms with different principles in one model [12]. A graphical structure of an example of a hybrid discriminative-generative model (with logistic regression and naive Bayes models) represented as a Bayesian network is shown in Fig. 1 [12].

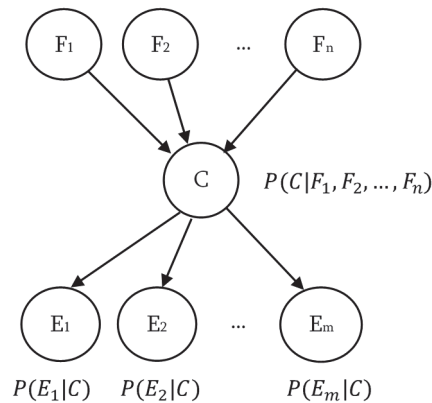


Fig. 1. A hybrid logistic regression-naive Bayes model as a Bayesian Network

In the figure above, node C is the class variable, the other nodes present the features from the data set. $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ (which are the parents for the node C) are feature nodes in the discriminative part (in this example logistic regression), and $\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$, (which are the children of the node C) are the feature nodes in the generative part (in this example naive Bayes). $\{F_1, F_2, \dots, F_n\} \cup \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ will usually be the whole set of features, however it is also possible that some features be excluded according to some criteria.

On top of it, there is a conditional independence assumption of a hybrid model, which implies that the features in the discriminative part of the model are conditionally independent of the features in the generative part of the model, given the class variable C [12]. Moreover, if naive Bayes is considered in the discriminative part, then the features in the generative part of the model are mutually conditionally independent, given C [6, 12]. The first conditional independence assumption implies that for learning the parameters of the conditional distribution of C , given the features in the discriminative part, i.e. while computing $P(C|F_1, F_2, \dots, F_n)$, the features in the generative part are irrelevant. Similarly, for learning the parameters of the generative part of the hybrid model, the features in the discriminative part are irrelevant. Thus, standard approaches can be used for separate training of the discriminative algorithm with $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ features and for learning the parameters of the generative algorithm with the $\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ features. For this purpose, graphical structures of separate models for logistic regression and naive Bayes represented as Bayesian networks are shown in Fig. 2 [12].

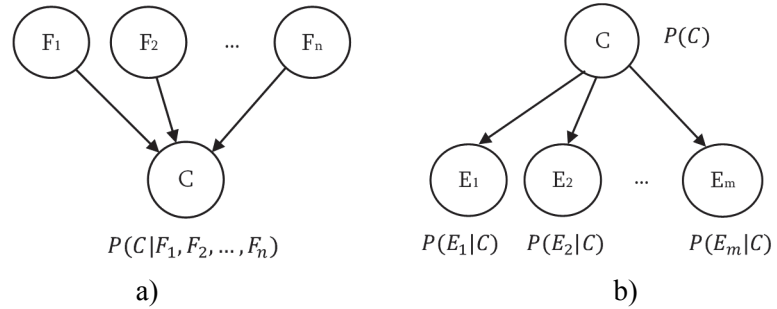


Fig. 2. A logistic regression (a) and naive Bayes (b) models as Bayesian Networks

As it is shown in Fig. 2-a, the output of the logistic regression model is the posterior probability of the class C , given the features i.e. $P(C|F_1, F_2, \dots, F_n)$. That is basically the output of the logistic regression algorithm, which is a real number in the $[0, 1]$ interval and can be presented as a probability. On the other hand, in Fig. 2-b, $P(C)$ is the prior probability for the naive Bayes and in the hybrid discriminative-generative model - the output of the discriminative model (in this

case logistic regression) serves as the prior probability for the generative model (in this case naive Bayes). As we extend the generative part and there can be different algorithms, sometimes the output of an algorithm will not be in the $[0,1]$ interval, but it can easily be converted to a value in that range.

A hybrid model inherits the best features from both discriminative and generative models [12]. First, the hybrid model retains the simplicity of its constituent models [12].

Second, it gives a possibility to handle the missing values [12]. Missing data are common in real-life datasets. Depending on the amount of the missing data, they may significantly affect the efficiency and accuracy of classifiers. Simple methods for handling the missing data are either to delete the instances with the missing data, or in case of Bayesian networks to impute the missing data, using expectation-maximization algorithms [12]. Thus, if in the hybrid model's dataset there are features with missing values, they can be restricted to the generative part, because it is able to easily handle the missing values.

Third, naive Bayes is also good for adaptiveness [4]. That means that if in real-time data there are features that can undergo changes over time, they can be restricted to the generative part and naive Bayes can handle them.

Forth, the accuracy of a hybrid model is guaranteed to be at least not bad as the accuracy of constituent algorithms. The reason is simple: if a hybrid model does not perform well, all the features of the dataset can be sent to one of the constituent algorithms and it will work as a standalone model and the result will be as if the algorithms have been run separately.

The model structure finding and building algorithm. Next, we discuss how such a hybrid discriminative-generative model is built i.e. how dataset features are distributed among discriminative and generative parts of the hybrid model. It is very important to have an effective algorithm for rapidly finding a hybrid model structure, which will have the best accuracy, because otherwise there are total 2^p possibilities (where p is the number of features) of constructing the model, which for relatively big numbers can be an intractable problem [12]. From the experimental results, it is obvious that the methods that are presented in different papers are not always effective. We propose a new algorithm for building a hybrid model. Moreover, our hybrid model is more generic, because the constituent discriminative algorithm can be logistic regression, support vector machines, decision trees, neural networks. In the frames of this work, the constituent generative algorithm is restricted to the naive Bayes.

The basic idea that lies under our proposed algorithm is the conditional independence of the features of the naive Bayes. All the features from the dataset are tested for the conditional independence for the given class C . After that,

conditionally more independent features are chosen for the naive Bayes part and the remaining - for the discriminative part. For that purpose, a new hyperparameter is defined in the model, which is marked α . That hyperparameter is a threshold value for the conditional independence values which should be tested for all the features i.e. if the conditional independence $(x_i, x_j | C) > \alpha$ for the given i and $\forall j \in [1, p], i \neq j$ (where p is the features count), then x_i will conditionally be considered an independent variable of other features and will be included in the generative part. Here is the pseudocode of the hybrid model structure searching and building algorithm:

```

Input: dataset, number of features – p, class variable – C
Output: features for discriminative and generative parts
for i = 1 to p
  for j = 1 to p
    if (i ≠ j)
      if (CI(xi, xj | C) < α)
        break;
  if (for loop for j ended without break)
    add ith feature to the generative part;
add remaining features to the discriminative part;

```

In the pseudocode, $CI(x_i, x_j | C)$ is a function, which returns the conditional independence value for x_i and x_j for the given class C .

Here arises a question concerning the α hyperparameter tuning. That can be performed in the process for searching the best structure for the hybrid model. The pseudocode for that is as follows:

```

Input: dataset
Output: hybrid model's the best structure
declare vector testResults;
α = 1;
while (discriminative part is not empty)
{
  consructHybridModel();
  trainAlgorithms();
  testResults <- testHybridModel();
  α = α / 10;
}
decide the best model construction from testResults

```

In the pseudocode, $consructHybridModel()$ is a function, where the algorithm from the previous pseudocode is implemented, $trainAlgorithms()$ is a function, where algorithms in discriminative and generative parts are trained separately on

the train data, testHybridModel() is a function, where the hybrid model is tested on the test data and returns the test accuracy (or F_1 score).

As it can be seen from the pseudocode, the idea of choosing α is simple: at the beginning α is chosen 1, which means that all the dataset features will be in the discriminative part. After that, on each iteration, its value is decreased 10 times. The algorithm runs while the discriminative part is not empty. At the end, the model with the best test accuracy is chosen.

Experiments and results. The implementation of the described algorithms and models was carried out in the R language by using bnlearn package [15]. In our experiments, we compare the accuracy of the hybrid model with that of the separate constituent algorithms. As a comparison, metric accuracy and F_1 score are chosen for the compatibility with our previous research and studies in literature. Experiments were done for 18 datasets from the UCI repository [16]. Since not all the datasets have a structure and properties of real-time or financial data, the datasets have been chosen, considering the following criteria: binary classification problem, balanced datasets, financial sphere is a plus. Some datasets were originally imbalanced and some examples from the major class were removed in order to keep the dataset balanced. Imbalanced datasets are out of scope of this work. The conditional independence of the features are calculated through p -value from the return value of the bnlearn's *ci.test()* function [15]. The experimental results are shown in the Table.

Table

Experimental results of accuracy and F_1 score

Dataset	Algorithm name	Accuracy			F_1 score		
		Discr. algorithm	Naive Bayes	Hybrid	Discr. algorithm	Naive Bayes	Hybrid
1	2	3	4	5	6	7	8
№1	LR	0.775	0.755	0.795	0.8484	0.8361	0.8628
	SVM	0.805	0.755	0.81	0.8745	0.8361	0.8782
	Decision Trees	0.785	0.755	0.785	0.8634	0.8361	0.8634
	NN	0.735	0.755	0.77	0.8203	0.8361	0.8476
№2	LR	0.9437	0.9388	0.9584	0.882	0.8633	0.9109
	SVM	0.9462	0.9388	0.9462	0.8791	0.8633	0.8804
	Decision Trees	0.9462	0.9388	0.9462	0.8817	0.8633	0.8817
	NN	0.9559	0.9388	0.9633	0.9052	0.8633	0.923
№3	LR	0.8913	0.8985	0.9202	0.8648	0.8679	0.9009
	SVM	0.8623	0.8985	0.8985	0.8347	0.8679	0.875
	Decision Trees	0.8695	0.8985	0.913	0.8421	0.8679	0.8888
	NN	0.8913	0.8985	0.913	0.8623	0.8679	0.8909

Continuation of the Table

1	2	3	4	5	6	7	8
№4	LR	0.9714	0.9785	0.9785	0.9565	0.9684	0.9684
	SVM	0.9714	0.9785	0.9785	0.9565	0.9684	0.9684
	Decision Trees	0.9571	0.9785	0.9785	0.9333	0.9684	0.9684
	NN	0.9571	0.9785	0.9928	0.9387	0.9684	0.989
№5	LR	0.989	0.92	0.989	0.9883	0.9126	0.9883
	SVM	0.9963	0.92	0.9963	0.9961	0.9126	0.9961
	Decision Trees	0.96	0.92	0.9636	0.9568	0.9126	0.9615
	NN	0.9921	0.92	0.9921	0.9919	0.9126	0.9919
№6	LR	0.9208	0.9199	0.9271	0.9304	0.9306	0.9362
	SVM	0.938	0.9199	0.9412	0.9464	0.9306	0.9491
	Decision Trees	0.8946	0.9199	0.9271	0.9066	0.9306	0.9352
	NN	0.9488	0.9199	0.952	0.9543	0.9338	0.9581
№7	LR	0.9523	0.9047	0.9807	0.9583	0.92	0.9883
	SVM	0.9642	0.9047	0.9642	0.9678	0.92	0.9678
	Decision Trees	0.9761	0.9047	0.9761	0.9787	0.92	0.9795
	NN	0.9805	0.9047	0.9856	0.9823	0.92	0.9898
№8	LR	0.8173	0.8325	0.8325	0.8366	0.8519	0.8519
	SVM	0.8443	0.8325	0.8483	0.8621	0.8519	0.8654
	Decision Trees	0.8408	0.8325	0.8495	0.8445	0.8519	0.8611
	NN	0.8665	0.8325	0.8685	0.874	0.8519	0.8755
№9	LR	0.9803	0.9372	0.9803	0.9795	0.9333	0.9795
	SVM	0.9921	0.9372	0.9921	0.9919	0.9333	0.9919
	Decision Trees	0.9803	0.9372	0.9803	0.9794	0.9333	0.9794
	NN	0.9921	0.9372	0.9921	0.9919	0.9333	0.9919
№10	LR	0.9776	0.9925	0.9925	0.923	0.9756	0.9756
	SVM	0.985	0.9925	0.9925	0.9696	0.9756	0.9841
	Decision Trees	0.9477	0.9925	0.9998	0.8679	0.9756	0.9996
	NN	0.9776	0.9925	0.9925	0.923	0.9756	0.9756
№11	LR	0.9745	0.9745	0.983	0.9577	0.9577	0.9714
	SVM	0.9805	0.9745	0.983	0.9613	0.9577	0.9714
	Decision Trees	0.9915	0.9745	0.9915	0.9818	0.9577	0.9818
	NN	0.9745	0.9745	0.983	0.9577	0.9577	0.9714
№12	LR	0.975	0.8625	0.9765	0.9765	0.8717	0.978
	SVM	0.9421	0.8625	0.9546	0.9461	0.8717	0.9577
	Decision Trees	0.9671	0.8625	0.9715	0.9687	0.8717	0.9703
	NN	0.9937	0.8625	0.9937	0.9942	0.8717	0.9942
№13	LR	0.9602	0.938	0.9716	0.9545	0.9462	0.9669
	SVM	0.9545	0.938	0.9545	0.9584	0.9462	0.9584
	Decision Trees	0.9752	0.938	0.9793	0.9652	0.9462	0.9805
	NN	0.9752	0.938	0.9793	0.9797	0.9462	0.9831
№14	LR	0.9014	0.9154	0.9295	0.923	0.9333	0.945
	SVM	0.9154	0.9154	0.9154	0.9361	0.9333	0.9361
	Decision Trees	0.8873	0.9154	0.9154	0.9148	0.9333	0.9333
	NN	0.9295	0.9154	0.9577	0.9425	0.9333	0.9647

Continuation of the Table

1	2	3	4	5	6	7	8
№15	LR	0.878	0.878	0.9268	0.8648	0.8717	0.9189
	SVM	0.878	0.878	0.878	0.8648	0.8717	0.8717
	Decision Trees	0.878	0.878	0.9268	0.8571	0.8717	0.9189
	NN	0.8666	0.878	0.9024	0.8888	0.8717	0.8888
№16	LR	0.8333	0.7962	0.9074	0.8941	0.8607	0.9397
	SVM	0.8703	0.7962	0.9074	0.9195	0.8607	0.9411
	Decision Trees	0.8518	0.7962	0.8888	0.909	0.8607	0.9285
	NN	0.7777	0.7962	0.8703	0.8695	0.8607	0.9176
№17	LR	0.8333	0.7962	0.9074	0.8941	0.8607	0.9397
	SVM	0.8703	0.7962	0.9074	0.9195	0.8607	0.9411
	Decision Trees	0.8518	0.7962	0.8888	0.909	0.8607	0.9285
	NN	0.7777	0.7962	0.8703	0.8695	0.8607	0.9176
№18	LR	0.691	0.7471	0.7528	0.6994	0.7668	0.7731
	SVM	0.7359	0.7471	0.7696	0.7486	0.7668	0.7918
	Decision Trees	0.6292	0.7471	0.7584	0.6117	0.7668	0.7794
	NN	0.7191	0.7471	0.7584	0.7159	0.7668	0.7794

As we can see from the results, the hybrid model almost always has a higher accuracy and, in some cases, is equal to its constituent algorithm. Also, there is an interesting pattern - discriminative algorithm works better if the number of features is not large.

Moreover, by raising the accuracy of predictions, we do not harm the training performance. The reason is, each constituent algorithm gets fewer features and the training time is less. Moreover, trainings of the constituent algorithms can be performed in parallel, e.g. in different threads.

Conclusion. In this work, we have presented a literature based, more generic hybrid discriminative-generative model and a new method for finding an effective model structure. We have introduced the theoretical and practical justification of the efficiency of our proposed approaches. The proposed hybrid model almost always has a higher, and in some cases the same accuracy as its constituent algorithms. Also, the model building-training performance is not worse than its constituent algorithms - training performance. The drawback of the proposed method is the additional hyperparameter α , which should be tuned during the training.

Acknowledgement. I would like to thank my host academic supervisor Professor Serafin Moral from the University of Granada, who helped me in this research during my mobility stay at the University of Granada in Spain.

REFERENCES

1. **Abroyan N., Hakobyan R.** A review of the usage of machine learning // Proceedings of NPUA: Information technologies, Electronics, Radio engineering.- Yerevan, Armenia, 2016.- № 1. - P. 46-54.
2. **Abroyan N., Hakobyan R.** Convolutional Neural Networks for Real-Time Data Classification // Proceedings of the 11th International Conference “Computer Science and Information Technologies” (CSIT). - Yerevan, Armenia, 2017. - P. 267-269.
3. **Abroyan N.** Convolutional and Recurrent Neural Networks for Real-time Data Classification // Proceedings of the 7th International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH 2017). - Luton, UK, 2017. - P. 42-45.
4. **Jensen F., Nielsen T.** Bayesian Networks and Decision Graphs. - New York, USA, Springer, 2007.
5. **Rifkin R., Klautau A.** In Defense of One-vs-All Classification // Journal of Machine Learning Research.- 2004.- Vol. 5.- P. 101-141.
6. **Rubinstein D., Hastie T.** Discriminative vs Informative Learning // Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-97). - AAAI Press, 1997. - P. 49–53.
7. **Raina R., Shen S., Ng A., McCallum A.** Classification with Hybrid Generative/Discriminative Models // NIPS'03 Proceedings of the 16th International Conference on Neural Information Processing Systems. - Cambridge, MA, USA, MIT Press, 2003. - P. 545-552.
8. **Kang C., Tian, J.** A Hybrid Generative/Discriminative Bayesian Classifier // Proceedings of the 19th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS-2006). - 2006. - P. 562–567.
9. **Xue J., Titterington M.** Joint discriminative–generative modelling based on statistical tests for classification // Pattern Recognition Letters. – 2010.-Vol. 31 (9). - P. 1048-1055.
10. **Fujino A., Ueda N., Saito K.** A hybrid generative/discriminative approach to text classification with additional information // Information Processing & Management. – 2007.- Vol. 43 (2). - P. 379-392.
11. **Bishop C., Lasserre J.** Generative or Discriminative? Getting the Best of Both Worlds // Bayesian Statistics 8. Oxford University Press, 2007. - P. 3–24.
12. **Tan Y., Shenoy P., Chan M., Romberg P.** On Construction of Hybrid Logistic Regression-Naive Bayes Model for classification // JMLR: Workshop and Conference Proceedings. - 2016. - Vol. 52. - P. 523-534.
13. **Boneh D., Ng A.** CS229: machine learning course materials. – Stanford University [<http://cs229.stanford.edu/syllabus.html>]. – 2016.
14. **Koller D., Friedman N.** Probabilistic Graphical Models. - Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 2009.
15. **Scutari M.** Learning Bayesian Networks with the bnlearn R // Journal of Statistical Software. - 2010. - Vol. 35. - P. 1-22.

16. **Dheeru D., Karra T.** Efi UCI machine learning repository. - Irvine, California, University of California, School of Information and Computer Sciences [http://archive.ics.uci.edu/ml]. - 2017.

National Polytechnic University of Armenia, University of Granada. The material is received 10.09.2018.

Ն.Հ. ԱԲՐՈՅԱՆ, Ս.Կ. ՄՈՐԱԼ

**ՀԻԲՐԻԴԱՅԻՆ ԴԻՍԿՐԻՄԻՆԱՏԻՎ-ԳԵՆԵՐԱՏԻՎ ՄՈԴԵԼԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ
ԻՐԱԿԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԻ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ԴԱՍԱԿԱՐԳՄԱՆ ՀԱՄԱՐ**

Դասակարգման դիսկրիմինատիվ և գեներատիվ ալգորիթմները լուծում են նույն տեսակի խնդիրներ, սակայն նրանց հիմքում տարբեր սկզբունքներ են ընկած, և այդ ալգորիթմներից յուրաքանչյուրն ունի իր առավելություններն ու թերությունները: Հաշվի առնելով այդ հանգամանքը՝ կարելի է եզրակացնել, որ նպատակահարմար կլինեն ունենալ ինչ-որ մոդել, որը կժառանգեր այդ ալգորիթմների տեսակներից յուրաքանչյուրի դրական հատկությունները: Առաջարկվում է նոր դիսկրիմինատիվ-գեներատիվ ընդհանրացված հիբրիդ մոդել: Առաջարկվում է նաև հիբրիդային մոդելի կառուցվածքի փնտրման և կառուցման նոր ալգորիթմ: Տեսականորեն հիմնավորվում է հիբրիդային մոդելի առավելությունն իր բաղկացուցիչ ալգորիթմների համեմատ, որից հետո կատարվում են փորձեր, և համեմատվում են արդյունքները:

Առանցքային բառեր. մեքենայական ուսուցում, դասակարգում, իրական ժամանակի տվյալներ, գեներատիվ ալգորիթմներ, դիսկրիմինատիվ ալգորիթմներ, հիբրիդային մոդել:

Н.О. АБРОЯН, С.К. МОРАЛ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ДИСКРИМИНАЦИОННО-ГЕНЕРАТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Дискриминационные и генеративные алгоритмы классификации решают одни и те же проблемы, но в их основе лежат разные принципы, и каждый из этих алгоритмов имеет свои преимущества и недостатки. Учитывая этот факт, можно сделать вывод, что целесообразно иметь модель, которая будет наследовать лучшие свойства каждого из алгоритмов. В данной статье на основе литературного обзора предлагается новая гибридная дискриминационно-генеративная общая модель. Разработан новый алгоритм поиска и построения гибридной модели. Дано теоретическое обоснование преимуществ гибридной модели над ее составляющими алгоритмами. Проведены эксперименты и представлены сравнительные результаты.

