

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

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 75

N 1

ՀՈՒՆՎԱՐ – ՄԱՐՏ

ԵՐԵՎԱՆ 2022

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 75

N 1

ЯНВАРЬ – МАРТ

ЕРЕВАН 2022

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 75

N 1

JENUARY - MARCH

YEREVAN 2022

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

Գլխավոր խմբագիր՝ Մելիքյան Վ.Շ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գլխ. խմբագրի տեղակալ՝ Գրիգորյան Ա.Խ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պատասխանատու քարտուղար՝ Մեյրանյան Ժ.Ս., ՀՀ
Խմբագրական կոլեգիա՝
Աղբալյան Ս.Գ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ասլանյան Լ.Հ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Ն.Պ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Բաղդասարյան Հ.Վ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Բաղդասարյան Ս.Ք., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Գագարինսկի Ա.Յու., ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Գոնեւմա Ս., տ.գ.թ., Եգիպտոս
Գրիմբլաթ Վ., տ.գ.թ., Չիլի
Դոկիչ Բ., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա
Ջորյան Ե., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Իյուշենկո Ա.Ֆ., Բելառուսի ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Լան Զ., տ.գ.թ., Չինաստան
Կրասնիկով Գ.Յ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Կուրտուա Բ., տ.գ.թ., Ֆրանսիա
Հախումյան Ա.Ա., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Հակոբյան Վ.Ն., ֆ.-մ.գ.դ., ՀՀ
Հահանով Վ.Ի., Կիրառական ռադիոէլեկտրոնիկայի Ուկրաինայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ.,
Ուկրաինա
Ղույան Ա.Գ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Մանդալիկա Ս., տ.գ.թ., Հնդկաստան
Մարուխյան Ռ.Զ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ
Միխայլենիչ Ա.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս
Շիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա
Չանգ Ֆ., Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան
Չապլիգին Յու.Ա., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Պետրոսյան Օ.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Պետրոսյանց Կ.Օ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Սապատնեկար Ս., տ.գ.թ., ԱՄՆ
Մարգարյան Յու.Լ., ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Սքիտնն Ս.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Միմոնյան Ս.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ
Ստեմպկովսկի Ա.Լ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Վորոբյով Ա.Ե., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ
Տիխոմիրով Գ.Վ., ֆ.-մ.գ.դ., ՌԴ
Ցանովա Ս., տ.գ.թ., Բուլղարիա
Ուբար Բ., Էստոնիայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Էստոնիա
Ուսանով Վ.Ի., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: Melikyan V.Sh., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia
Deputy Editor-in-Chief: Grigoryan A.Kh., Sci.Dr., Prof., Armenia
Executive Secretary: Seyranyan Zh.S., Armenia
Editorial Board:
Aghbalyan S.G., Sci.Dr., Prof., Armenia
Aslanyan L.H., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia
Badalyan N.P., Sci.Dr., Prof., Russia
Baghdasaryan H.V., Sci.Dr., Prof., Armenia
Baghdasaryan M.Q., Sci.Dr., Prof., Armenia
Chang F., Member of National Academy of Taiwan, Sci.Dr., Taiwan
Chaplygin Yu.A., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia
Courtois B., Ph.D., France
Dokic B., Sci.Dr., Bosnia and Herzegovina
Gagarinski A.Yu., Sci.Dr., Prof., Russia
Ghoneima M., Ph.Dr., Egypt
Ghulyan A.G., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia
Grimblatt V., Ph.Dr., Chile
Hahanov V.I., Academician of Academy of Sciences of Ukraine in Applied Radioelectronics, Sci.Dr., Prof., Ukraine
Hakhumyan A.A., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia
Hakobyan V.N., Sci.Dr., Armenia
Ilyushenko A.F., Corr.member of NAS of Belarus, Sci.Dr., Prof., Belarus
Krasnikov G.Y., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia
Lan Ch., Ph.Dr., China
Mandalika S., Ph.Dr., India
Marukhyan V.Z., Ph.Dr., Prof., Armenia
Mikhaylevich A.A., Sci.Dr., Prof., Belarus
Petrosyan O.H., Sci.Dr., Prof., Armenia
Petrosyants K.O., Sci.Dr., Prof., Russia
Sapatnekar S., Ph.Dr., USA
Sargsyan Yu.L., Academician of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia
Sbitnev S.A., Sci.Dr., Prof., Russia
Schlichtmann U., Ph.Dr., Germany
Simonyan S.H., Sci.Dr., Prof., Armenia
Stempkovski A.L., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia
Tikhomirov G.V., Sci.Dr., Russia
Tsanova S., Sci.Dr., Bulgaria
Ubar R., Academician of Academy of Sciences of Estonia, Sci.Dr., Prof., Estonia
Usanov V.I., Sci.Dr., Prof., Russia
Vorobyov A.Y., Sci.Dr., Prof., Russia
Zorian Y., Ph.Dr., USA

Հրատ. խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

Ժ.Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2022

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Меликян В.Ш., член-корр. НАН РА, д.т.н., проф., Армения

Заместитель главного редактора Григорян А.Х., д.т.н., проф., Армения

Ответственный секретарь Сейранян Ж.С., Армения

Редколлегия:

Агбалян С.Г., д.т.н., проф., Армения

Акопян В.Н., д.ф.-м.н., Армения

Асланиян Л.А., член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

Ахумян А.А., член-корр. НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

Багдасарян М.К., д.т.н., проф., Армения

Багдасарян О.В., д.т.н., проф., Армения

Бадалян Н.П., д.т.н., проф., Россия

Воробьев А.Е., д.т.н., проф., Россия

Гагаринский А.Ю., д.ф.-м.н., проф., Россия

Гонейма М., к.т.н., Египет

Гримблат В., к.т.н., Чили

Гулян А.Г., академик НАН РА, д.ф.-м.н., проф., Армения

Докич Б., д.т.н., Босния и Герцеговина

Зорян Е., к.т.н., США

Ильющенко А.Ф., член-корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф., Беларусь

Красников Г.Я., академик РАН, д.т.н., проф., Россия

Куртуа Б., к.т.н., Франция

Лан Ч., к.т.н., Китай

Мандалика С., к.т.н., Индия

Марухян В.З., к.т.н., проф., Армения

Михайлович А.А., д.т.н., проф., Беларусь

Петросян О.А., д.т.н., проф., Армения

Петросянц К.О., д.т.н., проф., Россия

Сапатнекар С., к.т.н., США

Саркисян Ю.Л., академик НАН РА, д.т.н., проф., Армения

Сбитнев С.А., д.т.н., проф., Россия

Симонян С.О., д.т.н., проф., Армения

Стемпковский А.Л., академик РАН, д.т.н., проф., Россия

Тихомиров Г.В., д.ф.-м.н., Россия

Убар Р., академик НАН Эстонии, д.т.н., проф., Эстония

Усанов В.И., д.т.н., проф., Россия

Хаханов В.И., академик Академии наук Украины по прикладной радиоэлектронике, д.т.н., проф., Украина

Цанова С., к.т.н., Болгария

Чанг Ф., академик Национальной академии Тайваня, д.т.н., Тайвань

Чаплыгин Ю.А., академик РАН, д.т.н., проф., Россия

Шлихтманн У., к.т.н., Германия

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

2022

1

ՀԱՏՈՐ

TOM 75
VOLUME

ՀՈՒՆՎԱՐ - ՄԱՐՏ

ЯНВАРЬ – МАРТ
JENUARY - MARCH

Հրատ. Խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

ԺԱՆՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՅԱՆ

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 07.06.2022

Թուղթը՝ «օֆսեթ»։ Տպագրությունը՝ դիզոն: Ֆորմատ՝ (70×100) 1/16:

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 10.25 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 136: Տպաքանակ՝ 200

Հայաստանի Ազգային

Պոլիտեխնիկական

Համալսարանի

«Պոլիտեխնիկ»

տպագրահրատարակչություն

Երևան, Տերյան 105

Типографско-

издательский центр

«Политехник»