Ключевые слова: машинное обучение, классификация, данные реального времени, генеративные алгоритмы, дискриминационные алгоритмы, гибридная модель.

A.E. YESAYAN

MODELING OF ELECTROSTATICS AND DRAIN CURRENT SOI FinFET

An analytical expression is obtained for 2D electrostatic potential in Tri-Gate SOI FinFET in weak and moderate inversion regimes. The obtained solution allows to calculate the threshold voltage with great accuracy. Further, a simple model is proposed to calculate the drain current. The calculations are performed considering silicon thicknesses from 10 nm to 60 nm and channel length down to 25 nm. The model is validated with numerical simulations, and good accuracy is obtained.

Keywords: SOI FinFET, MOSFET, undoped body, Tri-gate FET, threshold voltage, potential model.

Introduction. Multi-gate devices such as Double Gate (DG) or Tri-Gate (TG) MOSFETs are attractive alternatives of planar MOSFETs. The multi-gate control of the channel highly suppressed the short channel effects [1-4]. Another example of the DG structure is the thin film in-plane gate FETs, where the electrostatics of two-dimensional system dominate. Such electrostatic problems in 2D systems are well interpreted in [5]. Besides, the Fin-shaped Field Effect Transistors (FinFET) have excellent compatibility with existing CMOS fabrication technology [2-4]. The experimental and simulation results show that the TG FinFET dimensions are more flexible and relaxed compared to single-gate or DG devices. To avoid the doping challenges and the implied threshold voltage variations, the undoped body is the proper choice for these structures [6-9]. Analytical models of the electrostatics are extremely important in guiding the device design and in providing physical insights of the device behaviour. There are already several published analytical works on TG FETs [10-13]. However, the accurate analytical modeling of TG FinFETs is rather challenging. A. Kloes et al have developed an analytical, structure oriented model for the potential barrier in undoped TG FinFETs, which inherently includes short channel and corner effects [10]. However they neglect mobile charge term in sub-threshold regime, and this makes the potential solution less accurate, since the mobile charge will affect the electrostatic performance in near-threshold regime whereas the corner effects are not essential for undoped body [7-9]. The mobile charge term in weak inversion was neglected also in [11]. The mobile charge was accounted in the model suggested by El Hamid et al [12] but they simply assume the parabolic decay for the potential along the vertical direction (from top gate to bottom), and by defining the parameters from boundary conditions expand the solution of DG FET to TG.

An analytical compact model for the threshold voltage of TG FinFETs is presented in [13], however the dependence on top oxide thickness is not included in the model. The generalized threshold analyses is provided in [6] valid only for an ultra-thin body.

In this paper, we present a potential-based semi-analytical model for TG SOI FinFET which is valid for large range of structural parameters. The presented model can be considered also as the generalisation of DG MOSFET model [14]. The 2D Poisson equation is solved in weak inversion including the mobile charge term. The model is derived for long channel TG SOI FinFET, however it can be easily be extended to short channel devices based on [15]. The silicon body thickness and height are considered to be greater than thermal de Broglie wave length (which is about 8 nm for Si [16]), thus the quantum effects can be neglected. The extensive validation of analytical model with numerical simulations shows the accuracy of the proposed model.

The paper is organized as follows. Section I presents the analytical model for the electrostatic potential in sub-threshold and moderate inversion. The modeling of TG FET in strong inversion is presented in Section II. Section III presents the comparisons with numerical simulations and discussions.

Methodology: Analytical model

1. **Weak and moderate inversion.** Fig. 1 shows the cross section of the FinFET structure considered. The silicon fin is of height H , width W , the side oxides are of thickness t_{ox_side} , the top oxide is of thickness t_{ox_top} .

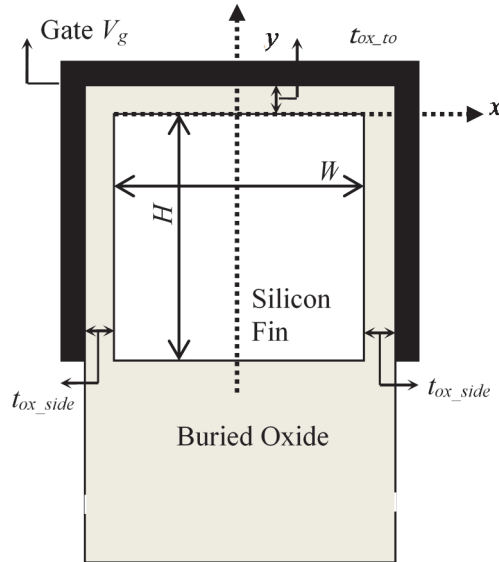


Fig. 1. Cross section of the TG FinFET structure

For long channel devices, the impact of the drain voltage in the formation of sub-threshold current is negligible, thus, for simplicity, in this stage of development we assume that the source and drain are grounded. All energies are referred to the Fermi energy of the channel. Top and side gates are at the same voltage (V_g).

We can write the Poisson equation in the silicon fin considering only the mobile electrondensity:

$$\frac{\partial^2 \phi(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x,y)}{\partial y^2} = \frac{q}{\epsilon_{si}} n_i e^{\frac{\phi(x,y)}{V_T}}, \quad (1)$$

where q is the electron charge, ϵ_{si} -the silicon permittivity, n_i - the silicon intrinsic carrier density, and V_T - the thermal voltage. For symmetry considerations, (1) can be solved only for $x \geq 0$, with the following boundary conditions (BCs),

$$\left(\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} \right)_{x=0} = 0, \quad (2)$$

for the top gate, and for $-W/2 \leq x \leq W/2$, we have:

$$C_{ox_Top} (V_g^* - \phi(x, 0)) = \epsilon_{si} \left(\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \right)_{y=0}, \quad (3)$$

where as for the side gate, for $-H \leq y \leq 0$,

$$C_{ox_Sd} (V_g^* - \phi(W/2, y)) = \epsilon_{si} \left(\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} \right)_{x=W/2}, \quad (4)$$

where $C_{ox_Sd} = \epsilon_{ox}/t_{ox_side}$ and $C_{ox_Top} = \epsilon_{ox}/t_{ox_top}$ are the capacitances per unit area of the side and top oxides, respectively; $V_g^* = V_g - \phi_{ms}$ where ϕ_{ms} is the work function difference between the gate electrodes and intrinsic silicon. Thus, when $V_g^* = 0$ the potential is zero everywhere in the silicon fin. We also assume that the buried oxide is thick enough:

$$\left(\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \right)_{y=-H} = 0. \quad (5)$$

Let us at first consider the one-dimensional Poisson equation along the y axis, discarding for a moment the side gates and the dependence on x . Then we have:

$$\frac{\partial^2 \phi(y)}{\partial y^2} = \frac{q}{\epsilon_{si}} n_i e^{\frac{\phi(y)}{V_T}}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big|_{y=-H} = 0, \varphi(0) = \varphi_s. \quad (7)$$

While considering sub-threshold conditions, the potential mostly follows V_g , and varies little in the silicon cross section. For our convenience, we can introduce $\varphi(y)$ as:

$$\varphi(y) = V_g^* - \varphi^*(y), \quad (8)$$

where $\varphi^*(y)$ is the variation of the potential along the cross section. In sub-threshold $\varphi^*(y)$ is smaller than the thermal voltage. We substitute (8) in (6) and approximate the exponential with the first term of Taylor's expansion:

$$\frac{\partial^2 \varphi^*(y)}{\partial y^2} = \frac{q}{\varepsilon_{si}} n_i e^{\frac{V_g^*}{V_T}} \left(1 - \frac{\varphi^*(y)}{V_T}\right). \quad (9)$$

The solution of (7) and (9) can be presented in a trigonometric form:

$$\varphi^*(y) = (\varphi_s - C) \cos\left(\frac{H+y}{b}\right) \sec\left(\frac{H}{b}\right) + C, \quad (10)$$

where $C=V_T$ and

$$b = \sqrt{\frac{C \varepsilon_{si}}{q n_i}} e^{-\frac{V_g^*}{2V_T}}. \quad (11)$$

One can expect that the 2D potential in the Fin cross section of the TG FET has the same profile in the vertical direction as (10) with the only difference that now parameters C and b are functions of x due to side gates. Therefore, we can write:

$$\varphi(x, y) = \left[\varphi_{tp}(x) + C(x) \right] \cosh\left(\frac{H+y}{b(x)}\right) \operatorname{sech}\left(\frac{H}{b(x)}\right) - C(x), \quad (12)$$

where $\varphi_{tp}(x) \equiv \varphi(x, 0)$ is the surface potential at the top interface. Equation (12) determines the potential distribution in TG SOI MOSFET in the sub-threshold regime.

Substituting (12) in BC (3), and assuming $H \gg b(x)$ we obtain:

$$b(x) = \frac{\varepsilon_{si}(\varphi_{tp}(x) + C(x))}{C_{ox_Top}[V_g^* - \varphi_{tp}(x)]}. \quad (13)$$

It is easy to see that $b(x)$ has the meaning of a screening length along the vertical direction and is proportional to the top oxide thickness. If we substitute

(12) for $y=-H$ in (1), (2), and (4), we obtain equations similar to the set of equations for the DG MOSFET [14], since close to the bottom, the first term in potential (12) is very small and the top gate is distant. We have:

$$\varphi(x, -H) \approx -C(x) = \varphi_{DG}(x) = \varphi_{DG}(0) - 2 V_T \ln \left[\cos \left(\sqrt{\frac{q^2 n_i}{2 \varepsilon_{Si} k T}} e^{\frac{\varphi_{DG}(0)}{2 V_T}} x \right) \right], \quad (14)$$

where $\varphi_{DG}(0)$ is the central potential of DG MOSFET and can be defined from BC (4) rewritten for the DG structure.

For the top surface potential we can assume the same profile as we have for the side surface potential (see eq.(10)):

$$\varphi_{tp}(x) = \varphi_{tp}(0) + a \left[\cosh \left(\frac{x}{\beta} \right) - 1 \right], \quad (15)$$

where $\varphi_{tp}(0) = \varphi(0)$ (the potential, at the point s in Fig.1), a and β are the functions of V_g^* , W , H , C_{ox_Sd} , C_{ox_Top} . Parameter a can be obtained from BC (4) as:

$$a = \frac{V_g^* - \varphi_{tp}(0)}{\cosh \left(\frac{W}{2\beta} \right) - 1 + \frac{\varepsilon_{Si}}{\beta C_{ox_Sd}} \sinh \left(\frac{W}{2\beta} \right)}. \quad (16)$$

Eq. (5) suggests writing $\varphi_{ST}(0)$ as the surface potential of DG FET for which the potential in the center is equal to $\varphi(0, -H)$:

$$\varphi_{tp}(0) = V_g^* - \frac{1}{C_{ox_Top}} \sqrt{2 \varepsilon_{Si} k T n_i} \left(e^{\frac{\varphi_{tp}(0)}{2 V_T}} - e^{\frac{\varphi(0, -H)}{2 V_T}} \right), \quad (17)$$

where

$$\varphi(0, -H) = \left(\varphi_{tp}(0) - \varphi_{DG}(0) \right) \operatorname{sech} \left(\frac{H}{b(0)} \right) + \varphi_{DG}(0). \quad (18)$$

Substituting (12) and (15) into Poisson eq. (1) and setting $y = 0$, $x = W/2$, we obtain an equation for β :

$$-\psi \left(1 + \frac{\Delta_\varphi}{V_T} + \frac{\Delta_V}{V_T \Delta_\beta} \right) + \frac{\Delta_V}{\beta^2 \Delta_\beta} + \frac{\Delta_V^2 (\Delta_\beta - 1)^2}{\left(\frac{\varepsilon_{Si}}{C_{ox_Top}} \right)^2 (\Delta_\beta^2 \Delta_\varphi + \Delta_V \Delta_\beta)} = 0, \quad (19)$$

where $\psi \equiv \frac{q}{\varepsilon_{Si}} n_i \exp \left(\frac{\varphi_{DG}(W/2)}{V_T} \right)$, $\Delta_\varphi \equiv \varphi_{tp}(0) - \varphi_{DG}(W/2)$, $\Delta_V \equiv V_g^* - \varphi_{tp}(0)$, $\Delta_\beta \equiv 1 + \frac{\varepsilon_{Si}}{\beta C_{ox_Sd}}$.

Eq. (19) is a cubic equation with respect to β , only one solution of which has physical meaning. The solution is presented in the Appendix. This procedure to substitute the approximate solution (12) into the Poisson equation (1) to define the parameter β makes the derived potential model more accurate.

Thus according to our TG FinFET model, the 2D potential in sub-threshold and near-threshold regimes is given by (12), with parameters defined from (13) - (19).

2. Strong inversion regime. At strong inversion regime, the screening of the mobile charge is so effective that the total mobile charge of TG FinFET can be computed as the sum of the charge induced on the sides of 2- DG FinFETs: a DG FET with silicon thickness W and of width H and (i.e., discarding the effect of the top gate), let's call it as "DG_{||}", plus the charge induced under the top gate computed as the half charge of a DG FET of width W and silicon thickness H (i.e., discarding the effect of the side gates), we will call it "DG₌".

The "2-DG model" will allow to use any of compact charge - based models derived for DG devices, e.g. [15], to compute the output characteristics of TG FinFET in strong inversion. Due to this "2-DG model" the drain current will be sensitive not only to side oxide variations but also to the top oxide thickness which, in general, can be different from the side oxide thickness.

Results and discussion. To validate the derived model we compare analytical calculations with 2D TCAD simulations [17]. In Fig. 2 we compare the results derived from our potential model presented in Section 2 (let us call it "TG model") with numerical simulations (NS). The potential is plotted as a function of the gate voltage for four different positions (o,s,b,d) in the Fin (indicated in Fig.1), for different values of W (16 nm and 60 nm). It is seen that the proposed potential model well works in sub-shold and in moderate inversion regimes, whereas in the strong inversion regime, the mismatch is evident since the potential in position "o" saturates and therefore (9) is not applicable. The excellent agreement between the model and NS for the potential at point "s" makes evident the accuracy of DG₌ assumption. As it was expected, in moderate inversion the highest potential is at the corner (point "d") which mainly defines the threshold voltage and is responsible for its divergence from DG case.

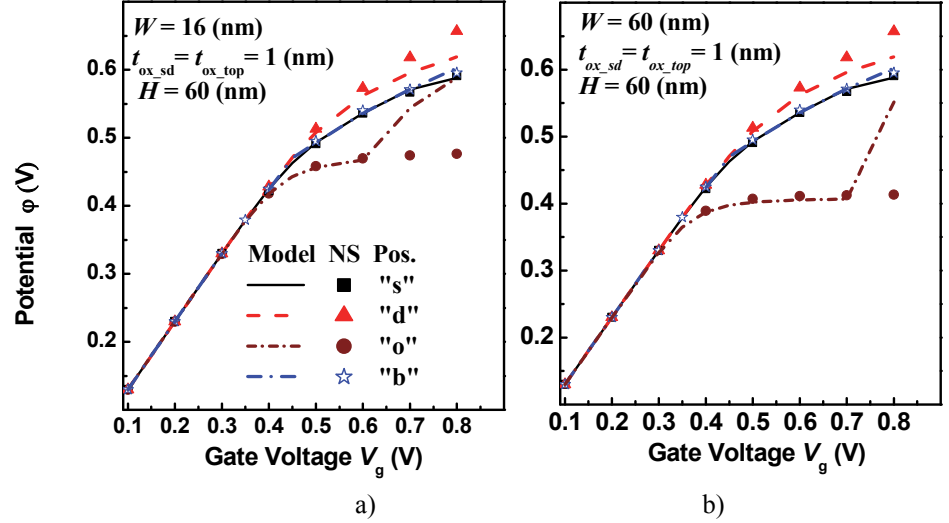


Fig. 2. Potential versus gate voltage at different points of silicon body for two structures with widths: $W=16$ nm (a) and $W=60$ nm (b)

From the TG model it is possible to extract the threshold voltage in a very precise way, for a broad range of H/W ratios and for a different side and top oxide thicknesses, as shown in Fig. 3. As can be seen, the maximal error with respect to threshold voltage calculated in the same way from numerical simulations is about 3 mV. In Fig.4 the charge calculated from these models is compared with numerical simulations for four different structures. As can be seen in Fig. 4, the TG model well predicts the charge in sub-threshold and near-threshold regimes, and therefore is good also for extracting the threshold voltage. In the linear region the drain current is proportional to the charge in the channel, and thus the threshold voltage is defined here as the gate voltage for which the third derivative of the charge as a function of the gate voltage is zero.

Up to this point we have been considering a long channel, however the simple implementation of the 2-DG model allows to use the model developed for ultra scaled DG FinFET [15] and to calculate the drain current in short TG FinFET. Due to implementation of the 2-DG model the drain current is sensitive not only to the side oxides' thickness but also to the top oxides' thickness. In Fig. 5 are illustrated the calculations for TG FinFET with 25 nm channel length and 10 nm silicon thickness and height. The analytical calculations are compared with 3D TCAD simulations performed in Sentaurus platform. As it is seen, the agreement is quite good.

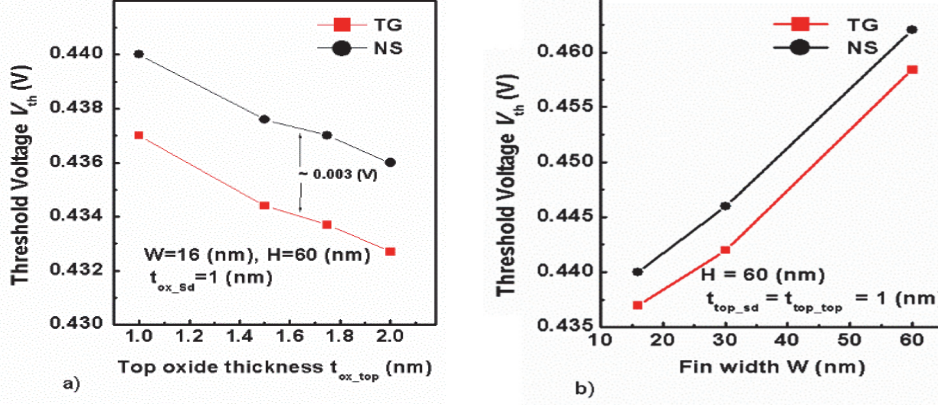


Fig. 3. Threshold voltage data calculated from TG model and numerical simulations (NS) for structures with different top oxide thickness t_{ox_top} (a) and for different silicon width W (b)

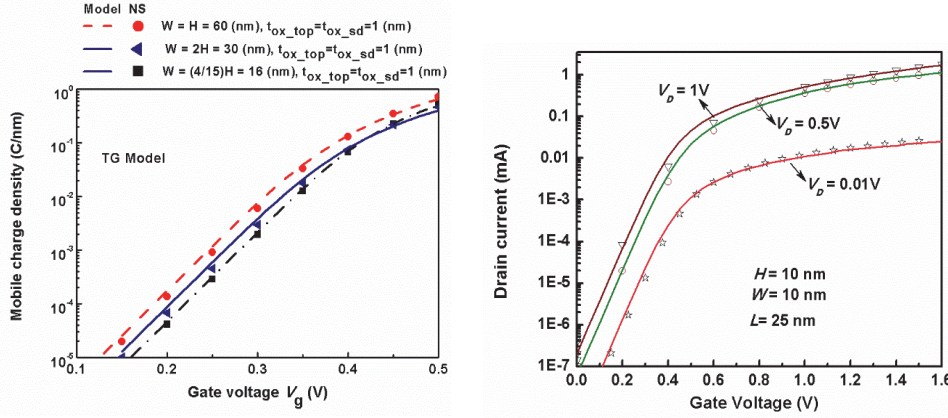


Fig.4. Mobile charge density calculated from TG model in sub-threshold and weak inversion regimes

Fig.5. Drain current calculated using 2-DG approach for 25 nm Tri-gate FinFET. Lines: analytical model, symbols: 3D numerical simulations with Sentaurus Synopsys

Conclusion. In this paper an analytical expression of two-dimensional potential in undoped TG FinFET is derived applicable in sub-threshold and in moderate inversion conditions. On the basis of the derived potential model, the threshold voltage of the device is estimated with high precision. Further, to model the charge in strong inversion, a model of 2-DG FinFETs is proposed. The proposed 2-DG model is very sensitive to the device parameters, including the top oxide thickness, and imply to extend the DG drain current model for short channel devices to TG FinFET.