Национального

политехнического

университета Армении

Ереван, ул. Теряна 105,

“Polytechnic” Publishing – House

National Polytechnic University of
Armenia

105 Teryan str. Yerevan

polytechpolygraph@gmail.com

Գ.Լ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Հ.Ս. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Մ.Ա. ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ, Ա.Ա. ԲԱԲԱՅԱՆ
ԵՌԱԿԱԼ ՎԱԾ ԱՍՏԻՃԱՆԱԶԵՎ ԿԼՈՐ ՁՈՂԻ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ
ԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՎԻՃԱԿԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳՉԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Մոդելավորվել է եռակալված կլոր հատույթով աստիճանաձև նմուշի արտամղման չկայունացված գործընթացի սկզբնական ժամանակաշրջանի դեպքը «ABAQUS» ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում: Գլանական նմուշի վերնի ճակատը ուղղահայաց ուղղությամբ հավասարաչափ տեղափոխվել է, որի հետևանքով այն դեֆորմացվել է: Ստացվել են Միզեսի լարման, դեֆորմացիաների ինտենսիվության, դեֆորմացիոն վիճակի բաղադրիչների և նյութի ծակոտկենության բաշխման գոտիները: Որոշվել են մամլամայր մտնելիս ($e-e$) և մամլամայրից դուրս գալիս ($ա-ա$) յոթական հանգույցների, դրանցից վերնի ու ներքնի վեցական տարրերի տվյալները: Բոլոր դեֆորմացիաների բաղադրիչները ծայրագույն արժեքներին հասնում են կոնական մամլամայրի հետ ձողի հպման գոտիներում:

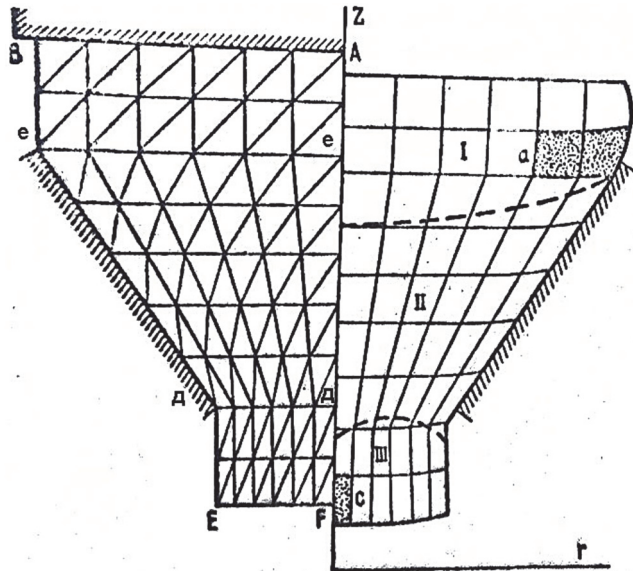
Դրանք հնարավորություն են տվել կառուցել $e-e$ և $ա-ա$ հատույթների վերնի տարրերի տվյալներով դեֆորմացիաների բաղադրիչների և դրանց հանգույցների ծակոտկենության փոփոխության գրաֆիկները: Դրանցից ամենամեծերը $e-e$ - ի գոտում սահքի և առանցքային սեղմող դեֆորմացիաներն են: $ա-ա$ - ի գոտում սահքի դեֆորմացիաները $e-e$ - ի նկատմամբ շատ փոքր են և փոխել են իրենց նշանը: Մյուս տվյալները որակապես համընկնում են ՅBM EC 1022 – ի վրա ՓՕՊԵԱԿ – IV ալգորիթական լեզվով կազմված ծրագրով հաշվարկված տվյալների հետ:

Առանցքային բառեր. եռակալված նյութ, ծակոտկենություն, արտամղում, դեֆորմացիոն վիճակ, համակարգչային մոդելավորում:

Ներածություն: Ներկայումս պլաստիկության տեսության տեխնոլոգիական խնդիրները լուծվում են վերլուծական մեթոդներով և ավտոմատացված ծրագրային միջավայրում (ԱՕՄ) մոդելավորմամբ: Եռակալված նյութից զլանական նախապատրաստվածքների արտամղման գործընթացների հետազոտումը վերլուծական եղանակով բավականին բարդ է՝ քիչ հետազոտված նյութում ծակոտկենության առկայության պատճառով [1]: ԱՕՄ – ում մոդելավորումը հնարավորություն է տալիս կարճ ժամանակում ստանալ բավականին մեծ ճշտությամբ արդյունքներ: Մոդելավորման նպատակահարմարությունն ապացուցվել է բազմաթիվ գիտագործնական աշխատանքների արդյունքներով: Մասնավորապես, կարելի է նշել «ABAQUS» -ի միջավայրում կատարված [2,3] աշխատանքները: Երբեմն, կախված խնդիրների տեսակից, դրանց լուծումներում օգտագործում են վերլուծական եղա-

նակի և ԱԾՄ-ի համադրման մեթոդները [4]: Ընդ որում, ԱԾՄ – ում մոդելավորմամբ լուծված հետազոտությունների մեծ մասում, ինչպես նաև [2-4] – ում հիմնականում ուսումնասիրվել և վերլուծվել են տեխնոլոգիական գործընթացների լարվածային վիճակները:

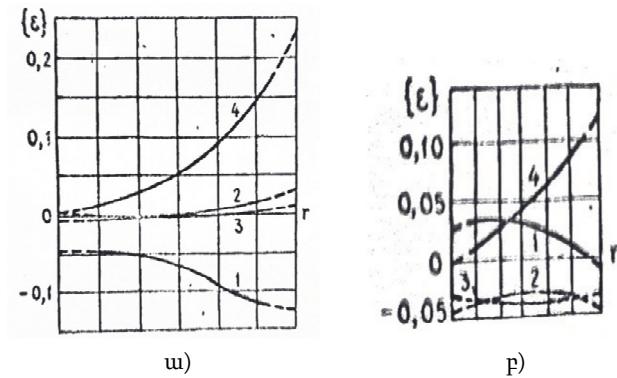
[5,6] – ում, օգտագործելով [1] – ում բերված եռակալված նյութերի համար մշակված վերջավոր տարրերի մեթոդի (ՎՏՄ) առանձնահատկությունները, հետազոտվել է աստիճանաձև կլոր հատույթով ձողի արտամղման գործընթացի սկզբնական չկայունացված ժամանակաշրջանի դեպքը (նկ.1): Հիմնականում կատարվել են դեֆորմացիոն վիճակի հաշվարկներ՝ ՅՅՄ EC 1022 – ի վրա ՓՕՐՏԵԱԿ – IV ալգորիթմական լեզվով կազմված ծրագրով:



Նկ.1. Փոփոխական հատույթով դեֆորմացված գլանական նախապատրաստվածքի առանցքային հատույթը

Ինչպես տեսնում ենք, $e-e$ հատույթում նախապատրաստվածքի դեֆորմացիաների բաղադրիչները բավականին մեծ են $A-A$ – ում առաջացածների համեմատ: Ամենամեծ դեֆորմացիան սահքինն է, այնուհետև՝ առանցքայինը, որի նշանը $e-e$ – ում բացասական է (կարճացում), իսկ $A-A$ – ում՝ դրական (երկարացում): Սակայն բացակայում են տվյալները տեխնոլոգիական գործընթացի ամենակարևոր հպակային գոտու՝ վեցերորդ տարրի վերաբերյալ:

Նշենք, որ [6] – ում բերված կլոր հատույթով ձողի դեֆորմացիաների բաղադրիչների բաշխման նկ. 2 –ի տվյալներն օգտագործվել են մենուղորդված թելիկներով ամրանավորած բարձրորակ կոմպոզիցիոն նյութերի ստացման համար:



Նկ. 2. Առանցքային (1), շառավղային (2), շրջանային (3) և սահքի (4) դեֆորմացիաների գրաֆիկները (ա՝ e-e և բ՝ ժ-ժ հատույթների դեպքում)