Appendix

Solution of (19)

$$\frac{1}{\beta} = -\frac{B_2}{3B_3} + \frac{2^{1/3} \cdot (B_2^2 + 3B_3 \cdot B_1)}{3B_3 \cdot A_{BD}} + \frac{A_{BD}}{2^{1/3} \cdot 3B_3}, \text{ where}$$

$$A_{BD} = \left(A_B + \sqrt{-4(B_2^2 + 3B_3 \cdot B_1)^3 + A_B^2} \right)^{1/3}, \quad A_B = -2B_2^3 - 27B_3^2 D_1 - 9B_1 B_2 B_3,$$

$$D_1 = -\psi \cdot \left(1 + \frac{\Delta\varphi + \Delta V}{V_T} \right) \cdot (\Delta V + \Delta\varphi), \quad B_1 = \frac{\mathcal{E}_{Si}}{C_{ox_Top}} \psi \cdot \left(\Delta\varphi \cdot 2 \left(1 + \frac{\Delta\varphi}{V_T} \right) + \Delta V \left(1 + 2 \frac{\Delta\varphi}{V_T} \right) \right),$$

$$B_2 = -\psi \cdot \Delta\varphi \cdot \left(1 + \frac{\Delta\varphi}{V_T} \right) \cdot \left(\frac{\mathcal{E}_{Si}}{C_{ox_Sd}} \right)^2 + \Delta V \cdot \Delta\varphi + \left(\left(\frac{C_{ox_Top}}{C_{ox_Sd}} \right)^2 + 1 \right) \Delta V^2, \quad B_3 = \Delta V \cdot \Delta\varphi \cdot \frac{\mathcal{E}_{Si}}{C_{ox_Top}}.$$

REFERENCES

1. FinFET- A self-aligned double-gate MOSFET scalable beyond 20 nm / **D. Hisamoto, W. C. Lee, et al** //Trans. Electron Devices.- 2000.- V. 47.-P. 2320–2325.
2. **Colinge J-P.** Multiple-gate SOI MOSFETs //Solid-State Electron.- 2000.- V. 48.- P. 897-905.
3. Performance improvement of tall triple gate devices with strained SiN layers /**N. Collaert, A. De Keersgieter, et al** // Electron Device Lett.- 2005.-V. 26.-P. 820–822.
4. High performance fully-depleted tri-gate CMOS transistors /**B.S. Doyle, S. Datta, M. Doczy, et al** // Electron Device Lett.-2003.-V. 24.- P. 263–265.
5. **Achoyan A.Sh., Yesayan A.E., Kazaryan E.M., Petrosyan S.G.** Two-dimensional p-n junction under equilibrium conditions // Semiconductors.-2002.- V.36.-P. 903-907.
6. Threshold voltage and bulk inversion effects in nonclassical CMOS devices with undoped ultra-thin bodies / **V.P. Trivedi, J.G. Fossumand, et al** //Solid-State Electron.- 2007.- V. 51.-P. 170-178.
7. A comprehensive study of corner effects in tri-gate transistors /**M. Stadele, R.J. Luyken, et al** // Proceedings of ESSDERC.- 2004.- Leuven, 2004.- P. 165.
8. **Xiong W., Park J.W. and Colinge J.P.** Corner effect in multiple-gate SOI MOSFETs // Proceedings of IEEE International SOI Conference 2003.- Estoril, 2003.- P.111.
9. **Burenkov A., Lorenz J.** Corner effect in double and triple gate FinFets //Proceedings of ESSDERC 2003.- Estoril, 2003.- P. 135.
10. **Kloes A., Weidemann M., Goebel D. and Bosworth B.T.** Three-dimensional closed-form model for potential barrier in undoped FinFETs resulting in analytical equations for VT and sub-threshold slope //IEEE Trans. Electron Devices.- 2008.- V. 55.-P. 3467-3475.

11. 3D analytical modelling of sub-threshold characteristics in vertical multiple-gate FinFET transistors/ **R. Ritzenthaler, F. Lime, O. Faynot, et al** // Solid-State Electron.- 2011.-V. 65.-P. 94-102.
12. **Abd-El Hamid H., Guitart Kilchytska J.R., Flandre D., Iniguez B.** A 3-D analytical physically based model for the sub-threshold swing in undoped trigate FinFETs // IEEE Trans. Electron Devices.-2007.- V.54.-P. 2487-2496.
13. Analytical unified threshold voltage model of short-channel FinFETs and implementation / **N. Fasarakis, A. Tsormpatzoglou, D.H. Tassis, C.A. Dimitriadis, et al** // Solid-State Electron.-2011.- V.64.-P.34-41.
14. **Taur Y.** An analytical solution to a double-gate MOSFET with undoped body //IEEE Electron Device Letters.- 2000.-V. 21.-P. 245-247.
15. Physics-based compact model for ultra-scaled FinFETs / **A. Yesayan, F. Prégaldiny, N. Chevillon, et al** // Solid-State Electron. -2011.- V.62.-P. 165-173.
16. **Sah Ch.T.** Fundamentals of Solid-State Electronics: Solution Manual // World Scientific Pub Co Inc; 1st ed. -1996.
17. **Curatola G., Iannaccone G.** NANOTCAD2D: Two-dimensional code for the simulation of nanoelectronic devices and structures // Computational Materials Science.- 2003.-V. 28.-P. 342-352.

Institute of Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences Armenia.
The material is received 15.04.2018.

Ա.Է. ԵՄԱՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՏՈՒԿԱՅԻ ԵՎ ԵԼՔԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ SOI FinFET-ՈՒՄ

Ստացվել է անալիտիկ արտահայտություն երկչափ էլեկտրաստատիկ պոտենցիալի համար եռակի փականով SOI FinFET-ում: Ստացված լուծումը հնարավորություն է տալիս ճշգրտորեն հաշվարկել շեմային լարումը: Առաջարկված է ելքային հոսանքի հաշվարկի պարզ մոդել: Հաշվարկները կատարված են 10-60 նմ հաստությամբ և 25 նմ երկարությամբ սիլիցիումային ուղետարի համար: Անալիտիկ մոդելը համեմատվել է թվային հաշվարկների հետ, և ցույց է տրվել մոդելի բարձր ճշգրտությունը:

Առանցքային բառեր. SOI FinFET, ՄՕԿ ԴՏ, չլեզիրված ուղետար, եռակի փականով ԴՏ, շեմային լարում, պոտենցիալային մոդել:

А.Э. ЕСАЯН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ И ВЫХОДНОГО ТОКА
SOI FinFET**

Получено аналитическое выражение для двумерного электростатического потенциала в трехзатворном SOI FinFET при слабой и умеренной инверсии. Полученное решение позволяет с высокой точностью вычислить пороговое напряжение. Предлагается простая модель для расчета тока. Расчеты выполнены для каналов толщиной от 10 до 60 нм и длиной до 25 нм. Аналитическая модель проверена с помощью численного моделирования, и получена хорошая точность.

Ключевые слова: SOI FinFET, MOSFET, нелегированный канал, трехзатворный FET, пороговое напряжение, модель потенциала.

H.V. ABRAHAMYAN

A HYBRID PLANAR INVERTED-F SPIRAL ANTENNA FOR IN-BODY WIRELESS AREA NETWORKS

Nowadays, in hyperthermia and biotelemetry, antennas implanted in a human are widely used. A number of numerical analyses and measurement setups should be evaluated in order to make practical use of antennas inside a human body, the resonance characteristics of the implanted antennas and their radiation signature outside the body. What most important is: antennas should be designed with an in-depth consideration given to its surrounding environment. A wireless body area network (WBAN) consists of nodes that communicate wirelessly and are located on or in the body of a person. One should have a good command of propagation loss within a human body for the development of WBAN for implants within a human body. The human body is a lossy medium hence a considerable attenuation of the waves, traveling from the transmitter to the receiver takes place.

In this paper, a hybrid planar inverted-F spiral antenna of $8 \times 8 \times 3 \text{ mm}^3$ is presented for the in-body operation in the 402...405 MHz Medical Implant Communication Service band. The antenna has a two-layer structure, involving a substrate and a superstrate. For reasons of compatibility with the human body, it is covered with a biocompatible silicon layer. When operating in-body, the proposed antenna has about 50 MHz bandwidth when the return loss (parametr S_{11}) is -10 dB. The simulated return loss is about -42 dB at 403 MHz. The calculations are employed in a three-layer model for the human tissues involved. A prototype was fabricated and measured.

Keywords: Wireless Body Area Network, telemetry system, implantable antenna, Archimedean spiral antenna, planar-inverted F antenna (PIFA), CST Microwave Studio.

Introduction. The concept of Wireless Body Area Networks (WBAN) involves modern technology that is promising in bringing health care into quite a new level of personalization. WBAN systems can easily be installed in medical environments. A WBAN consists of nodes that communicate wirelessly and can be located on or in the body of a person [1]. It helps doctors to get data on a patient's physiological state, such as temperature, blood pressure, and cardiac rate [2,3]. These physiological data are transferred to remote stations through medical gateway wireless boards. The gateway nodes are usually connected to the sensor nodes in the local area network.

It is crucial to understand that this high data rate technology has to be low power, on the one hand because of the possible close proximity to the body, which yields exposure issues, on the other hand, because of the limited battery power available.

There are two possible antenna environments in WBANs: in-body and on-body [4,5]. The in-body systems are especially challenging for several reasons.

First, the antenna should be designed, taking into consideration the properties of the body tissue. Factors such as high tissue conductivity, impedance matching, low power requirements, and biocompatibility play an important role in the design [6]. Second, the implanted sensor must be able to communicate with equipment external to the body. This means that the loss in the “body” channel becomes really crucial. Third, the implanted device should be small, thus the device must have an integrated antenna.

Some in-body antennas for the MICS band (402...405 MHz) have been investigated in [7-10]. In these studies, the characteristics of the antennas, such as input impedance, radiation pattern, and Septic Absorption Rate (SAR) around the antenna are presented. However, the antennas in these papers are still rather large, creating problems when they have to be implanted into the human body. For example, [7] proposes a rather large PIFA to be combined with a cardiac pacemaker for use in a MITS (Medical Implant Telemetry System). In [8], spiral and planar inverted-F (PIFA) antennas are presented. A six-layer model has been used (brain, CSF, Dura, bone, fat, and skin) in the simulations. The size of the spiral is $40\text{ mm} \times 32\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, and the size of the PIFA is $32\text{ mm} \times 24\text{ mm} \times 8\text{ mm}$. This is still quite large. In [9], a dual band serpentine antenna, operating both in the MICS and ISM frequency bands is presented. The antenna is to be implanted under the skin. Its size is $22.5\text{ mm} \times 22.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$. The realized gain of the antenna is -30 dB for a human skin thickness of 4 mm . In [10], two types of antennae, a spiral and a serpentine, are presented. Both antennae are of the size $26.6\text{ mm} \times 16.8\text{ mm} \times 6\text{ mm}$. For a depth of 14 mm below the skin surface, the realized gains are -35 dB and -43 dB , respectively. Although there are also proposals for smaller implantable antennas, they are designed for the higher frequency bands [11-21]. An overview of the state-of-the-art on implantable antennae, together with their main characteristics, is given in Table 1.

Antenna design. The new type of Hybrid Planar Inverted-F Spiral Antenna for the MICS frequency band is presented in Fig. 1. It is based on a 2-arm Archimedean spiral antenna. This antenna type is widely used for its low profile, high efficiency, circular polarization, stable impedance characteristics, and very broad band [22,23]. One of the arms is an active element, fed by a probe, and the other arm is passive. The passive element is connected to the ground with a shorting pin. This feature is the same as in a Planar Inverted-F Antenna (PIFA). In order to guarantee biocompatibility, the Rogers RO3210 ($\epsilon_r = 10.2$) material with 1.5 mm thickness has been used. The width of the microstrip line is 0.2 mm . The maximum radius of the active element $r_{acmax} = 3.45\text{ mm}$ and minimum radius is $r_{acmin} = 1.73\text{ mm}$. The maximum radius of the passive element is $r_{psmax} = 2.2\text{ mm}$, and the minimum radius is $r_{psmin} = 0.85\text{ mm}$. The overall size of the antenna is $8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$.

Table 1

Overview of the state-of-the-art on implantable antennas

Reference	Antenna type	Scope of action (S-simulation, M-measurement)	Substrate and Superstrate materials name and permittivity	Realized Gain (dB)	Depth (mm) Tissue	Bandwidth (GHz)	Min. Refl. (dB)	Pol.	Size (mm ³)	Size/ λ_0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[7]	Planar Inverted F	S	$\varepsilon_r = 10.0$	-30.5	15mm/muscle	0.402...0.405	-40.1	Linear	39x30x9	0.053
[8]	Planar Inverted F	S and M	$\varepsilon_r = 10.2$		-----	0.402...0.405	-18	Linear	32x24x8	0.043
	Spiral	S	$\varepsilon_r = 10.2$		-----	0.402...0.405	-16	Ellipt.	40x32x8	0.054
[9]	Serpentine patch	S and M	Rogers RO3210, $\varepsilon_r = 10.2$	-30	4mm/skin	0.402...0.405	-20	Linear	22.5x22.5x2.5	0.03
[10]	Microstrip Spiral	S and M	Macor, $\varepsilon_r = 3.1$	-35	14mm/muscle	0.402...0.405	-24	Ellipt.	26.6x16.8x6	0.036
	Microstrip Serpentine	S and M	Macor, $\varepsilon_r = 3.1$	-43	14mm/muscle	0.402...0.405	-13	Linear	26.6x16.8x6	0.036
[11]	Planar Antenna	S	$\varepsilon_r = 10.2$	-15	-----	5...10	-15	Linear	9x6x2.7	0.225
[12]	Folded Dipole Wire	S and M	Glass coating, $\varepsilon_r = 5.0$	-23.5	2mm/skin	0.951...0.956	-18	Linear	20.3x0.8x0.8	0.064
[13]	Rectangular patch	S	FR-4 (Glass Epoxy Laminates)	-35	10mm/breast	4.11...12	-10	Linear	20x10x1.5	0.67
[14]	Planar dipole	S and M	-----	-----	-----	3.1...10.6	-11	Linear	31x21.6x1.27	1.03

Continue of Table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[15]	Slot Dipole Conformal	S and M	Copper, Nickel, Polyimide, PDMS (Polydimethylsiloxan)	-24	----	2,4...2,4835	-18	Linear	25.9x8.5x2.5	0.216
[16]	Spiral	S	Quartz	----	----	2.45±0.05	-16	Ellipt.	4x2.5x1.1	0.03
[17]	Cavity Slot	S and M	$\epsilon_r = 2.17$	-26.5	4mm/skin	2.45±0.05	-52.77	Linear	4x2.8x1.6	0.03
[18]	Patch		Rogers RT6002	-46.5	8mm/skin and fat	31.5±0.315	-30	Linear	6x5.68x0.254	0.63
[19]	Cavity Slot	S	----	-24	4mm/skin	2.45±0.05	-53.25	Linear	8.4x3.2x2.8	0.07
[20]	Loop Antenna	S	Rogers 6010	-20	----	3.1...10.6	-10	Linear	10x7.5x1.091	0.23
[21]	Teardrop Antenna	S	----	-40	8mm/muscle	3.1...10.6	-10	----	7.5x2.4x2.4	0.172
	Hybrid Planar Inverted-F Spiral Antenna	S and M	Rogers RO3210, $\epsilon_r = 10.2$	-42	26 mm/muscle, fat and skin	0.402...0.405	-40	Linear	8x8x3	0.011

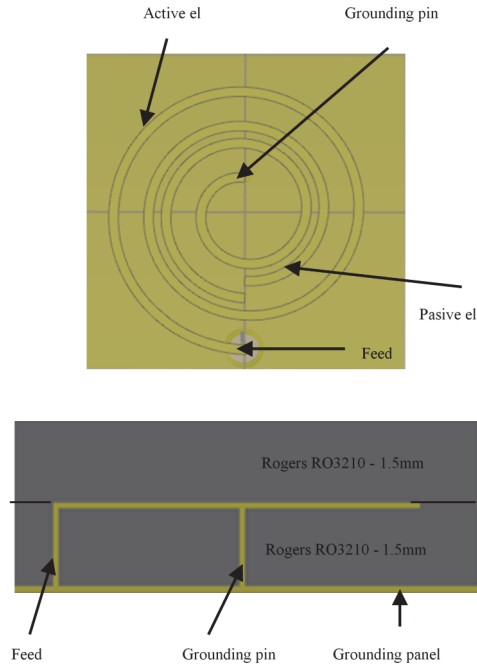


Fig. 1. Topology of Hybrid Planar Inverted-F Spiral Antenna

Characteristics of the antenna in the body. It is clear that the antenna parameters have to be evaluated in the presence of the human tissue. Therefore, during the design, a three layer human model was used [7]. In this model, the antenna is inserted into a layer of muscle covered with fat and skin, like in the human body, see Fig. 2.

Table 2

The dielectric permittivities and conductivities of tissues

Material	ϵ_r	σ
Skin	46.68	0.64 S/m
Fat	5.028	0.045 S/m
Muscle	42.8	0.65 S/m

The thicknesses of the tissues are: skin 2 mm, fat 2 mm, and muscle 30 mm. The S11 results of the antenna embedded within the three-layer model are presented in Fig. 3. The dielectric permittivities and conductivities of tissues are shown in Table 2 for 433 MHz [24].

Simulations have been done with CST Microwave Studio. As seen from Fig. 3, the -10 dB bandwidth is about 50 MHz (400...450 MHz). Fig. 4 shows the

simulated gain (a) and radiation pattern (b) at 403 MHz. The simulated realized gain at a depth of 26 mm is -41.4 dB at 403 MHz.

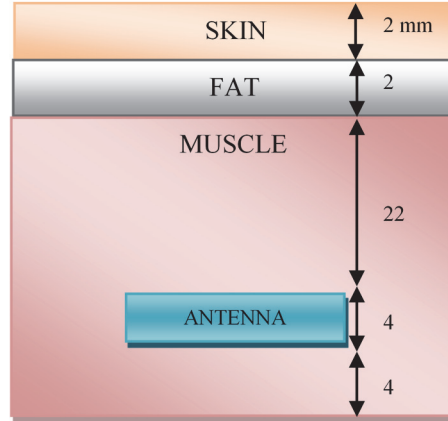


Fig. 2. Three-layer model for human tissue

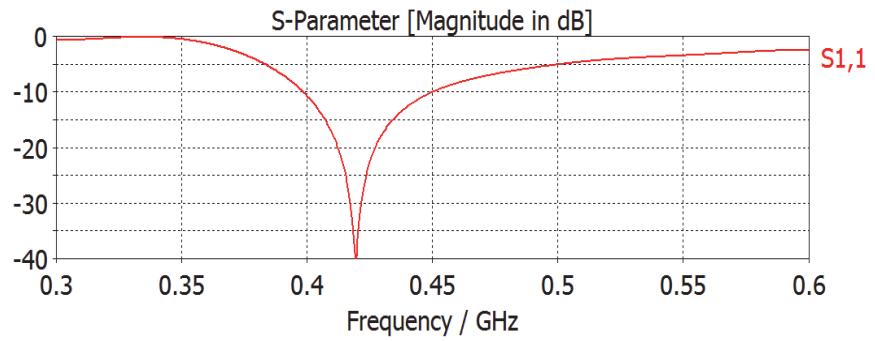
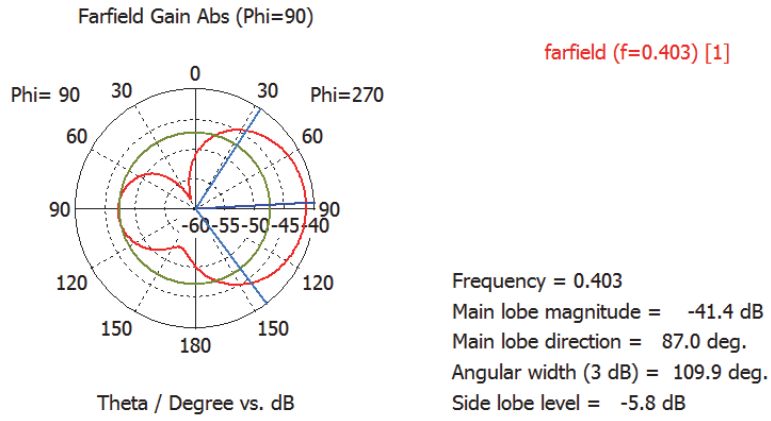
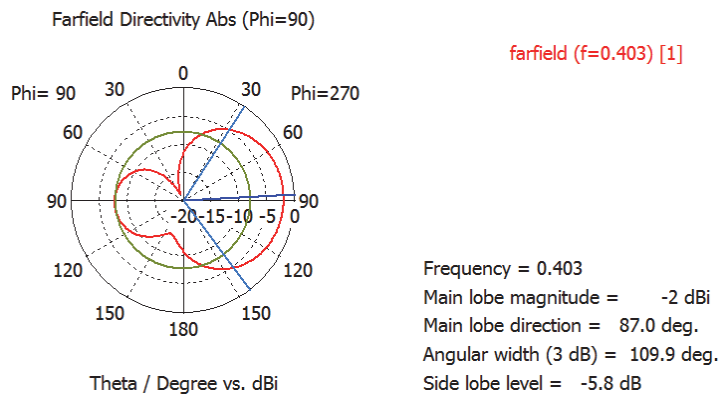


Fig. 3. Simulated S_{11} with three-layer model for the human tissue

Analyzing the results in Table 1 with the parameters of implantable antennae, it becomes evidently clear that there are a number of advantages. As a main requirement and advantage can be mentioned its small size: the antennae designed for 402...405 MHz frequency band have relatively big sizes, in the case when our antenna size is 8x8x3 mm. The simulation was made in a human tissue with 26 mm depth (muscle fat skin), in this case the antenna's S_{11} parameter is 40 dB (Voltage Standing Wave Ratio- VSWR =1.02).



a)



b)

Fig. 4. Realized gain (a) and radiation pattern (b)

Experimental results. The proposed antenna has been manufactured (see Fig. 5), and was measured in different environments in order to inspect its performance. As the antenna is not envisaged to work in an anechoic environment, no measurements were implemented in an anechoic environment.

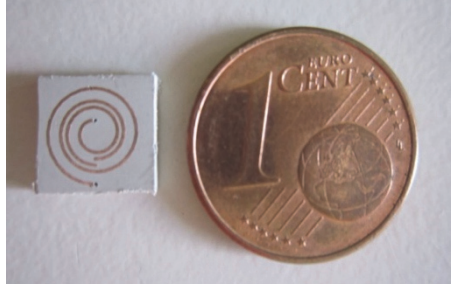


Fig. 5. Top side view of the Hybrid Planar Inverted-F Spiral Antenna

The return loss (parametr S_{11}) simulated and measured in free space is revealed in Fig. 6 (a). The agreement of the results validates the correctness of fabrication. Since the body tissue is removed from the model, a strong resonance appears at 1.895 GHz and 1.956 GHz in simulation and measurement, respectively. This small difference is due to a) the small tolerances during fabrication, b) the small inaccuracy of the measurement equipment (an HP 8510C), but mainly c) the influence of the testing cables since the antenna is extremely small compared with the wavelength.

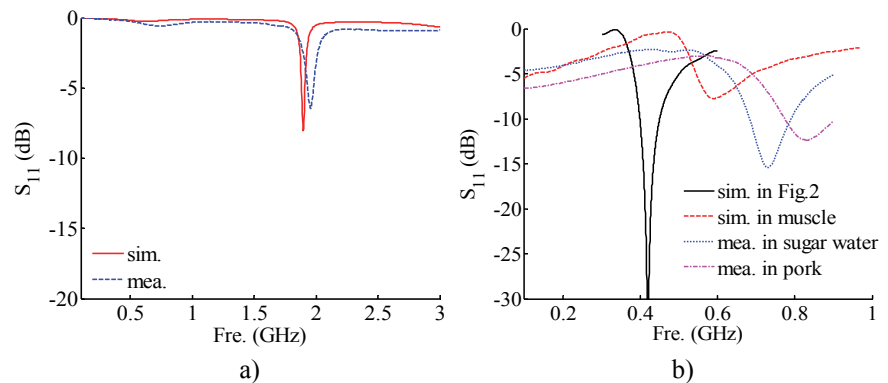


Fig. 6. Simulated and measured reflection coefficient, (a) in free space, (b) in several environments mimicking the body

After the free space measurements, the antenna was measured in two environments that aim at mimicking human tissue (see Fig. 6b). The first one consists of sugar water with the antenna encapsulated in a small plastic bag. A disposable cup with about 150 mL sugar water was used and the antenna was placed 3 cm below the surface of the water. A strong resonance appears at 730 MHz in the measurement. The second environment is a piece of pork with size ca. $5 \times 5 \times 5\text{ cm}^3$ with the antenna located in the center. In this situation, the antenna shows a resonance at about 820 MHz .

The differences between the measured results and the simulated results in Fig. 6b are mainly caused by the fact that it is very difficult to construct a meat muscle that will have exactly the same material parameters as the human body. It is known that it is often not possible to realize a measurement in a real human tissue. That is why, during the measurement period, the used phantom models consider organic materials equivalent to the human tissue, also using a liquid of water sugar, water salt, etc. [9-12,17].

The last measurement was the transmission between the proposed spiral antenna and a reference dipole antenna. The measurement setup is shown in Fig. 7(a), and the results are shown in Fig. 7(b). The environments were the same as before: sugar water and a piece of pork. The reference dipole antenna was placed about 40 cm away in the horizontal polarization.

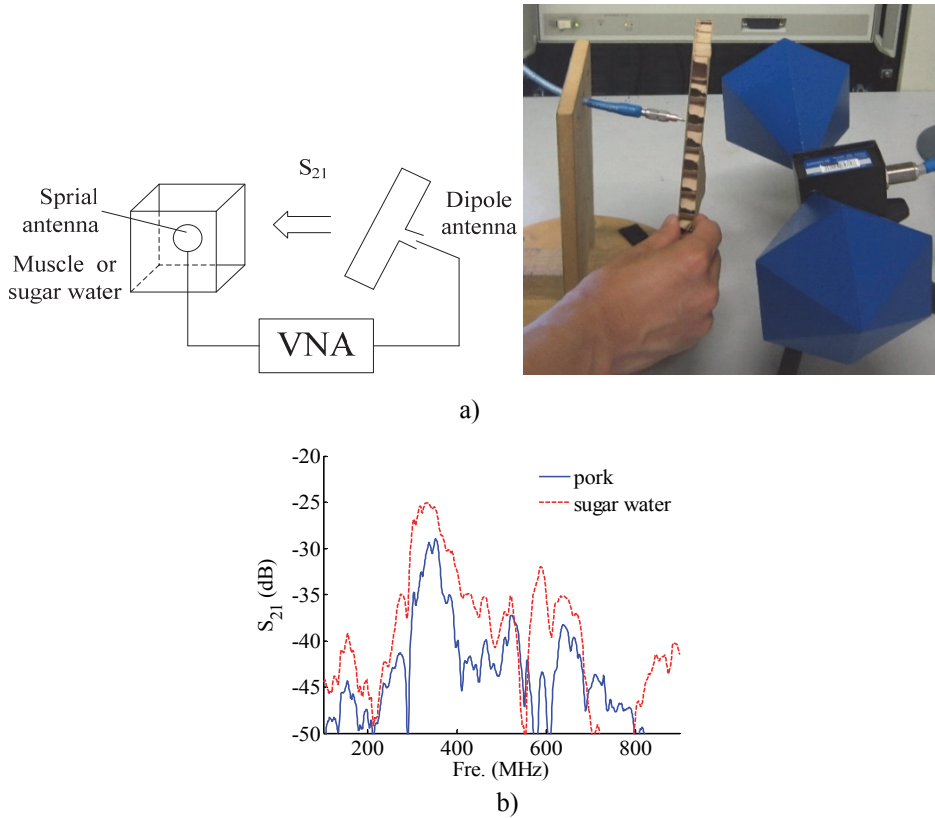


Fig. 7. Transmission measurement, (a) measurement setup, (b) the measured result

The maximum transmission coefficient (S_{21}) is -25 dB for the sugar water and -29 dB for the pork around the operating frequency. Although the path loss is highly due to the loss in the environment, it is clear that the proposed antenna can still communicate with the dipole antenna.

Conclusion. In this paper, we have presented a hybrid planar inverted-F spiral antenna. The proposed antenna can be easily used in-body within the framework of a WBAN medical telemetry system, because of its small size ($8\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 3\text{ mm}$). The characteristics of the proposed antenna have been investigated in a three-layer human tissue model (muscle, fat and skin). The bandwidth is 50 MHz (400...450 MHz).

Acknowledgment. This research was implemented in the frames of the postdoctoral research program supported by Erasmus Mundus Alrakis fellowship. We thank our colleagues Prof. Guy Vandenbosch and PhD researcher Sen Yan from Katholieke Universiteit Leuven (Belgium) who provided insight and expertise that greatly assisted the research.

REFERENCES

1. BAN-body area network for wearable computing/ **J. Bernardhard, P. Nagel, J. Hupp, et al** // 9th Wireless World Research Forum Meeting.- Zurich, Switzerland, July 2003.- P.107-113.
2. **Alomainy A.** Antennas and Radio Propagation for Body Centric Wireless Networks: PhD Thesis.- Queen Mary University, London, UK, May 2007.
3. Ultra-wide-band transmitter for low-power wireless body area networks: Design and evaluation / **J. Ryckaert, C. Desset, A. Fort, et al** // IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers.- Dec. 2005.- Vol. 52, 12.-P. 2515–2525.-P.23-30.
4. **Fort A., Desset C., Ryckaert J., De Doncker P.** Characterization of the Ultra Wideband Body Area Propagation Channel // 2005 IEEE International Conf. On Ultra-Wideband, Sept. 5-8. - Zurich, Switzerland, 2005.-P 187-194.
5. Antenna Independent Path Loss Model for In-Body Communication in Homogeneous Tissue / **Divya Kurup, Wout Joseph, Emmeric Tanghe, et al** // 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP).- 2011.-P. 41-47.
6. **Lee C.M., Yo T.C., Huang F.J., Luo C.H.** Bandwidth Enhancement of Planar Inverted-F Antenna for Implantable Biotelemetry // Microwave and Opt. Tech. Lett.- Mar. 2009.- Vol. 51, n. 3.-P. 749-751.
7. **Tamotsu Houzen, Masaharu Takahashi, Koichi Ito.** Implanted Antenna for an Artificial Cardiac Pacemaker System // Progress In Electromagnetics Research Symposium, August 27-30, 2007.- Prague, Czech Republic, 2007. -P. 51-54.
8. **Kim J. and Rahmat-Samii Y.** Implanted antennas inside a human body: simulations, designs, and characterizations // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.- 2004. - Vol. 52, no. 8, part 2.-P. 1934–1943.
9. **Tutku Karacolak, Aaron Z. Hood, Erdem Topsakal.** Design of a Dual-Band Implantable Antenna and Development of Skin Mimicking Gels for Continuous Glucose Monitoring // IEEE Trans. Antennas and Propagation. - April 2008. - Vol. 56, No 4. -P. 1001-1008.

10. **Pichitpong Soontornpipit, Cynthia M. Furse, You Chung Chung.** Design of Implantable Microstrip Antenna for Communication With Medical Implants // IEEE Trans. Microwave Theory and Technidues. - August 2004. - Vol. 52, No. 8. - P.1944-1951.
11. A wideband planar antenna for in-body imaging / **R. Nilavalan, J. Leendertz, A. Preece, et al** // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1 July 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). - Washington, United States, 2005. – Vol. 1B.-P. 848 – 851.
12. **Ho-Yu Lin, Masaharu Takahashi, Kazuyuki Saito, Koichi Ito.** Fellow Performance of Implantable Folded Dipole Antenna for In-Body Wireless Communication // IEEE Trans. Antennas and Propagation. - March 2013. –Vol. 61, no. 3. -P. 1363-1370.
13. **Eesuola B., Chen Y., Tian G.Y.** Novel Ultra-Wideband Antennas for In-Body Wireless Communication and Medical Imaging Applications // European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). - 2011. -P.3129-3132.
14. **Hassan Ghannoum, Christophe Roblin, Serge Bories** UWB Antennas in Body Area Networks // Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials: 2006 IEEE International Workshop. - March 6-8, 2006. -P. 136-139.
15. Design of an Implantable Slot Dipole Conformal Flexible Antenna for Biomedical Applications / **Maria Lucia Scarpello, Divya Kurup, Hendrik Rogier, et al** // IEEE Trans. Antennas and Propagation. -October 2011. -Vol. 59, No 10. -P. 3556-3564.
16. Human implanted spiral antenna for a 2.45 GHz wireless temperature and pressure SAW sensor system / **G. Collin, A. Chami, C. Luxey, et al** // IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation. - San Diego, CA, Jul. 2008. - P. 112-118.
17. **Wei Xia, Kazuyuki Saito, Masaharu Takahashi, Koichi Ito.** Performances of an Implanted Cavity Slot Antenna Embedded in the Human Arm // IEEE Trans. Antennas and Propagation. -April 2009. -Vol. 57, No 4. -P. 894-899.
18. **Yasir Ahmed, Yang Hao, Clive Parini** A 31.5 GHz Patch Antenna Design for Medical Implants // International Journal of Antennas and Propagation. -2008. –Vol. 2. -P 256-261.
19. **Hiroki Usui, Masaharu Takahashi, Koichi Ito.** Radiation Characteristics of an Implanted Cavity Slot Antenna into the human body // IEEE Antennas and Propagation Society.-2006.-P. 1095-1098.
20. **Kamya Yekeh Yazdandoost.** UWB Loop Antenna for In-Body Wireless Body Area Network // 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).- April 2013. - P.1138-1141.
21. **Markus Grimm and Dirk Manteuffel.** Antennas and Propagation for On-, Off- In-Body Communications // Ultra-Wideband Radio Technologies for Communications, Localization and Sensor Applications / Rainer S. Thomä (Ed.). ISBN: 978-953-51-0936-5, InTech, DOI: 10.5772/55080. -2013.-Chapter 7. -P. 153-164.
22. **Balanis Constantine A.** Antenna Theory, Analysis and Design. - 3th edition Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.- 1073 p.

23. **Dominikus J. Müller, Kamal Sarabandi.** Design and Analysis of a 3-Arm Spiral Antenna // IEEE Trans. Antennas and Propagation.- February 2007.-Vol. 55, No 2.-2007.-P. 258-266.
24. **Komarov Vyacheslav V.** Handbook of Dielectric and Thermal Properties of Materials at Microwave Frequencies.-Artech House, 2012. - 169 p.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 31.05.2018.

Հ.Վ. ԱՐԲՈՒՅԱՆ

F ՏԻՊԻ ԻՆՎԵՐՍՄԱՍԲ ՄԻԿՐՈՇԵՐՏԱՎՈՐ ՀԻԲՐԻԴԱՅԻՆ ՊԱՐՈՒՐԱԶԵՎ ԱՆՏԵՆԱ ՀԵՌԱԲԺՇԿԱԿԱՆ ԱՆԼԱՐ ՑԱՆՑԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Ներկայումս հեռաբաժնային համակարգերում լայնորեն կիրառվում են մարդու օրգանիզմում տեղադրվող իմպլանտային սարքավորումները: Տվյալների հաղորդման համար այդ սարքավորումների բաղկացուցիչ մաս են կազմում իմպլանտային անտենաները: Կատարվել են մարդու մարմնի ներսում իմպլանտային անտենաների գործնական կիրառության համար մի շարք թվային վերլուծություններ և չափումներ, ինչպիսին է, օրինակ, ազատ տարածությունում իմպլանտային անտենաների ռեզոնանսային բնութագրերի և ճառագայթման հաճախականության ճշգրտումը: Ցույց է տրվել, որ իմպլանտային անտենաները պետք է նախագծել՝ հաշվի առնելով շրջակա միջավայրի բնութագրերը: Հեռաբաժնային անլար ցանցում (WBAN) իմպլանտային սարքավորումները, որոնք գտնվում են մարդու մարմնի վրա կամ մարմնի ներսում, հեռահար տվյալներ են փոխանցում: Մարդու մարմնի ներսում իմպլանտային անտենաների նախագծման համար անհրաժեշտ է ունենալ հիմնավոր գիտելիքներ մարդու օրգանիզմում ճառագայթի տարածման կորստի վերաբերյալ: Մարդու մարմնի կորստային միջավայր է, հետևաբար՝ տեղի են ունենում հաղորդչից դեպի ընդունիչ անցնող ազդանշանի զգալի մարումներ:

Ներկայացվել է մարդու մարմնում տեղադրվող բժշկական իմպլանտների կապի ծառայության (MICS) հաճախականային տիրույթի (402...405 $U\dot{z}$ g), $8 \times 8 \times 3$ $մմ^3$ չափսերով F տիպի ինվերսմամբ միկրոշերտավոր հիբրիդային պարուրած անտենա: Իմպլանտային անտենան երկշերտ է՝ բաղկացած ենթաշերտից և հիմնական շերտից: Մարդու օրգանի հետ կենսական համատեղելիության ապահովման նպատակով այն պատված է կենսահամատեղելի սիլիկոնային շերտով: Մարմնի ներսում տեղադրելու դեպքում առաջարկվող իմպլանտային անտենան, մինչև -10 $դԲ$ անդրադարձման գործակցի (անտենայի S₁₁ բնութագիրը) դեպքում, ունի մոտ 50 $U\dot{z}$ g հաճախականային թողարկման շերտ: Անտենայի անդրադարձման գործակցը -42 $դԲ$ է՝ 403 $U\dot{z}$ g հաճախականության դեպքում: Հաշվարկները կատարվել են մարդու հյուսվածքների համար նախատեսված եռաշերտ մոդելով: Իմպլանտային անտենան մոդելավորվել է CST Microwave Studio մոդելավորման ծրագրով, պատրաստվել է, և կատարվել են չափումներ:

Առանցքային բառեր. հեռաբաժնային անլար ցանց (WBAN), հեռաբաժնային համակարգ, իմպլանտային անտենա, արբիմեդյան պարուրած անտենա, F տիպի ինվերսմամբ միկրոշերտավոր անտենա (PIFA), CST Microwave Studio:

Г.В. АБРААМЯН

**МИКРОПОЛОСКОВАЯ ГИБРИДНАЯ СПИРАЛЬНАЯ АНТЕННА
ИНВЕРТИРОВАННОГО ТИПА F ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ
ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ**

В настоящее время импланты широко используются в гипертермии и биотелеметрии. Имплантированная антенна является неотъемлемой частью этих устройств для передачи данных. С целью практического использования антенн внутри человеческого тела проведена оценка ряда численных анализов и измерительных устройств, например, резонансных характеристик имплантированных антенн и спецификации частоты излучения вне тела. Показано, что антенны в первую очередь должны быть спроектированы с учетом окружающей среды. Сеть беспроводной сети (WBAN) состоит из узлов, которые передают информацию по беспроводной сети и расположены на теле человека или в нем. Чтобы спроектировать имплантированную антенну WBAN внутри человеческого тела, необходимо иметь представление о потере радиации в организме человека. Человеческое тело представляет собой среду с потерями, поэтому происходит значительное ослабление волн, проходящих от передатчика к приемнику.

Представлена микрополосковая гибридная инвертированная антенна F типа диапазона частот 402...405 МГц с медицинским имплантатом (MICS) размерами 8 x 8 x 3 мм³. Антенна имеет двухслойную структуру, состоящую из подложки и главного слоя. Для обеспечения жизненно важной совместимости с человеческим телом антенна покрыта биосовместимым силиконовым слоем. Предлагаемая имплантированная антенна при вставке внутри тела имеет полосу частот около 50 МГц в случае потери коэффициента отражения до -10 дБ (параметр S_{11}). Коэффициент отражения антенны -42 дБ на частоте 403 МГц. В расчетах использована трехслойная модель для задействованных тканей человека. Изготовлен и измерен прототип микрополосковой гибридной инвертированной антенны F типа.

Ключевые слова: беспроводная телемедицинская сеть (WBAN), телемедицинская система, имплантированная антенна, архимическая спиральная антенна, инвертируемая микрополосковая антенна F типа (PIFA), CST Microwave Studio.