Ինչ վերաբերում է այդ խնդրի ԱԾՄ – ում մոդելավորմանը, ապա այն ամբողջապես չի ուսումնասիրվել, հետևաբար՝ այդ ուղղությամբ աշխատանքներն արդիական են:

Աշխատանքի նպատակն է եռակալված նյութից գլանական աստիճանաձև ձողի արտամղման գործընթացի սկզբնական չկայունացված ժամանակաշրջանի դեֆորմացիոն վիճակի ԱԾՄ – ում մոդելավորմամբ հետազոտումը և ստացված արդյունքների համեմատումը ՅBM EC 1022 – ի վրա ՓՕՐՏԵԱԿ – IV ալգորիթմական լեզվով կազմված ծրագրով հաշվարկած տվյալների հետ:

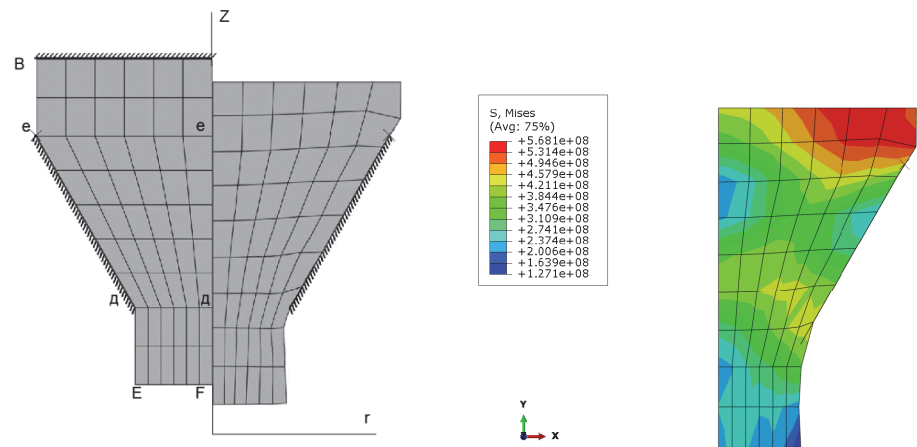
Համակարգչային մոդելավորման սկզբնական տվյալներն են. ձողի չափսերը՝ e-e հատույթի շառավղի 22,8 մմ, ժ-ժ հատույթինը՝ 10 մմ, տեղափոխությունը մամլամայրում՝ 3 մմ: Հանգույցների քանակը՝ 70, տարրերի քանակը՝ 54 և տիպը՝ CAX4R: Հպակային շփման գործակիցը՝ 0,05: Աստիճանաձև ձողի նյութի խտությունը՝ 8000 կգ/մ³, Յունգի մոդուլը՝ 210 ԳՊա, Պուասսոնի գործակիցը՝ 0,3, ծակոտկենությունը՝ 16%, իսկ նյութի դեֆորմացման գրաֆիկի (ՆԴԳ) տվյալները ներկայացված են աղ.1 - ի տեսքով:

Աղյուսակ 1

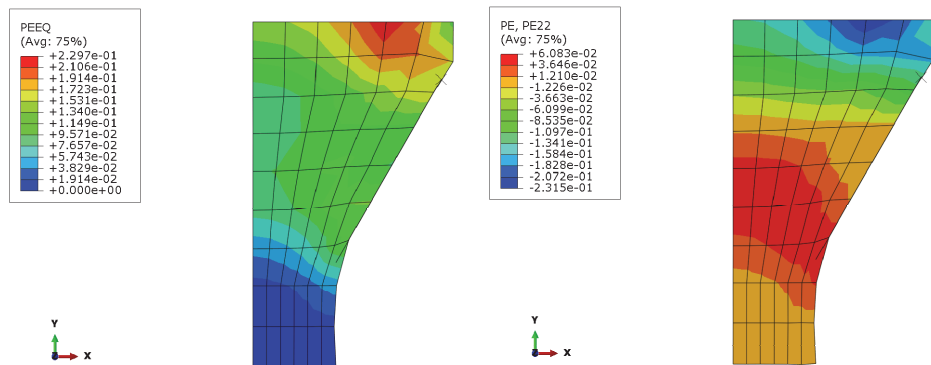
ՆԴԳ տվյալները

$\sigma_{eq}, \text{ՄՊա}$	ε_{eq}
350	0
385	0,0125
466	0,025
663	0,1
730	0,20

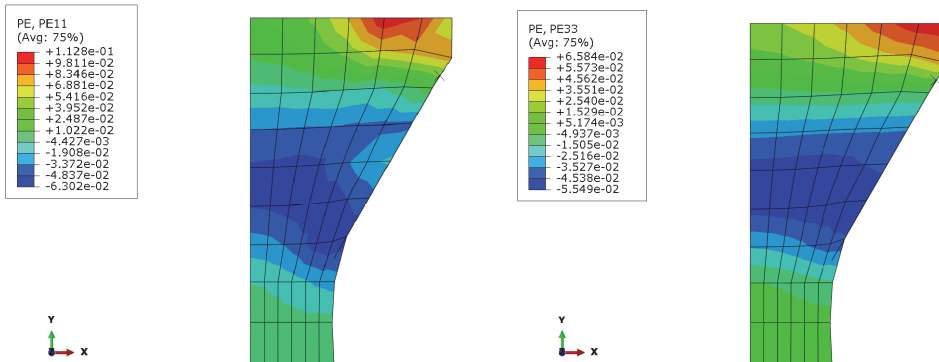
Նկ. 3 - 6 – ում բերված են համակարգչային մոդելավորման սխեման, Միզեսի լարման, դեֆորմացիաների բաղադրիչների և նյութի ծակոտկենության բաշխման գոտիները:



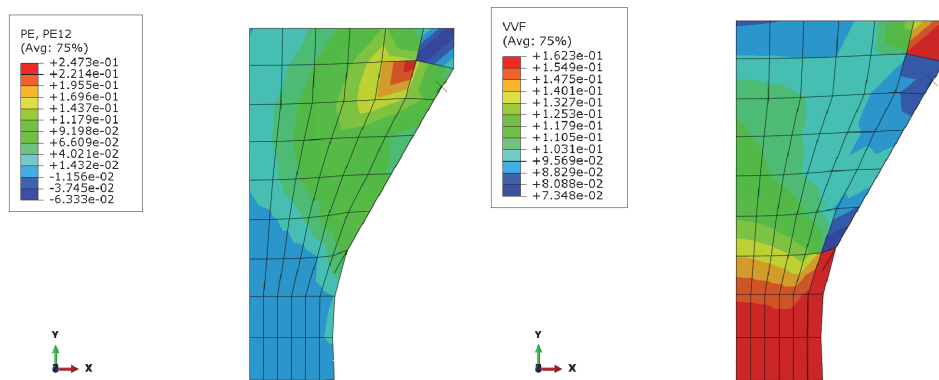
Նկ. 3. Համակարգչային մոդելավորման սխեման և Միզեսի լարման բաշխման գոտիները



Նկ. 4. Դեֆորմացիաների ինտենսիվության և առանցքային դեֆորմացիայի բաշխման գոտիները



Նկ. 5. Շառավղայի և շրջանային դեֆորմացիաների բաշխման գոտիները



Նկ. 6. Սահբի դեֆորմացիայի և նյութի ծակոտկենության բաշխման գոտիները

ԱՕՄ մոդելավորման տվյալներով e-e և ժ-ժ հատույթների յոթ հանգույցներում և դրանց վերևի ու ներքևի տարրերում (նկ. 3-6) որոշվել են Միզեսի լարման, դեֆորմացիաների ինտենսիվության և բաղադրիչների, ինչպես նաև նյութի ծակոտկենության արժեքները (աղ. 2-7):