УДК 621.52+511.52

АВТОМАТИЗАЦИЯ И
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

С.О. СИМОНЯН, М.А. АДАМЯН

**СОПРЯЖЕННЫЕ АНАЛОГИ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ
РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ
КОНЕЧНЫХ УРАВНЕНИЙ**

Предложены аналитический, а также численно-аналитические прямой и декомпозиционный сопряженные аналоги метода наименьших квадратов для решения линейных однопараметрических систем конечных уравнений. Рассмотрено решение одного модельного примера – некорректной задачи предложенными численно-аналитическими методами.

Ключевые слова: линейные однопараметрические системы конечных уравнений (ЛОСКУ), метод наименьших квадратов, сопряженные аналоги метода наименьших квадратов, модельный пример.

Введение. На основе дифференциально-тейлоровских преобразований [1] и матрично-векторных представлений в работе [2] предложен метод решения ЛОСКУ. Полученные в [2] научно-практические результаты были перепечатаны в [3]. В работе [4] проведен сравнительный анализ ряда методов решения ЛОСКУ – методов замороженных коэффициентов (МЗК), метода приравнивания коэффициентов (МПК), дифференциально-тейлоровской матрично-векторной модели (ДТ-МВМ) и предложенной в ней дифференциально-падеевской матрично-векторной модели (ДП-МВМ). В [5] предложены конструктивные декомпозиционные аналитические матрично-блочные методы определения решений некорректных ЛОСКУ с комплексными матрицами, в [6] – численно-аналитические декомпозиционные методы решения некорректных ЛОСКУ с комплексными матрицами. Разработке конструктивных декомпозиционных аналитических и численно-аналитических матрично-векторных методов решения ЛОСКУ с комплексными матрицами посвящена работа [7]. Работа [8] посвящена разработке спектрального, декомпозиционных аналитического и численно-аналитического методов решения ЛОСКУ. В настоящей работе предлагаются сопряженные аналоги метода наименьших квадратов для решения ЛОСКУ.

Аналитическое решение. Пусть задана линейная однопараметрическая система конечных уравнений

$$\underset{m \times n}{A(t)} \cdot \underset{n \times 1}{X(t)} = \underset{m \times 1}{a(t)} \quad (1)$$

с достаточно гладкими элементами матрицы системы $A(t)$, свободного члена $a(t)$ и неизвестного вектора $X(t)$, подлежащего определению.

Применение метода наименьших квадратов [1]

$$(\varepsilon^T(t), \varepsilon(t)) = (A(t) \cdot X(t) - a(t))^T \cdot (A(t) \cdot X(t) - a(t)) \rightarrow \min_{X(t)} \quad (2)$$

для решения системы (1) приводит к эквивалентной ей задаче

$$A^T(t) \cdot A(t) \cdot X(t) = A^T(t) \cdot a(t) \quad (3)$$

(что, очевидно, следует и из (1)) с дальнейшими представлениями

$$X(t) = A^+(t) \cdot a(t) \quad (4)$$

при некорректных задачах (1) ($m \neq n$) и

$$X(t) = A^{-1}(t) \cdot a(t) \quad (5)$$

при корректных задачах (1) ($m=n$), где $A^+(t)$ - обобщенная обратная к $A(t)$ матрица, а $A^{-1}(t)$ - обычная обратная матрица.

Теперь, как наиболее общий случай, по аналогии с (3), рассмотрим представление

$$\underset{n \times m}{A^*(t)} \cdot \underset{m \times n}{A(t)} \cdot \underset{n \times 1}{X(t)} = \underset{n \times m}{A^*(t)} \cdot \underset{m \times 1}{a(t)} \Leftrightarrow \underset{n \times n}{B(t)} \cdot \underset{n \times 1}{X(t)} = \underset{n \times 1}{b(t)}, \quad (6)$$

где $A^*(t)$ - сопряженная к $A(t)$ матрица. Отсюда, естественно, следует (прямой подход), что

$$X(t) = B^{-1}(t) \cdot b(t). \quad (7)$$

Теперь (декомпозиционный подход), допустив, что $A(t)$, $A^*(t)$, $a(t)$ и $X(t)$ обладают комплексными элементами, т.е.

$$A(t) = A_1(t) + j \cdot A_2(t), \quad (8)$$

$$A^*(t) = [A_1(t) + j \cdot A_2(t)]^* = A_1^T(t) - j \cdot A_2^T(t), \quad (9)$$

$$a(t) = a_1(t) + j \cdot a_2(t), \quad (10)$$

$$X(t) = X_1(t) + j \cdot X_2(t), \quad (11)$$

из (6) получим

$$\begin{aligned} & A_1^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_1(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_1(t) - A_1^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_2(t) + \\ & + A_2^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_2(t) + j \cdot (A_1^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_2(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_2(t) + \\ & + A_1^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_1(t) - A_2^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_1(t)) = A_1^T(t) \cdot a_1(t) + \\ & + A_2^T(t) \cdot a_2(t) + j \cdot (A_1^T(t) \cdot a_2(t) - A_2^T(t) \cdot a_1(t)). \end{aligned} \quad (12)$$

Сопоставление действительной и мнимой частей последнего соотношения приводит к следующей системе второго порядка с неизвестными векторами-столбцами $X_1(t)$ и $X_2(t)$ с размерами $n \times 1$:

$$\begin{cases} A_1^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_1(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_1(t) - A_1^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_2(t) + \\ + A_2^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_2(t) = A_1^T(t) \cdot a_1(t) + A_2^T(t) \cdot a_2(t), \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} A_1^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_2(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_2(t) + A_1^T(t) \cdot A_2(t) \cdot X_1(t) - \\ - A_2^T(t) \cdot A_1(t) \cdot X_1(t) = A_1^T(t) \cdot a_2(t) - A_2^T(t) \cdot a_1(t). \end{cases} \quad (14)$$

Эту систему можно представить в следующем матрично-векторном виде:

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{c|c} A_1^T(t) \cdot A_1(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t) & -A_1^T(t) \cdot A_2(t) + A_2^T(t) \cdot A_1(t) \\ \hline A_1^T(t) \cdot A_2(t) - A_2^T(t) \cdot A_1(t) & A_1^T(t) \cdot A_1(t) + A_2^T(t) \cdot A_2(t) \end{array} \right] \cdot \begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{pmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} A_1^T(t) & A_2^T(t) \\ -A_2^T(t) & A_1^T(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (15)$$

или в более компактной записи:

$$\begin{bmatrix} A_1^T(t) & A_2^T(t) \\ -A_2^T(t) & A_1^T(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2m} \cdot \begin{bmatrix} A_1(t) & -A_2(t) \\ A_2(t) & A_1(t) \end{bmatrix}_{2m \times 2n} \cdot \begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{pmatrix}_{2n \times 1} = \begin{bmatrix} A_1^T(t) & A_2^T(t) \\ -A_2^T(t) & A_1^T(t) \end{bmatrix}_{2n \times 2m} \cdot \begin{pmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \end{pmatrix}_{2m \times 1}. \quad (16)$$

Таким образом, в общем случае некорректная система (1) ($m \neq n$), обладающая наилучшим, однако приближенным решением (4), обусловленная использованием обобщенной обратной матрицы $A^+(t)$, в результате цепочки эквивалентных преобразований (6), (12)-(15) с учетом соотношений (8)-(11) сведена к корректной системе (16) с квадратной матрицей порядка $2n$, обладающей решением

$$\begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{pmatrix} = \left[\begin{bmatrix} A_1^T(t) & A_2^T(t) \\ -A_2^T(t) & A_1^T(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1(t) & -A_2(t) \\ A_2(t) & A_1(t) \end{bmatrix} \right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} A_1^T(t) & A_2^T(t) \\ -A_2^T(t) & A_1^T(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Далее обозначим

$$\begin{bmatrix} A_1(t) & -A_2(t) \\ A_2(t) & A_1(t) \end{bmatrix} = \tilde{A}(t), \quad \begin{pmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{pmatrix} = \tilde{X}(t), \quad \begin{pmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \end{pmatrix} = \tilde{a}(t), \quad (18)$$

при которых уравнение (16) приобретает вид

$$\tilde{A}^T(t) \cdot \tilde{A}(t) \cdot \tilde{X}(t) = \tilde{A}^T(t) \cdot \tilde{a}(t) \Leftrightarrow B(t) \cdot X(t) = b(t), \quad (19)$$

$2n \times 2m \quad 2m \times 2n \quad 2n \times 1 \quad 2n \times 2m \quad 2m \times 1 \quad 2n \times 2n \quad 2n \times 1 \quad 2n \times 1$

а уравнение (17):

$$\tilde{X}(t) = [\tilde{A}^T(t) \cdot \tilde{A}(t)]^{-1} \cdot \tilde{A}^T(t) \cdot \tilde{a}(t) = \tilde{A}^+(t) \cdot \tilde{a}(t), \quad (20)$$

где $\tilde{A}^+(t)$ – обобщенная обратная к $\tilde{A}(t)$ матрица.

Замечание 1. Матрицы $\tilde{A}(t)$, $\tilde{A}^T(t)$, $[\tilde{A}^T(t) \cdot \tilde{A}(t)]$ и $[\tilde{A}^T(t) \cdot \tilde{A}(t)]^{-1}$ блочно-кососимметричны относительно первых главных диагоналей и блочно-симметричны относительно вторых главных диагоналей.

Численно-аналитическое решение (прямой подход). Теперь, допустив, что имеют место дифференциальные преобразования

$$B(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K B(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad B(t) = \chi_1(t, t_v, H, B(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (21)$$

$$b(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K b(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad b(t) = \chi_2(t, t_v, H, b(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (22)$$

$$X(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K X(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \cdot \quad X(t) = \chi_3(t, t_v, H, X(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (23)$$

систему (6) из области оригиналов переведем в область дифференциальных преобразований. При этом будем иметь представление

$$\sum_{\ell=0}^K B(k-\ell) \cdot X(\ell) = b(K), \quad (24)$$

откуда

при $K=0$:

$$B(0) \cdot X(0) = b(0), \quad (25)$$

следовательно,

$$X(0) = B^{-1}(0) \cdot b(0); \quad (26)$$

при $K=1$:

$$B(1) \cdot X(0) + B(0) \cdot X(1) = b(1), \quad (27)$$

следовательно,

$$X(1) = B^{-1}(0) \cdot (b(1) - B(1) \cdot X(0)); \quad (28)$$

при $K=2$:

$$B(2) \cdot X(0) + B(1) \cdot X(1) + B(0) \cdot X(2) = b(2), \quad (29)$$

следовательно,

$$X(2) = B^{-1}(0) \cdot (b(2) - B(2) \cdot X(0) - B(1) \cdot X(1)); \quad (30)$$

...

при $K=K$:

$$\sum_{\ell=0}^{K-1} B(k-\ell) \cdot X(\ell) + B(0) \cdot X(K) = b(K), \quad (31)$$

следовательно,

$$X(K) = B^{-1}(0) \cdot (b(K) - \sum_{\ell=0}^{K-1} B(k-\ell) \cdot X(\ell)). \quad (32)$$

Таким образом, имея векторные дискреты (26), (28), (30),..., (31), в соответствии с (23) можно восстановить решение $X(t)$.

Замечание 2. Соотношение (24) повторяет соотношению (9) работы [8] с точностью до $\tilde{B}(K), \tilde{B}^T(K), \tilde{b}(K)$ вместо $A(K), A^T(K), a(K)$.

Численно-аналитическое решение (декомпозиционный подход). Теперь, допустив, что имеют место дифференциальные преобразования

$$\underset{\sim}{A}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K \underset{\sim}{A}(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \underset{\sim}{A}(t) = \chi_1(t, t_v, H, \underset{\sim}{A}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (33)$$

$$\underset{\sim}{a}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K \underset{\sim}{a}(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \underset{\sim}{a}(t) = \chi_2(t, t_v, H, \underset{\sim}{a}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (34)$$

$$\underset{\sim}{X}(K) = \frac{H^K}{K!} \cdot \frac{d^K \underset{\sim}{X}(t)}{dt^K} \Big|_{t=t_v}, \quad K = \overline{0, \infty} \quad \underset{\sim}{X}(t) = \chi_3(t, t_v, H, \underset{\sim}{X}(K), K = \overline{0, \infty}), \quad (35)$$

систему (19) из области оригиналов переведем в область дифференциальных изображений. При этом будем иметь представление

$$\sum_{\ell=0}^K \underset{\sim}{A}^T(K-\ell) \cdot \sum_{p=0}^{\ell} \underset{\sim}{A}(p) \cdot \underset{\sim}{X}(\ell-p) = \sum_{\ell=0}^K \underset{\sim}{A}^T(\ell) \cdot \underset{\sim}{a}(K-\ell), \quad (36)$$

откуда

при $K=0$:

$$\underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(0) \cdot \underset{\sim}{X}(0) = \underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{a}(0), \quad (37)$$

следовательно,

$$\underset{\sim}{X}(0) = [\underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(0)]^{-1} \cdot \underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{a}(0) = \underset{\sim}{A}^+(0) \cdot \underset{\sim}{a}(0), \quad (38)$$

где $\underset{\sim}{A}^+(0)$ - псевдообратная к $\underset{\sim}{A}(0)$ матрица;

при $K=1$:

$$\begin{aligned} & \underset{\sim}{A}^T(1) \cdot \underset{\sim}{A}(0) \cdot \underset{\sim}{X}(0) + \underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(1) \cdot \underset{\sim}{X}(0) + \underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(0) \cdot \underset{\sim}{X}(1) = \\ & = \underset{\sim}{A}^T(1) \cdot \underset{\sim}{a}(0) + \underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{a}(1), \end{aligned} \quad (39)$$

следовательно,

$$\begin{aligned} \underset{\sim}{X}(1) &= [\underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(0)]^{-1} \cdot (\underset{\sim}{A}^T(1) \cdot \underset{\sim}{a}(0) + \underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{a}(1) - \\ & - \underset{\sim}{A}^T(1) \cdot \underset{\sim}{A}(0) \cdot \underset{\sim}{X}(0) - \underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(1) \cdot \underset{\sim}{X}(0)); \end{aligned} \quad (40)$$

при $K=2$:

$$\begin{aligned} & \tilde{A}^T(2) \cdot \tilde{A}(0) \cdot \tilde{X}(0) + \tilde{A}^T(1) \cdot \tilde{A}(1) \cdot \tilde{X}(0) + \tilde{A}^T(1) \cdot \tilde{A}(0) \cdot \tilde{X}(1) + \\ & + \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(2) \cdot \tilde{X}(0) + \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(1) \cdot \tilde{X}(1) + \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(0) \cdot \tilde{X}(2) = \\ & = \tilde{A}^T(2) \cdot \tilde{a}(0) + \tilde{A}^T(1) \cdot \tilde{a}(1) + \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{a}(2), \end{aligned} \quad (41)$$

следовательно,

$$\begin{aligned} \tilde{X}(2) = & [\tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(1)]^{-1} \cdot (\tilde{A}^T(2) \cdot \tilde{a}(0) + \tilde{A}^T(1) \cdot \tilde{a}(1) + \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{a}(2) - \\ & - \tilde{A}^T(2) \cdot \tilde{A}(0) \cdot \tilde{X}(0) - \tilde{A}^T(1) \cdot \tilde{A}(1) \cdot \tilde{X}(0) - \tilde{A}^T(1) \cdot \tilde{A}(0) \cdot \tilde{X}(1) - \\ & - \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(2) \cdot \tilde{X}(0) - \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(1) \cdot \tilde{X}(1)); \end{aligned} \quad (42)$$

при $K=K$:

$$\begin{aligned} & \sum_{\ell=0}^K \tilde{A}^T(K-\ell) \sum_{p=0}^{\ell} \tilde{A}(p) \cdot \tilde{X}(\ell-p) + \tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(0) \cdot \tilde{X}(K) = \\ & \quad \ell-p=0, \quad K-1. \\ & = \sum_{\ell=0}^K \tilde{A}^T(\ell) \cdot \tilde{a}(K-\ell), \end{aligned} \quad (43)$$

следовательно,

$$\begin{aligned} \tilde{X}(K) = & [\tilde{A}^T(0) \cdot \tilde{A}(0)]^{-1} \cdot \left(\sum_{\ell=0}^K \tilde{A}^T(\ell) \cdot \tilde{a}(K-\ell) - \right. \\ & \quad \begin{matrix} 2n \times 1 & 2n \times 2n & 2n \times 2m & 2m \times 1 \end{matrix} \\ & \left. - \sum_{\ell=0}^K \tilde{A}^T(K-\ell) \sum_{p=0}^{\ell} \tilde{A}(p) \cdot \tilde{X}(\ell-p) \right). \\ & \quad \begin{matrix} 2n \times 2m & 2m \times 2n & 2m \times 1 \end{matrix} \\ & \quad \ell-p=0, \quad K-1. \end{aligned} \quad (44)$$

Таким образом, имея векторные дискреты (38), (40), (42), ..., (44), в соответствии с (35) можно восстановить решение $\tilde{X}(t)$.

Замечание 3. Соотношения (36), (38), (40), (42), ..., (44) повторяют соотношения (9) - (13) работы [8] с точностью до $\tilde{A}^T(K), \tilde{A}(K), \tilde{X}(K), \tilde{a}(K), K = \overline{0, \infty}$ вместо $A^T(K), A(K), X(K), a(K), K = \overline{0, \infty}$.

Замечание 4. Матрицы $\tilde{A}(K)$, $\tilde{A}^T(\ell)$, $[\tilde{A}^T(\ell) \cdot \tilde{A}(p)]$, $[\tilde{A}^T(\ell) \cdot \tilde{A}(p)]^{-1}$, $\ell + p = K$, $\forall \ell = \overline{0, K}, \forall p = \overline{0, K}, \forall K = \overline{0, \infty}$ блочно-кососимметричны относительно первых главных диагоналей и блочно-симметричны относительно вторых главных диагоналей.

Модельный пример. Пусть задана некорректная (переопределенная) ЛОСКУ

$$\begin{bmatrix} (t-1-j) & 0 \\ t^2 & (t+1+jt) \\ (-t+j) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (t^2-2j) \\ (t^3-jt-j) \\ (-t^2-t-1+j) \end{pmatrix}$$

с неизвестным вектором $X(t) = (x_1(t), x_2(t))^T$.

1. Рассмотрим решение этой задачи сопряженным аналогом метода наименьших квадратов (прямым подходом).

Умножив обе части заданной некорректной системы уравнений на сопряженную матрицу

$$A^*(t) = \begin{bmatrix} (t-1+j) & t^2 & (-t-j) \\ 0 & (t+1-jt) & 0 \end{bmatrix},$$

в соответствии с (6) получим следующую эквивалентную корректную систему уравнений:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} (t^4+2t^2-2t+3) & (t^3+t^2+jt^3) \\ (t^3+t^2-jt^3) & (2t^2+2t+1) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} = \\ & = \begin{pmatrix} (t^5+2t^3+t+3-jt^3+jt^2-2jt+3j) \\ (t^4+t^3-t^2-t-jt^4-jt^2-2jt-j) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Тогда при $t_v = 0$, $H = 1$ будем иметь следующие матричные и векторные дискреты:

$$\begin{aligned} B(0) &= \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B(1) = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}, B(2) = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, B(3) = \begin{bmatrix} 0 & (1+j) \\ (1-j) & 0 \end{bmatrix}, \dots, \\ b(0) &= \begin{pmatrix} (3+3j) \\ -j \end{pmatrix}, b(1) = \begin{pmatrix} (1-2j) \\ (-1-2j) \end{pmatrix}, b(2) = \begin{pmatrix} j \\ (-1-j) \end{pmatrix}, b(3) = \begin{pmatrix} (2-j) \\ 1 \end{pmatrix}, \dots, \end{aligned}$$

а также

$$B^{-1}(0) = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Далее имеем:

при $K=0$ согласно (26):

$$X(0) = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (3+3j) \\ -j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1+j) \\ -j \end{pmatrix};$$

при $K=1$ согласно (28):

$$X(1) = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{pmatrix} (1-2j) \\ (-1-2j) \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (1+j) \\ -j \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix};$$

при $K=2$ согласно (30):

$$X(2) = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{pmatrix} j \\ (1+j) \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (1+j) \\ -j \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

при $K=3$ согласно (32):

$$\begin{aligned} X(3) &= \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{pmatrix} (2-j) \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & (1+j) \\ (1-j) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (1+j) \\ -j \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) = \\ &= \begin{bmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2-j+j-1-1 \\ 1-2+1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

и т.д. Таким образом, маклореновское решение задачи имеет вид

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1+j) \\ -j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \cdot t + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot t^2 + \dots = \begin{pmatrix} (t+1+j) \\ (-t-j) \end{pmatrix}.$$

2. Теперь рассмотрим решение этой задачи декомпозиционным сопряженным аналогом метода наименьших квадратов. Имеем

$$A_1(0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1(1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, A_1(2) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \forall K \geq 3,$$

$$A_2(0) = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, A_2(1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A_2(K) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \forall K \geq 2;$$

$$a_1(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, a_1(1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, a_1(2) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, a_1(3) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, a_1(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 4,$$

$$a_2(0) = \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}, a_2(1) = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, a_2(K) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \forall K \geq 2,$$

а также

$$\underset{\sim}{A}(0) = \left[\begin{array}{ccc|ccc} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right], \underset{\sim}{A}^T(0) = \left[\begin{array}{ccc|ccc} -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right],$$

$$\underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(0) = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right], [\underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{A}(0)]^{-1} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right],$$

$$\underset{\sim}{A}^T(0) \cdot \underset{\sim}{a}(0) = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -\frac{3}{3} \\ -1 \end{pmatrix}.$$

Далее получим:

при $K=0$ согласно (38):

$$\underset{\sim}{X}(0) = \begin{pmatrix} X_{11}(0) \\ X_{21}(0) \\ X_{12}(0) \\ X_{22}(0) \end{pmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 3 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix},$$

следовательно,

$$\begin{pmatrix} X_{11}(0) \\ X_{21}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} X_{12}(0) \\ X_{22}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix};$$

при $K=1$ согласно (40):

$$\underset{\sim}{X}(1) = \begin{pmatrix} X_{11}(1) \\ X_{21}(1) \\ X_{12}(1) \\ X_{22}(1) \end{pmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \left(\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -3 \\ -1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -3 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -3 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

следовательно,

$$\begin{pmatrix} X_{11}(1) \\ X_{21}(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} X_{12}(1) \\ X_{22}(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix};$$

при $K=2$ согласно (42):

$$\underset{\sim}{X}(2) = \begin{pmatrix} X_{11}(2) \\ X_{21}(2) \\ X_{12}(2) \\ X_{22}(2) \end{pmatrix} = \left[\begin{array}{cc|cc} 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 2 \\ -2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 2 \\ -1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

следовательно,

$$\begin{pmatrix} X_{11}(2) \\ X_{21}(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} X_{12}(2) \\ X_{22}(2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

и т.д. Таким образом, имеем следующее маклореновское решение:

$$\begin{aligned} X(t) &= X(0) + X(1) \cdot t + \dots = \begin{pmatrix} X_{11}(0) + j \cdot X_{12}(0) \\ X_{21}(0) + j \cdot X_{22}(0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{11}(1) + j \cdot X_{12}(1) \\ X_{21}(1) + j \cdot X_{22}(1) \end{pmatrix} \cdot t + \dots = \\ &= \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + j \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right) + \left(\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} + j \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right) \cdot t = \begin{pmatrix} 1+j+t \\ -j-t \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

что точно совпадает с полученным выше решением при применении прямого подхода.

Заключение. Решение задачи в виде (4) или (5), связанное с достаточно труднореализуемой вычислительной процедурой по определению матриц $A^+(t)$ или $A^{-1}(t)$, при предложенных численно-аналитических методах полностью исключается и фактически сводится к рекуррентным численным вычислительным процедурам по определению матричных дискретов $X(K)$, $K = \overline{0, \infty}$ неизвестного вектора $X(t)$ и восстановлению его обратными дифференциальными преобразованиями. При реализации этих процедур, очевидно, должны быть использованы широкие возможности современных информационных технологий [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. - Киев: Наукова думка, 1984.- 420 с.
2. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Способ решения систем линейных неавтономных уравнений на базе дифференциально-тейлоровских преобразований // Электронное моделирование. – 1998. - Т. 19, № 4. – С. 19-25.
3. **Simonyan S.H., Avetisyan A.G.** The Method Linear Non-Autonomus Finit Equation Set Solution on the Basis of Differential-Taylor Transform // Engineering Simulation. – 1998. – Vol.15, № 2. – P. 407-421.
4. **Симонян С.О., Аветисян А.Г., Асланян Л.М.** Дифференциально-падеевская матрично-векторная модель решения систем линейных неавтономных уравнений // Моделирование, оптимизация, управление: Сб. научн. тр. ГИУА. – Ереван, 1998. – Вып. 1. – С.65-71.
5. **Симонян С.О., Адамян М.А.** Аналитические декомпозиционные методы решения линейных однопараметрических некорректных систем конечных уравнений с комплексными матрицами (I) // Вестник ГИУА. Серия “Информационные технологии, электроника, радиотехника”. – 2014. - Вып. 17, № 2.- С. 9-14.

6. **Симонян С.О., Адамян М.А.** Численно-аналитические декомпозиционные методы решения линейных однопараметрических некорректных систем конечных уравнений с комплексными матрицами (II) // Вестник ГИУА. Серия “Информационные технологии, электроника, радиотехника”. – 2014. – Вып. 17, № 2.- С. 15-21.
7. **Симонян С.О., Адамян М.А.** Декомпозиционные методы решения линейных однопараметрических корректных систем конечных уравнений с комплексными матрицами // Известия НАН РА и НПУА. Серия ТН. – 2015. – Т. LXVIII, №1. – С.61-72.
8. **Симонян С.О., Адамян М.А.** К некоторым методам решения линейных однопараметрических систем конечных уравнений // Известия НАН РА и НПУА. Серия ТН. – 2015. – Т. LXVIII, №2. – С.225-237.
9. **Strastrup B.** The C++ Programming Language. - 4th Edition. - Boston: Addison – Wesley Professional, 2013. – 1368 p.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 12.09.2018.

Ս.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Մ.Ա. ԱԴԱՄՅԱՆ

**ԳԾԱՅԻՆ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՆՎԱԶԱԳՈՒՅՆ ՔԱՌԱԿՈՒՄԻՆԵՐԻ ՄԵԹՈՂԻ
ՀԱՄԱԼՈՒԾ ՆՄԱՆԱԿԸ**

Առաջարկվել են գծային միապարամետրական վերջավոր հավասարումների համակարգերի լուծման համար նվազագույն քառակուսիների մեթոդի անալիտիկ, ինչպես նաև դեկոմպոզիցիոն թվա-անալիտիկ համալուծ նմանակները: Դիտարկվել է մեկ մոդելային օրինակի՝ ոչ կոռեկտ խնդրի լուծումը՝ առաջարկված թվա-անալիտիկ մեթոդներով:

Առանցքային բառեր. գծային միապարամետրական վերջավոր հավասարումների համակարգեր, նվազագույն քառակուսիների մեթոդ, նվազագույն քառակուսիների մեթոդի համալուծ նմանակներ, մոդելային օրինակ:

S.H. SIMONYAN, M.A. ADAMYAN

**SUBJECTIVE ANALOGUES OF THE METHOD OF THE MINIMAL
QUADRATIC SOLUTION OF LINEAR ONE-PARAMETRIC SYSTEMS OF
FINITE EQUATIONS**

Analytical, as well as numerical-analytical direct and compositional equivalents of the method for the solution of linear quadratic systems of single-parameter systems of finite equations are proposed. The solution of one model – the incorrect task proposed by the numerical-analytical methods is considered.

Keywords: linear single-parameter systems of finite equations, method of minimal squares, similar methods of minimal squares, model.

Ф.П. ГРИГОРЯН

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ МНОГИХ КОМПЛЕКСНЫХ
ПЕРЕМЕННЫХ. I

Рассматриваются передаточные функции многих комплексных переменных. Показано, что в задачах синтеза управления с наперед заданным спектром иногда передаточную функцию регулятора необходимо представить в виде аналитической функции многих комплексных переменных.

Ключевые слова: задачи синтеза управления, передаточные аналитические функции многих комплексных переменных, стационарные управляемые системы.

Рассматривается новое понятие: передаточные аналитические функции многих комплексных переменных. Одновременно показывается их применение в задачах синтеза одномерного управления с наперед заданными спектрами в стационарных управляемых системах.

Иногда бывают случаи, когда передаточная функция регулятора $W(p)$, $p = x + jy$, $j = \sqrt{-1}$ не имеет таких аналитических свойств, какие имеют отдельные блоки $W_k(p)$, $k = \overline{1, n}$. И наоборот, аналитические свойства передаточных функций отдельных блоков $W_k(p)$ не передаются передаточным функциям общей схемы $W(p)$ (параллельное соединение).

Поэтому возникает естественный вопрос: как сохранить взаимосвязь между свойствами передаточной функции параллельного соединения $W(p)$ и отдельных блоков $W_k(p)$, $k = \overline{1, n}$.

Этот вопрос можно решить, если принять, что иногда передаточные функции представляются в виде аналитических функций многих комплексных переменных, в отличие от случая с одной комплексной переменной.

Поэтому считаем необходимым процитировать следующие факты из теории аналитических функций многих комплексных переменных [1-3].

Пространство $C^n = C \times \dots \times C$ – декартово произведение из n экземпляров комплексной плоскости C . Для точки из C^n будем использовать обозначение $Z = (z_1, \dots, z_n)$, где $z_i = x_i + jy_i \in C$ и x_i, y_i – вещественные числа, $j = \sqrt{-1}$.

Возвращаемся к следующей задаче [4]:

1. Постановка задачи. Пусть задана следующая управляемая стационарная система:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + hu(t), \\ u(t) = \int_{-\infty}^t g(t-t')v(t') dt', \Rightarrow \dot{x}(t) = Ax(t) + h \int_{-\infty}^t g(t-t')bx(t') dt', \\ v(t) = bx(t), \end{cases} \quad (1.1)$$

где $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$ – столбцовая матрица размером $n \times 1$ состояния процесса (T – означает транспонирование); $v(t)$ – скаляр, входной сигнал регулятора; $g(t-t')$ – скаляр, импульсная переходная функция регулятора; $u(t)$ – скалярное управляющее воздействие, рассматриваемое как выходной сигнал регулятора; $A = (a_{ij}), (i, j = 1, 2, \dots, n)$; $h = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T$; $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$; t' – момент подачи входного сигнала; t – момент появления выходного сигнала.

Наперед заданными желательными числами являются

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_1}; \underbrace{\mu, \mu, \dots, \mu}_{n_2}; 0, n_1 + n_2 + 1 = n \quad (1.2)$$

при

$$\lambda_i \neq \lambda_j, i, j = 1, 2, \dots, n_1, \mu \neq \lambda_i, \mu \neq 0. \quad (1.2_1)$$

Требуется построить $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ так, чтобы система (1.1) при новых неизвестных $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T$ была приведена к виду

$$\begin{cases} \dot{y}_i(t) = \lambda_i y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n_1), \\ \dot{y}_j(t) = \mu y_j \quad (j = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2), \\ \dot{y}_n(t) = 0 \cdot y_n, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y_i = e^{\lambda_i t} C_i, \\ y_j = e^{\mu t} C_j, \\ y_n = C_n, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y^{(1)} = e^{j_1 t} C^{(n_1)}, \\ j_1 = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_{n_1}), \\ y^{(2)} = e^{\mu t} C^{(n_2)}, \\ y_n = C_n, \end{cases} \quad (1.3)$$

где $C^{(n_1)} = (C_1, \dots, C_{n_1})^T, C^{(n_2)} = (C_{n_1+1}, \dots, C_{n_1+n_2})^T$ – столбцы из произвольных постоянных; C_n – постоянный скаляр; $y^{(1)} = (y_1, \dots, y_{n_1})^T$, $y^{(2)} = (y_{n_1+1}, \dots, y_{n_1+n_2})^T$, $y = (y^{(1)}, y^{(2)}, y_n)^T$.

Предполагаются также следующие условия: для передаточной функции регулятора $W(p)$ удовлетворяются

$$W(\lambda_i) \neq 0, W(\mu) \neq 0, W(0) \neq 0, (i = \overline{1, n_1}), \frac{d^i W(p)}{dp^i} \Big|_{p=\mu} = 0 \quad (i = \overline{1, n_2 - 1}), \quad (1.4)$$

где p – комплексный параметр [5].

Более подробные преобразования решений задач, приведенных в [4], здесь повторять не будем.

Здесь в основном нас интересуют другие вопросы, связанные с условиями (1.4), на которых мы и остановимся. В условиях (1.4) утверждается, что свойства передаточной функции регулятора зависят от вида наперед заданного спектра (1.2). Поэтому можно представить, что регулятор образуется из трех звеньев (блоки), и каждый блок имеет свою передаточную функцию

$$W_1(p) = \frac{\lambda_1}{\beta_1 + \prod_{i=1}^{n_1} (p - \lambda_i)}, W_2(p) = \frac{\lambda_2}{\beta_2 + (p - \mu)^{n_2}}, W_3(p) = \frac{\lambda_3}{\beta_3 + p}, \quad (1.5)$$

каждая из которых удовлетворяет условиям (1.4) соответственно, где $\alpha_i \neq 0, \beta_i \neq 0, i = 1, 2, 3$ - произвольные постоянные, знаменатели дробей в (1.5), отличные от нуля.

Если представим, что регулятор является параллельным соединением трех блоков, то передаточной функцией его является [6]

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + W_3(p) = \frac{\alpha_1}{\beta_1 + \prod_{i=1}^{n_1} (p - \lambda_i)} + \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p - \mu)^{n_2}} + \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p}. \quad (1.6)$$

Было бы желательно, чтобы функция $W(p)$ из (1.6) обладала условиями (1.4). Но, как можно заметить, она не удовлетворяет налагаемым условиям. На самом деле имеем

$$W'(p) = \frac{-\alpha_1 (\Delta_{n_1})'}{[\beta_1 + \Delta_{n_1}(p)]^2} + \frac{-\alpha_2 n_2 (p - \mu)^{n_2-1}}{[\beta_2 + (p - \mu)^{n_2}]^2} + \frac{-\alpha_3 n_3 p^{n_3-1}}{(\beta_3 + p)^2},$$

$$\Delta_{n_1}(p) = \prod_{i=1}^{n_1} (p - \lambda_i).$$

В случае, когда $p = \mu$, вторая дробь в $W'(p)$ равняется нулю, а первая и третья дроби не равны нулю, потому по третьему условию имеем $\lambda_i \neq \mu, \mu \neq 0$, в противном случае - кратность числами λ_i и 0 будет увеличиваться, что опять же противоречит третьему условию задачи.

Возникает вопрос: как выйти из подобного “тупикового” положения? Для этого введем понятие передаточных функций многих комплексных переменных [1-3].

Примем, что: 1) передаточная функция регулятора $W(p)$ зависит от трех комплексных переменных $W(p) = W(p_1, p_2, p_3)$, $p = (p_1, p_2, p_3)$, $p_i = x_i + jy_i \in C, i = 1, 2, 3$; 2) передаточные функции каждого блока имеют вид соответственно

$$W_1(p_1) = \frac{\alpha_1}{\beta_1 + \prod_{i=1}^{n_1} (p_1 - \lambda_i)}, W_2(p_2) = \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p_2 - \mu)^{n_2}}, W_3(p_3) = \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p_3}. \quad (1.7)$$

Тогда условия (1.4) в вышеставленной задаче можно заменить на следующие [1,2]:

а) в комплексной плоскости p_1 (p_1 - любое комплексное число, а $p_2 = p_3 = 0$):

$$W(p_1, p_2, p_3)|_{\substack{p_2=0 \\ p_3=0}} = W(p_1, 0, 0) = W_1(p_1)|_{p_1=\lambda_i} \neq 0, i = \overline{1, n_1}, \quad (1.8)$$

б) в комплексной плоскости p_2 (p_2 - любое комплексное число, а $p_1 = p_3 = 0$):

$$\begin{aligned} W(p_1, p_2, p_3)|_{\substack{p_1=0 \\ p_3=0}} &= W(0, p_2, 0) = W_2(p_2)|_{p_2 \neq 0}, \\ \frac{\partial^i W(p_1, p_2, p_3)}{\partial p_2^i} \Big|_{p_2=\mu} &= \frac{d^i W_2(p_2)}{dp_2^i} \Big|_{p_2=\mu} = 0, i = \overline{1, n_2 - 1}; \end{aligned} \quad (1.9)$$

в) в комплексной плоскости p_3 (p_3 - любое комплексное число, а $p_1 = p_2 = 0$):

$$W(p_1, p_2, p_3)|_{\substack{p_1=0 \\ p_2=0}} = W(0, 0, p_3) = W_3(p_3)|_{p_3=0} \neq 0, \quad (1.10)$$

При (1.7) в случае параллельного соединения передаточной функцией регулятора является [6]

$$\begin{aligned} W(p) &= W(p_1, p_2, p_3) = W_1(p_1) + W_2(p_2) + W_3(p_3) = \\ &= \frac{\alpha_1}{\beta_1 + \prod_{i=1}^{n_1} (p_1 - \lambda_i)} + \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p_2 - \mu)^{n_2}} + \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p_3}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Можно заметить, что функция из (1.11) удовлетворяет условиям (1.8) – (1.10) соответственно.

2. Пример. Рассмотрим задачу программы управления космическим аппаратом при посадке на Луну [4,7]. Движение космического аппарата в конце посадки будем рассматривать в относительной системе координат охуз. Начало относительной системы координат поместим в расчетную точку прилунения.

Для простоты рассмотрим однородную часть системы уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\varpi^2 x_1 + u \alpha_2, \\ \dot{x}_3 = x_4, \alpha_2^2 + \alpha_4^2 = 1, \\ \dot{x}_4 = 2\varpi^2 x_3 + u \alpha_4, \end{cases} \quad (2.1)$$

Обозначим

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2\omega^2 & 0 \end{bmatrix}, h = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_2 \\ 0 \\ \alpha_4 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, \begin{cases} u = \int_{-\infty}^t g(t-t')v(t')dt', \\ v(t) = bx(t), \\ b = (b_1, b_2, b_3, b_4). \end{cases} \quad (2.2)$$

Тогда система (2.1) примет вид

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + h \int_{-\infty}^t g(t-t')bx(t')dt'. \quad (2.3)$$

Предположим, что наперед заданными желательными числами являются

$$1, 1, 2, 0. \quad (2.4)$$

Требуется построить передаточную функцию регулятора $W(p)$ так, чтобы она удовлетворяла следующим условиям:

$$W(p)|_{p=1} \neq 0, \left. \frac{dW(p)}{dp} \right|_{p=1} = 0; W(p)|_{p=2} \neq 0, W(p)|_{p=0} \neq 0. \quad (2.5)$$

Решение. Представим, что регулятор образуется из трех звеньев, соответствующих видам (2.4), и каждое из них имеет свою передаточную функцию

$$W_1(p) = \frac{\alpha_1}{\beta_1 + (p-1)^2}, W_2(p) = \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p-2)}, W_3(p) = \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p}. \quad (2.6)$$

Можно заметить, что $W_1(p)$ удовлетворяет первой части условия (2.5), $W_2(p)$ – второй части, а $W_3(p)$ – третьей части.

Если представим, что эти блоки соединены последовательно, то для передаточной функции регулятора $W(p)$ получим

$$\tilde{W}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) = \frac{\alpha_1}{\beta_1 + (p-1)^2} \cdot \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p-2)} \cdot \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p}, \quad (2.7)$$

а в случае параллельного соединения:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + W_3(p) = \frac{\alpha_1}{\beta_1 + (p-1)^2} + \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p-2)} + \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p}. \quad (2.8)$$

Видно, что передаточная функция регулятора $\tilde{W}(p)$ удовлетворяет условиям (2.5), а $W(p)$ не удовлетворяет.

Причиной этого противоречия является факт передаточной функции $W(p)$, зависящей от одной комплексной переменной $p = x + jy$.

А теперь предположим обратное: $W(p)$ зависит от трех комплексных переменных $p = (p_1, p_2, p_3)$, $p_i = x_i + jy_i$, $i = 1, 2$, т.е. $W(p) = W(p_1, p_2, p_3)$:

$$W_1(p_1) = \frac{\alpha_1}{\beta_1 + (p_1 - 1)^2}, W_2(p_2) = \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p_2 - 2)}, W_3(p_3) = \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p_3}.$$

Тогда условия (2.5) можно заменить на следующие [1,2] (в комплексной плоскости):

а) p_1 (p_1 - любое комплексное число, а $p_2 = 0, p_3 = 0$):

$$W(p_1, p_2, p_3)|_{p_1=1} \neq 0, \frac{\partial W(p_1, p_2, p_3)}{\partial p_1} \Big|_{p_1=1} = 0; \quad (2.9)$$

б) p_2 (p_2 - любое комплексное число, а $p_1 = 0, p_3 = 0$):

$$W(p_1, p_2, p_3)|_{p_2=2} \neq 0, \quad (2.10)$$

в) p_3 (p_3 - любое комплексное число, а $p_1 = 0, p_2 = 0$):

$$W(p_1, p_2, p_3)|_{p_3=0} \neq 0. \quad (2.11)$$

Значит, в случае параллельного соединения передаточной функцией регулятора является

$$\begin{aligned} W(p) &= W_1(p_1, p_2, p_3) = W_1(p_1) + W_2(p_2) + W_3(p_3) = \\ &= \frac{\alpha_1}{\beta_1 + (p_1 - 1)^2} + \frac{\alpha_2}{\beta_2 + (p_2 - 2)} + \frac{\alpha_3}{\beta_3 + p_3}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Можно заметить, что функция $W(p)$ из (2.12) уже удовлетворяет условиям (2.9), (2.10) и (2.11) соответственно.

Замечание. При наличии одного нулевого корня в спектре (1.2) и когда $Re \mu < 0, Re \lambda_i < 0$ ($i = \overline{1, n_1}$), то система (1.3) устойчива, но асимптотической устойчивости нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маркушевич А.И.** Краткий курс теории аналитических функций. –М.: Наука, 1966. –387 с.
2. **Ганнинг Р., Росси Х.** Аналитические функции многих комплексных переменных. –М.: Мир, 1969. – 395 с.
3. **Шилов Г.Е.** Математический анализ. Специальный курс. –М.: Наука, 1961. – 433 с.
4. **Григорян Ф.П.** О построении управления с желаемым спектром в САР //Изд. АН Армении. Механика. – 2003. – Т. 56, N 2. – С. 59-69.
5. **Араманович И.Г., Лунц Г.Л., Эльсгольц Л.Э.** Функции комплексного переменного, операционное исчисление, теория устойчивости. –М.: Наука, 1968. – 415 с.
6. **Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г.** Методы теории автоматического управления. –М.: Наука, 1971. – 743 с.
7. **Пономарев В.М.** Теория управления движением космических аппаратов. –М.: Наука, 1965. – 455 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 15.04.2018.

Ֆ.Պ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

ՇԱՏ ԿՈՄՊԼԵՔՍ ՓՈՓՈԽԱԿԱՆՆԵՐԻ ՓՈԽԱՆՑՄԱՆ ՖՈՒՆԿՑԻԱՆԵՐ: I

Նախօրոք տրված սպեկտրներով կառավարման սինթեզի խնդիրներում երբեմն անհրաժեշտ է լինում կարգավորիչի փոխանցման ֆունկցիան պատկերացնել որպես շատ կոմպլեքս փոփոխականների անալիտիկ ֆունկցիա:

Առանցքային բառեր. կառավարման սինթեզի խնդիրներ, կոմպլեքս շատ փոփոխականների փոխանցման անալիտիկ ֆունկցիաներ, կառավարելի ստացիոնար համակարգեր:

F.P. GRIGORYAN

TRANSMITTING FUNCTIONS OF MANY COMPLEX VARIABLES. I

The transmitting functions of many complex variables are studied. It is shown that in the control synthesis problems with a prescribed range of times, the transfer function of the regulator should be submitted as an analytic function of several complex variables.

Keywords: transmission analitical functions of many complex variables, stationary controlled systems.

Z.M. AVETISYAN

**MEASUREMENT, CALCULATION AND ANALYSIS OF MTBF FOR
SINGLE-STAGE SYNCHRONIZERS USING AN AUTOMATED SYSTEM**

Nowadays, in the systems with very large scale of integration (VLSI), multi-clock domains are widely used to provide high correspondence of cooperation for different blocks in the systems on chip (SoC). Synchronization of the data relationship of the mentioned blocks is necessary while using multi-clock domains. To solve this synchronization problem, special circuits, called synchronizers, are used. As the data arrival time cannot be predictable between different clock domains, there is a probability of having metastable states in synchronizers. Metastability can bring a failure of consequent circuits which can bring to a failure of the whole system. Therefore, during the design and verification of an integrated circuit (IC), it is very important to estimate the probability of failures (the mean time between the failures).

In the scope of this paper, measurement of the metastability parameters and calculation systems of MTBF are researched. To reduce the design verification resources, an automated system is proposed which measures and calculates the mentioned parameters and gives a chance to analyze the circuit.

Keywords: mean time between the failures, multi-clock SoC, synchronizer, timing parameters, measurement, automated system.

Introduction. The necessity of synchronizers arises in multi-clock domain systems on chip (SoC). A simple example of a synchronizer is two series connected D flip-flops [1]. Since separate blocks in SoC work independently of each other, it is impossible to predict the arrival time of the data coming from another clock domain block. Therefore, data can be changed parallel to the synchronization clock in the synchronizer (placed in the data receiving block), which can bring a metastability in synchronizers (Fig.1).

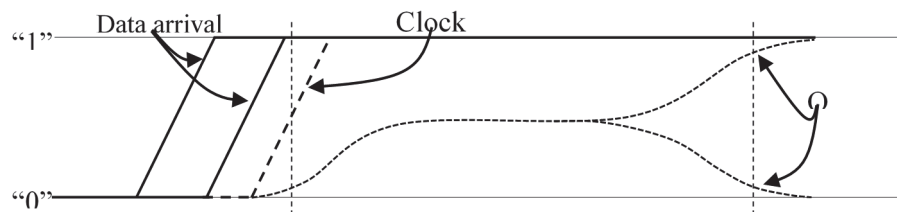


Fig.1. Metastability in a D flip-flop

If the data and the clock rising edges are close enough, it may bring to a metastability issue (Fig.1). During the metastable state output, signal Q stays between the logical levels “0” and “1”.

The process of metastability is a probable phenomenon. The mean time between failures (MTBF) is defined to highlight the synchronizer’s performance. It is based on mathematical equations, using some technology and semitechnical parameters, which are described in the next the sections.

Measurement of Setup and Hold timing parameters. To ensure the normal operation of a flip-flop without failures it is necessary to meet the setup/hold timing constraints. If that constraints are not met, the flip-flop can enter the metastable state or transfer wrong data.

To write data into the D flip-flop, the circuit needs some time before the active edge of the synchronization clock for settling (setup). This timing constraint is called setup time [2] (Fig.2). To measure the setup time, the data signal should be swept towards the clock signal up to the output distortion.

Another important question should be considered as well: how long does the input data signal need to be held unchanged after the active edge of the clock signal to ensure the data transmission without failures. That timing constraint is called hold time [2] and is defined as a minimum time which must be held after the clock active edge until the data input signal changes (Fig.2).

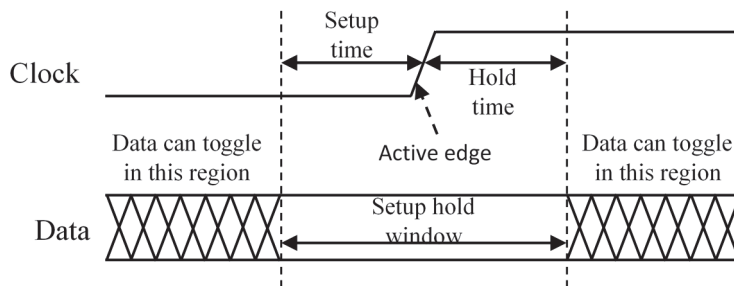


Fig.2. Setup/hold time

Measurement of the timing the constant (tau) parameter. One of the important parameters of metastability is the timing constant (tau, τ) of the metastability curve. τ depends on the physical parameters of the device, which describes how fast a device exits from the metastable state. τ is determined by equation (1) [3] (Fig.3):

$$\tau = (t_2 - t_1) / \ln \left(\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \right) . \quad (1)$$

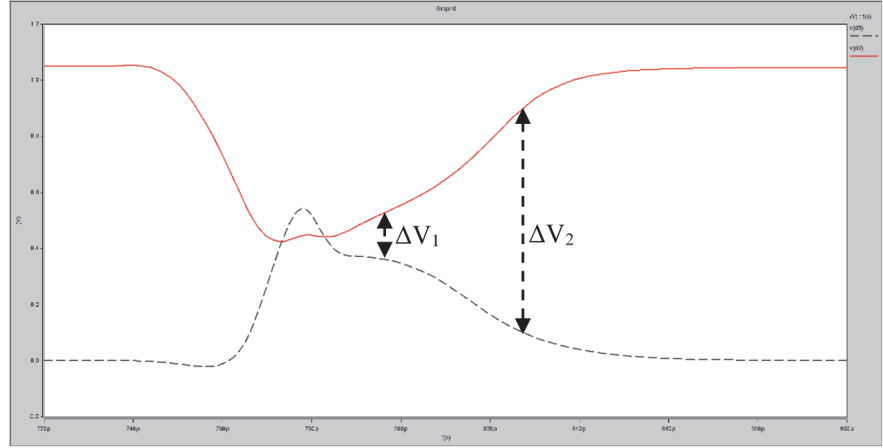


Fig.3. Modeling of the τ calculation

Calculation of the mean time between the failures. Several methods of failure probability calculation for synchronizers are presented in literature [4-6]. The mentioned probability can be calculated as [6]:

$$P_F = \frac{T_w e^{-T_s/\tau}}{T_C}, \quad (2)$$

where T_w is the time window constant, T_s is the settling time, T_C is the clock period of the synchronizer. The settling time and timing window constant can be calculated as (equations (3) and (4) respectively):

$$T_s = T_{CLK} - T_{C2Q} - T_{SU}, \quad (3)$$

$$T_w = T_{SU} + T_{HO}. \quad (4)$$

If the input data of the synchronizer toggles by a T_D period, the probability of the synchronizer failure can be calculated as

$$P_F/\text{sec} = \frac{T_w e^{-T_s/\tau}}{T_C T_D}. \quad (5)$$

The MTBF can be calculated from (5):

$$\text{MTBF} = \frac{T_C T_D e^{T_s/\tau}}{T_w}. \quad (6)$$

Equation (6) represents the mean time between the failures for a single latch.

An automated system for MTBF calculation in single-stage synchronizers.

All the investigations presented in this work are implemented for a single latch [7] (Fig.4), as a single-stage synchronizer. Modeling and simulations are done using the HSPICE simulation tool for saed32/28 nm technology libraries.

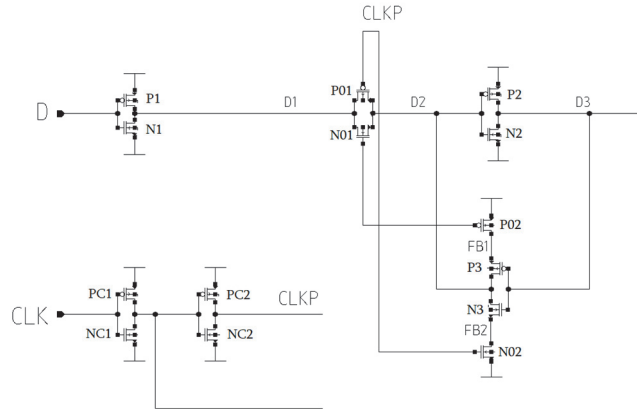


Fig.4. D-latch circuit

Considering that the measurement and calculation of parameters, mentioned in the previous sections require additional resources, a new automated system is proposed, which requires only some parameters as input data. These initial parameters are used for future measurements and calculations. The operation of the automated system is based on the block-diagram, shown in Fig.5.

In the first step, the designer sets the synchronizer, technology library, simulation conditions and other options, for which the detailed description is given in the next section. After collecting all the required and optional information, the automated system starts to create an appropriate environment for simulations and analyses regarding Fig.5. The created environment includes spice decks, which will automatically measure the setup/hold and tau parameters.

When all the simulation conditions are set, the system starts to simulate the synchronizer and measure the necessary parameters. When all the simulations are complete, the system starts parsing the measurement results (such as .mt files), and collects them to be used in future.

When all the measurements are collected, the proposed system starts to calculate all the necessary parameters for the MTBF calculation, using (3) and (4). After that, MTBF is calculated, regarding (6).

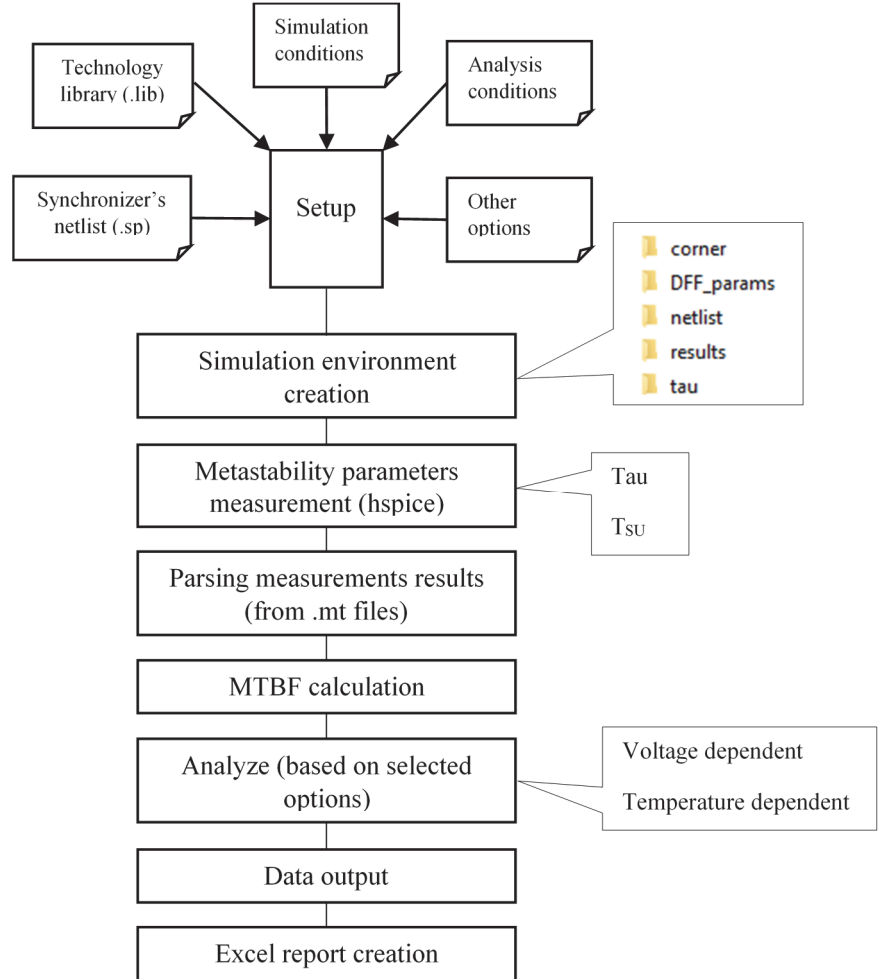


Fig.5. The block-diagram of the proposed automation system

As the minimum MTBF value is often mentioned in the design specification, which must be met during the IC design. The proposed system calculates the minimum count of latches, which are required to meet the design specification. MTBF for cascaded latches can be calculated as [6]:

$$MTBF \approx T_C T_D \left(\prod_{j=1}^{n-1} \frac{\tau_j e^{\sum_{i=1}^n T_i^S / \tau_i}}{T_j^W} \right) \left(\frac{e^{\sum_{i=1}^n T_i^S / \tau_i}}{T_n^W} \right), \quad (7)$$

where N is the number of latches.

N, calculated from equation (7), is the desirable count of latches. As the system suggests the number of latches based on a single latch character, all the

latches in the proposed circuit will have the same parameters (τ , T_s , T_w). Therefore (7) can be modified as follows:

$$\begin{aligned} \text{MTBF} &\approx T_C T_D \left(\frac{\tau e^{NT_s/\tau}}{T_w} \right)^{N-1} \frac{e^{NT_s/\tau}}{T_w} = \\ &= T_C T_D \tau^{N-1} \left(\frac{e^{NT_s/\tau}}{T_w} \right)^{N-1} \frac{e^{NT_s/\tau}}{T_w} = \frac{T_C T_D}{\tau} \tau^N \left(\frac{e^{NT_s/\tau}}{T_w} \right)^N = \frac{T_C T_D}{\tau} \left(\frac{\tau e^{NT_s/\tau}}{T_w} \right)^N, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\left(\frac{\tau e^{NT_s/\tau}}{T_w} \right)^N = \frac{\text{MTBF} \cdot \tau}{T_C T_D}. \quad (9)$$

To determine N , equation (9) needs a series of modifications:

$$\begin{aligned} N \cdot \ln \left(\frac{\tau e^{NT_s/\tau}}{T_w} \right) &= \ln \frac{\text{MTBF} \cdot \tau}{T_C T_D}, \\ N \left(N \cdot \ln(e^{T_s/\tau}) + \ln \left(\frac{\tau}{T_w} \right) \right) &= \ln \frac{\text{MTBF} \cdot \tau}{T_C T_D}, \\ \frac{T_s}{\tau} N^2 + \ln \left(\frac{\tau}{T_w} \right) N - \ln \frac{\text{MTBF} \cdot \tau}{T_C T_D} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

It can be seen, that to determinate the number N , equation (9) was modified to quadratic equation (10), where N is an unknown variable. (11) presents the roots of the quadratic equation (10).

$$N = \frac{-\ln \left(\frac{\tau}{T_w} \right) \pm \sqrt{\ln^2 \left(\frac{\tau}{T_w} \right) + 4 \frac{T_s}{\tau} \ln \frac{\text{MTBF} \cdot \tau}{T_C T_D}}}{2 T_s / \tau}. \quad (11)$$

It can be easily shown that one of the roots always has a negative value (by putting approximate powers of parameters into (11)). The final equation for the proposed latches will be:

$$N = \frac{-\ln \left(\frac{\tau}{T_w} \right) + \sqrt{\ln^2 \left(\frac{\tau}{T_w} \right) + 4 \frac{T_s}{\tau} \ln \frac{\text{MTBF} \cdot \tau}{T_C T_D}}}{2 T_s / \tau}. \quad (12)$$

A graphical environment for the proposed automated system. A graphical environment is developed for the proposed automated system (Fig.6).

This environment helps to measure, calculate and analyze the synchronizer's parameters more easily.

The main window is titled "Calculation and analyzes of Synchronizer MTBF". It contains several input fields and sections:

- Technology library:** A text field with a "Browse" button.
- Synchronizer netlist:** A text field with a "Browse" button.
- Environment Name:** A text field.
- Minimum yeras for MTBF:** A text field with "(Years)" as a unit.
- Simulation parameters:**
 - Three checkboxes: ☐ BestCase, ☐ TypCase, ☐ WorstCase.
 - Voltage Nom.: A text field followed by "(V)".
 - Clock freq.: A text field followed by "(Hz)".
 - Data freq.: A text field followed by "(Hz)".
- Analysis:**
 - Three checkboxes: ☐ Voltage dependent analysis, ☐ Temperature dependent analysis, ☐ Frequency dependent analysis.
 - Each checkbox has associated "Min", "Max", and "Step" text fields.
- Buttons:** "Run" and "Close" buttons at the bottom right.

Fig.6. The main window of the graphical environment

In "Simulation parameters" the field designer sets up the simulation nominal voltage, data and clock frequencies, process/voltage/temperature (PVT) corners: "BestCase" (ff/+10%V/125⁰C), "TypCase" (tt/nom.voltage/25⁰C), "WorstCase" (ss/-10%V/-40⁰C).

The number of latches is proposed by the system, corresponding to the value of MTBF defined in the field "Minimum years for MTBF".

Some parameters can be chosen and analyzed, using the "Analysis" field.

When the analysis is complete and all the measurements are carried out, the automated system displays the results in a new window (Fig.7). All the results are saved in an Excel spreadsheet, which may have different sheets based on the setup.

The figure shows two windows titled "Results of Calculation". Each window has three tabs: "BestCase", "TypicalCase", and "WorstCase".

Parameter	BestCase	TypicalCase	WorstCase
Tsu	1.14E-11	1.855E-11	
Th	6.20E-12	8.47E-12	
tau	1.80E-11	2.184E-11	
Ts	4.8865E-10	4.8145E-10	
Tw	1.755E-11	2.702E-11	
MTBF	1.17E-03	4.3982E-06	
N of latches	2	3	

Fig.7. The output window of the graphical environment

In "BestCase", "TypCase" and "WorstCase" sheets' measurement and calculation, the results are presented in Fig.8.

Td	1.00E-09
Tc	1.00E-09
Tsu	1.14E-11
Th	6.20E-12
tau	1.80E-11
Ts	4.89E-10
Tw	1.76E-11
MTBF	3.68E+04 sec
	1.02E+01 hour
	1.17E-03 years
MTBF spec	2.00E+20 years
Number of latches	2

BestCase TypCase WorstCase Analysis_Charts Analysis_Results

Fig.8. The view of a single sheet of an Excel spreadsheet

The results of the selected analysis are reported in the “Analysis_Charts” and “Analysis_Results” sheets. Based on the values of the “Analysis_Results” (Fig.9), some diagrams are generated (Fig.10) which are saved in the “Analysis_Charts” sheet.

Voltage	0.8	Voltage	0.87	Voltage	0.94	Voltage	
Td	1.00E-09	Td	1.00E-09	Td	1.00E-09	Td	
Tc	1.00E-09	Tc	1.00E-09	Tc	1.00E-09	Tc	
Tsu	1.75E-11	Tsu	1.56E-11	Tsu	1.43E-11	Tsu	
Th	8.20E-12	Th	8.10E-12	Th	7.90E-12	Th	
tau	1.97E-11	tau	1.92E-11	tau	1.87E-11	tau	
Ts	4.825E-10	Ts	4.84E-10	Ts	4.86E-10	Ts	
Tw	2.566E-11	Tw	2.37E-11	Tw	2.22E-11	Tw	
MTBFn	1.65E+03 sec	MTBFn	3.71E+03 sec	MTBFn	8.60E+03 sec	MTBFn	
	4.59E-01 hour		1.03E+00 hour		2.39E+00 hour		
	5.24E-05 year		1.18E-04 year		2.73E-04 year		
Temperature	-40	Temperature	-20	Temperature	0	Temperature	
Td	1.00E-09	Td	1.00E-09	Td	1.00E-09	Td	
Tc	1.00E-09	Tc	1.00E-09	Tc	1.00E-09	Tc	
Tsu	1.20E-11	Tsu	1.18E-11	Tsu	1.18E-11	Tsu	
Th	7.30E-12	Th	7.00E-12	Th	7.00E-12	Th	
tau	1.93E-11	tau	1.92E-11	tau	1.92E-11	tau	
Ts	4.881E-10	Ts	4.88E-10	Ts	4.88E-10	Ts	
Tw	1.925E-11	Tw	1.88E-11	Tw	1.88E-11	Tw	
MTBFn	4.99E+03 sec	MTBFn	5.86E+03 sec	MTBFn	5.90E+03 sec	MTBFn	
	1.39E+00 hour		1.63E+00 hour		1.64E+00 hour		
	1.58E-04 year		1.86E-04 year		1.87E-04 year		
Frequency	100 meg	Frequency	200 meg	Frequency	500 meg	Frequency	
Td	1.00E-09	Td	1.00E-09	Td	1.00E-09	Td	
Tc	1.00E-08	Tc	5.00E-09	Tc	2.00E-09	Tc	
Tsu	1.14E-11	Tsu	1.14E-11	Tsu	1.14E-11	Tsu	
Th	6.20E-12	Th	6.20E-12	Th	6.20E-12	Th	
tau	1.80E-11	tau	1.80E-11	tau	1.80E-11	tau	

BestCase TypCase WorstCase Analysis_Charts Analysis_Results

Fig.9. The view of the “Analysis_Results” sheet

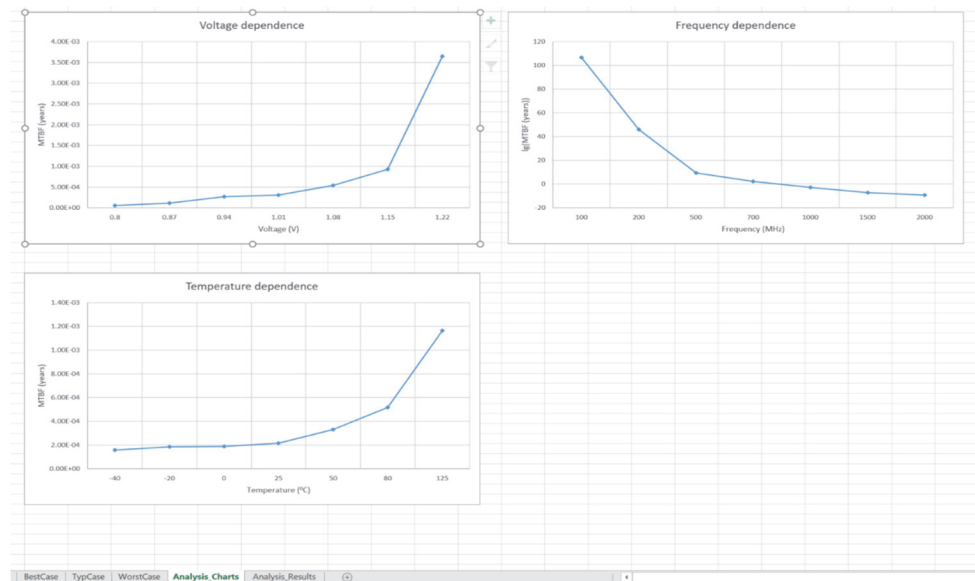


Fig.10. The view of the “Analysis_Charts” sheet

The overall working time of the proposed automated system for all selected options is 1 min. 12 sec.

The results of the proposed method are compared with the manual measurements for the typical corner (Table).

Table

Comparison of the manual and proposed methods

Type of measurement	T _{SU} (ps)	T _H (ps)	τ (ps)	T _S (ps)	T _W (ps)	MTBF (years)
Manual	17.9	9.3	21.3	481	27.2	7.8*10 ⁻⁶
Proposed automated system	18.6	8.4	21.8	481.5	27	4.4*10 ⁻⁶

Conclusion. Metastability parameter measurements, and MTBF calculation methods are researched. A new automated system is developed for measuring the mentioned parameters and MTBF calculation. The system proposes the minimum number of latches to meet the design specification. The proposed automated system analyzes the synchronizer and generates appropriate reports and graphics.

REFERENCES

1. **Melikyan, V., Babayan, E., Khazhaky, T., Manukyan, S.** Analysis of the impact of metastability phenomenon on the latency and power consumption of synchronizer circuits // East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – 2016 IEEE. – P. 1-3.
2. **Baker R.J.** CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation. – 2010.

3. **Jones I.W., Yang S., Greenstreet M.** Synchronizer behavior and analysis // Asynchronous Circuits and Systems, 2009. ASYNC'09: 15th IEEE Symposium on. – IEEE, 2009. – P. 117-126.
4. **Chong A.B.** Product Level MTBF Calculation // Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS): 2014 5th International Conference on. – IEEE, 2014. – P. 749-754.
5. Variability in multistage synchronizers/ **S. Beer, J. Cox, R. Ginosar, et al** // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2015. – №. 12. – P. 2957-2969.
6. **Mak T.** Truncation error analysis of MTBF computation for multi-latch synchronizers // Microelectron. J. – 2012.-Vol. 43, no. 2. – P. 160-163.
7. **Thote V.S., Khetade V.E.** Modified synchronizer for protection from metastability // Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT): IEEE International Conference. –2016. – P. 1393-1397.

“Synopsys Armenia” CJSC. The material is received 16.10.2018.

Ջ.Մ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ

ՄԻԱԿԱՄԿԱՂ ՄԻՆՔՐՈՆԱՑՆՈՂ ՍԱՐՔԵՐՈՒՄ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԸՆԿԱԾ ԺԱՄԱՆԱԿԱՀԱՏՎԱԾԻ ՉԱՓՈՒՄ, ՀԱՇՎԱՐԿ ԵՎ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ՝ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ

Բյուրեղի վրայի համակարգերում տարբեր սինքրոնազանշանային տիրույթներում աշխատող հանգույցներն անհրաժեշտ է սինքրոնացնել: Դրա համար գոյություն ունեն հատուկ սխեմաներ՝ սինքրոնացնող սխեմաներ: Քանի որ հնարավոր չէ կանխատեսել մեկ այլ սինքրոնազանշանային տիրույթում գեներացված ազդանշանի ժամանման պահը, սինքրոնացնող սխեմաներում կարող են առաջանալ մետակայուն վիճակներ: Մետակայունությունը կարող է հանգեցնել հաջորդ սխեմաների խափանմանը, որն իր հերթին կարող է հանգեցնել ամբողջ համակարգի ոչ ճիշտ աշխատանքին: Հետևաբար, շատ կարևոր է ինտեգրալ սխեմայի նախագծման և ստուգման փուլում գնահատել խափանումների հավանականությունը (խափանումների միջև ընկած ժամանակահատվածը՝ *ԽՄԸԺ*):

Ուսումնասիրվել են մետակայուն վիճակի պարամետրերի չափման և *ԽՄԸԺ*-ի հաշվարկի մեթոդները: Նախագծի ստուգման ռեսուրսները խնայելու համար առաջարկվել է ավտոմատացված համակարգ, որը չափում և հաշվում է վերոնշյալ պարամետրերը, կատարում է սինքրոնացնող սխեմայի պարամետրերի վերլուծություն:

Առանցքային բառեր. խափանումների միջև ընկած ժամանակահատված, բազմասինքրոնազանշանային բյուրեղի վրայի համակարգ, սինքրոնացնող սխեմա, ժամանակային պարամետրեր, չափում, ավտոմատացված համակարգ:

З.М. АВЕТИСЯН

**ИЗМЕРЕНИЕ, РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ В
ОДНОКАСКАДНЫХ СИНХРОНИЗАТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ**

В системах на кристалле узлы, работающие в различных синхросигнальных областях, нуждаются в синхронизации. Для этого существуют специальные схемы, называемые синхронизаторами. Так как время прибытия сигнала даты, генерированного в другой синхросигнальной области, невозможно предвидеть, в синхронизаторах могут возникнуть метастабильные состояния. Метастабильность может привести к сбоям в последующих схемах и, как следствие, к сбою общей системы. Следовательно, на этапе проектирования и верификации интегральной схемы очень важно оценить вероятность сбоев (наработок на отказ - ННО).

В рамках статьи исследованы методы измерения параметров метастабильного состояния и расчета ННО. Для сбережения ресурсов верификации проекта предложена автоматизированная система, которая измеряет и вычисляет вышеупомянутые параметры, анализирует параметры синхронизатора.

Ключевые слова: наработка на отказ, многосинхросигнальная система на кристалле, синхронизатор, временные параметры, измерение, автоматизированная система.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱԿՈՐՑԱՆ Ն.Գ.

ՏԱՐԲԵՐ ԾԱԿՈՏԿԵԼՈՒԹՅԱՄԲ ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԾՈՒՄԱՆ ԵՆԹԱՐԿՎԱԾ ՇԵՐՏԵՐԻ ՇՐՋԱՆԱՅԻՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ.....	241
--	-----

ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Հ., ՍԱՍՈՒՆՅՅԱՆ Մ.Է., ՍԱՀԱԿՅԱՆ Ն.Գ.

ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԻՆՔՆԱՏԱՐԱԾՎՈՂ ՄԻՆԹԵՋԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԵՐԿԱԾՈՎ ԵՎ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄՈՎ ԼԵԳԻՐՎԱԾ MAX-ՖԱՋԻ ՓՈՇՈՒ ՍՏԱՅՈՒՄԸ	248
---	-----

ՋԱՔԱՐՅԱՆ Է.Գ.

ԹԵՂՈՒՏԻ ՆԱԽԱՊԵՍ ՄԵԽԱՆԱԱԿՏԻՎԱՅՎԱԾ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՅԻՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹՅ ՖԵՐՈՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՍՏԱՅՄԱՆ ԳՈՐԾՇՆԹԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	259
--	-----

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ Ն.Գ., ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ Գ.Ն.

ԲԱԶՄԱԲԱՂԱԴՐԻՉ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ ԱՍԲԵՍՏԱԶԵՐԾ ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ ՋԵՐՄԱԿԱՅՈՒՆ ԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ ՇՓԱՆՑՈՒԹԵՐԻ ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	268
---	-----

ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Ռ.Ռ., ԴԱԼԼԱՔՅԱՆ Վ.Կ.

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ՖԵՆԵԼԱՅԻՆ ԳԾԱՅԻՆ ԱՆԴՐԱԴԱՋՆՈՂ ԿՈՆՑԵՆՏՐԻՉԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ.....	281
--	-----

ԳՆՈՒՆԻ Տ.Ս., ԿՈԼՅԱՆ Գ.Լ.

ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՏԱՐՐԵՐԻ ԾԱՌԱՅՈՒԹՅԱՆ ՄՆԱՅՈՐԴԱՅԻՆ ԺԱՄԿԵՏԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ	290
---	-----

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ռ.Գ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Լ.Ս., ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ա.Գ.

ՎԱՌԵԼԻՔԻ ԼՐԱՅՐՄԱՆ ԱՍՏԻՃԱՆԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՀԱՄԱԿՅՎԱԾ ՑԻԿԼՈՎ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆՆԵՐՈՒՄ	300
---	-----

ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Պ.Հ., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Լ.Ա.

ԿՈՄԲԻՆԱՅՎԱԾ ՇՐՋԱԴԻՐՆԵՐՈՎ ԵՎ ՋՐԱՅԻՆ ՀՈՎԱՅՈՒՄՈՎ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ	311
--	-----

ԱԲՐՈՅԱՆ Ն.Հ., ՄՈՐԱԼ Ս.Կ.

ՀԻԲՐԻԴԱՅԻՆ ԴԻՍԿՐԻՄԻՆԱՏԻՎ-ԳԵՆԵՐԱՏԻՎ ՄՈՆԻԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ԻՐԱԿԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿԻ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ԴԱՄԱԿԱՐԳՄԱՆ ՀԱՄԱՐ	320
--	-----

ԵՍԱՅԱՆ Ա.Է.

ԷԼԵԿՏՐԱՍՏԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԵԼՔԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՄՈՆԻԵՐԱՎՈՐՈՒՄԸ SOI FinFET-ՈՒՄ	330
--	-----

ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ Հ.Վ.

F ՏԻՊԻ ԻՆՎԵՐՄՄԱՄԲ ՄԻԿՐՈՇԵՐՏԱՎՈՐ ՀԻԲՐԻԴԱՅԻՆ ՊԱՐՈՒՐԱՋԵՎ ԱՆՏԵՆԱ ՀԵՌԱԲԺՇԿԱԿԱՆ ԱՆԼԱՐ ՑԱՆՑԵՐԻ ՀԱՄԱՐ	341
--	-----

ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ., ԱՂԱՍՅԱՆ Մ.Ա.

ԳԾԱՅԻՆ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՎԵՐՋԱՎՈՐ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՆՎԱԶԱԳՈՒՅՆ ՔԱՌԱԿՈՒՄԻՆԵՐԻ ՄԵԹՈԴԻ ՀԱՄԱԼՈՒԾ ՆՄԱՆԱԿԸ	354
---	-----

ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Ֆ.Պ.

ՇԱՏ ԿՈՄՊԼԵՔՍ ՓՈՓՈԽԱԿԱՆՆԵՐԻ ՓՈԽԱՆՑՄԱՆ ՖՈՒՆԿՑԻԱՆԵՐ: I	367
---	-----

ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Զ.Մ.

ՄԻԱԿԱՍԿԱԴ ՄԻՆՔՐՈՆԱՅՆՈՂ ՍԱՐՔԵՐՈՒՄ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԸՆԿԱԾ ԺԱՄԱՆԱԿԱՀԱՏՎԱԾԻ ՉԱՓՈՒՄ, ՀԱՇՎԱՐԿ ԵՎ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ՝ ԱՎՏՈՍԱՏԱՅՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ.....	374
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

АКОПЯН Н.Г.

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОКРУЖНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СПЕЧЕННОЙ ПОЛОСЫ С РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ, ПОДВЕРГНУТОЙ ИЗГИБУ	241
---	-----

МАРТИРОСЯН В.А., САСУНЦЯН М.Э., СААКЯН Н.Г.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ МАХ-ФАЗ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ И КРЕМНИЕМ, МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА	248
---	-----

ЗАКАРЯН Э.Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМОЛИБДЕНА ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ТЕХУТСКОГО МОЛИБДЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА	259
---	-----

АГБАЛАН С.Г., МЕЛИКСЕТАН Н.Г., МЕЛИКСЕТАН Г.Н.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗАСБЕСТОВЫХ ТОРМОЗНЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ ФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	268
--	-----

ВАРДАНЫ Р.Р., ДАЛЛАКЯН В.К.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ФРЕНЕЛЬНОГО ЛИНЕЙНО-ОТРАЖАЮЩЕГО КОНЦЕНТРАТОРА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ	281
--	-----

ГНУНИ Т.С., КОЛАН Г.Л.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ	290
---	-----

ХАЧАТРЯН Р.Г., ОГАНЕСЯН Л.С., ХАЧАТРЯН А.Г.

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ДОЖИГАНИЯ ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО ЦИКЛА	300
---	-----

ХАЧАТРЯН П.О., ВАРДАНЫ Л.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ОБКЛАДКАМИ И ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ	311
---	-----

АБРОЯН Н.О., МОРАЛ С.К.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ДИСКРИМИНАЦИОННО-ГЕНЕРАТИВНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	320
--	-----

ЕСАЯН А.Э.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ И ВЫХОДНОГО ТОКА SOI FinFET	330
---	-----

АБРААМЯН Г.В.

МИКРОПОЛОСКОВАЯ ГИБРИДНАЯ СПИРАЛЬНАЯ АНТЕННА ИНВЕРТИРОВАННОГО ТИПА F ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ	341
--	-----

СИМОНЯН С.О., АДАМЯН М.А.	
СОПРЯЖЕННЫЕ АНАЛОГИ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНЕЧНЫХ УРАВНЕНИЙ	354
ГРИГОРЯН Ф.П.	
ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ МНОГИХ КОМПЛЕКСНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ. I	367
АВЕТИСЯН З.М.	
ИЗМЕРЕНИЕ, РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ В ОДНОКАСКАДНЫХ СИНХРОНИЗАТОРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ	374

CONTENTS

AKOBYAN N.G. THE PACULIARITIES OF DEFINING THE CIRCUMFERENTIAL STRESS OF A SINTERED STRIP WITH VARYING POROSITY.....	241
MARTIROSYAN V.H., SASUNTSYAN M.E., SAHAKYAN N.G. OBTAINING MAX-PHASE POWDERS DOPED WITH IRON AND SILICON BY THE METHOD OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS.....	248
ZAKARIAN E.G. INVESTIGATING THE PROCESS OF OBTAINING FERROMOLYBDENUM FROM THE TEGHUT PRELIMINARILY MECHANOACTIVATED MOLYBDENITE CONCENTRATE	259
AGHBALYAN S.G., MELIKSETYAN N.G., MELIKSETYAN G.H. DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING ASBESTOS-FREE BRAKE HEAT-RESISTANT FRICTION COMPOSITES APPLYING MULTICOMPONENT MATERIALS.....	268
VARDANYAN R.R., DALLAKYAN V.K. ANALYSIS OF PARAMETERS OF LINEAR FRESNEL REFLECTOR SOLAR ENERGY CONCENTRATOR	281
GNUNI T.S., KOLYAN G.L. DEFINING THE ENERGY SYSTEM ELEMENT RESIDUAL SERVICE LIFE UNDER THE CONDITIONS OF UNCERTAINTY	290
KHACHATRYAN R.G., HOVHANNISYAN L.S., KHACHATRYAN A.G. PECULIARITIES OF DETERMINING THE DEGREE OF SUPPLEMENTARY FIRING IN COMBINED CYCLE THERMAL POWER PLANTS	300
KHACHATRYAN P.H., VARDANYAN L.A. INVESTIGATION OF CAPACITORS WITH COMBINED COATINGS AND WATER COOLING	311
ABROYAN N.H., MORAL S.C. USING A HYBRID DISCRIMINATIVE-GENERATIVE MODEL FOR CLASSIFICATION OF REAL-TIME DATA.....	320
YESAYAN A.E. MODELING OF ELECTROSTATICS AND DRAIN CURRENT SOI FinFET	330
ABRAHAMYAN H.V. A HYBRID PLANAR INVERTED-F SPIRAL ANTENNA FOR IN-BODY WIRELESS AREA NETWORKS	341
SIMONYAN S.H., ADAMYAN M.A. SUBJECTIVE ANALOGUES OF THE METHOD OF THE MINIMAL QUADRATIC SOLUTION OF LINEAR ONE-PARAMETRIC SYSTEMS OF FINITE EQUATIONS	354
GRIGORYAN F.P. TRANSMITTING FUNCTIONS OF MANY COMPLEX VARIABLES. I.....	367
AVETISYAN Z.M. MEASUREMENT, CALCULATION AND ANALYSIS OF MTBF FOR SINGLE-STAGE SYNCHRONIZERS USING AN AUTOMATED SYSTEM	374