Աղյուսակ 2

e-e հատույթի վերևի տարրերի տվյալները

Տարր	S, Mises, σ_i	PEEQ, ε_i	PE11, ε_r	PE22, ε_z	PE33, ε_θ	PE12, γ_{rz}	VVF, v
1	2.93E+08	8.99E-02	2.27E-03	-6.46E-02	8.58E-05	2.45E-02	1.06E-01
2	3.63E+08	1.03E-01	6.69E-03	-7.46E-02	3.13E-03	6.22E-02	1.04E-01
3	4.30E+08	1.25E-01	1.50E-02	-8.91E-02	6.43E-03	1.13E-01	1.00E-01
4	4.88E+08	1.51E-01	2.06E-02	-1.00E-01	9.78E-03	1.77E-01	9.89E-02
5	5.55E+08	1.85E-01	2.75E-02	-1.12E-01	1.22E-02	2.47E-01	9.69E-02
6	5.56E+08	2.13E-01	9.06E-02	-1.89E-01	1.54E-02	1.54E-01	8.69E-02

e-e հատույթի հանգույցների տվյալները

Հանգույց	S, Mises, σ_i	PEEQ, ε_i	PE11, ε_r	PE22, ε_z	PE33, ε_θ	PE12, γ_{rz}	VVF, v
1	2.09E+08	8.00E-02	-9.87E-03	-3.80E-02	-1.10E-02	2.47E-02	1.09E-01
2	2.56E+08	8.67E-02	-9.09E-03	-4.15E-02	-1.03E-02	4.41E-02	1.07E-01
3	3.42E+08	1.03E-01	-6.08E-03	-5.00E-02	-8.70E-03	8.57E-02	1.04E-01
4	4.05E+08	1.22E-01	-3.99E-03	-5.71E-02	-7.19E-03	1.28E-01	1.00E-01
5	4.53E+08	1.43E-01	-7.90E-03	-5.73E-02	-6.84E-03	1.66E-01	9.72E-02
6	4.32E+08	1.63E-01	3.59E-03	-7.70E-02	-7.40E-03	1.44E-01	8.93E-02
7	3.87E+08	1.71E-01	1.89E-02	-9.85E-02	-7.65E-03	1.04E-01	8.34E-02

e-e հատույթի ներքնի տարրերի տվյալները

Տարր	S, Mises, σ_i	PEEQ, ε_i	PE11, ε_r	PE22, ε_z	PE33, ε_θ	PE12, γ_{rz}	VVF, v
1	1.24E+08	7.01E-02	-2.20E-02	-1.14E-02	-2.21E-02	2.50E-02	1.12E-01
2	2.42E+08	8.42E-02	-2.33E-02	-1.52E-02	-2.22E-02	6.46E-02	1.07E-01
3	3.33E+08	1.01E-01	-2.27E-02	-2.12E-02	-2.21E-02	1.03E-01	1.03E-01
4	3.71E+08	1.10E-01	-2.89E-02	-1.79E-02	-2.29E-02	1.18E-01	9.95E-02
5	4.00E+08	1.24E-01	-5.09E-02	9.70E-04	-2.65E-02	1.22E-01	9.34E-02
6	2.18E+08	1.28E-01	-5.29E-02	-7.60E-03	-3.07E-02	5.35E-02	7.98E-02

դ-դ հատույթի վերնի տարրերի տվյալները

Տարր	S, Mises, σ_i	PEEQ, ε_i	PE11, ε_r	PE22, ε_z	PE33, ε_θ	PE12, γ_{rz}	VVF, v
1	1.88E+08	1.99E-02	-1.11E-02	8.32E-03	-1.06E-02	-3.76E-03	1.49E-01
2	2.37E+08	2.40E-02	-1.43E-02	1.15E-02	-1.22E-02	-1.03E-02	1.47E-01
3	2.94E+08	3.20E-02	-2.16E-02	1.98E-02	-1.47E-02	-1.68E-02	1.46E-01
4	3.37E+08	4.33E-02	-3.14E-02	2.92E-02	-1.85E-02	-2.00E-02	1.43E-01
5	3.94E+08	5.76E-02	-4.35E-02	4.53E-02	-2.32E-02	-3.03E-02	1.42E-01
6	4.60E+08	7.65E-02	-5.66E-02	7.94E-02	-3.00E-02	-3.28E-03	1.56E-01

Աղյուսակ 6

Դ-ճ հատույթի հանգույցների տվյալները

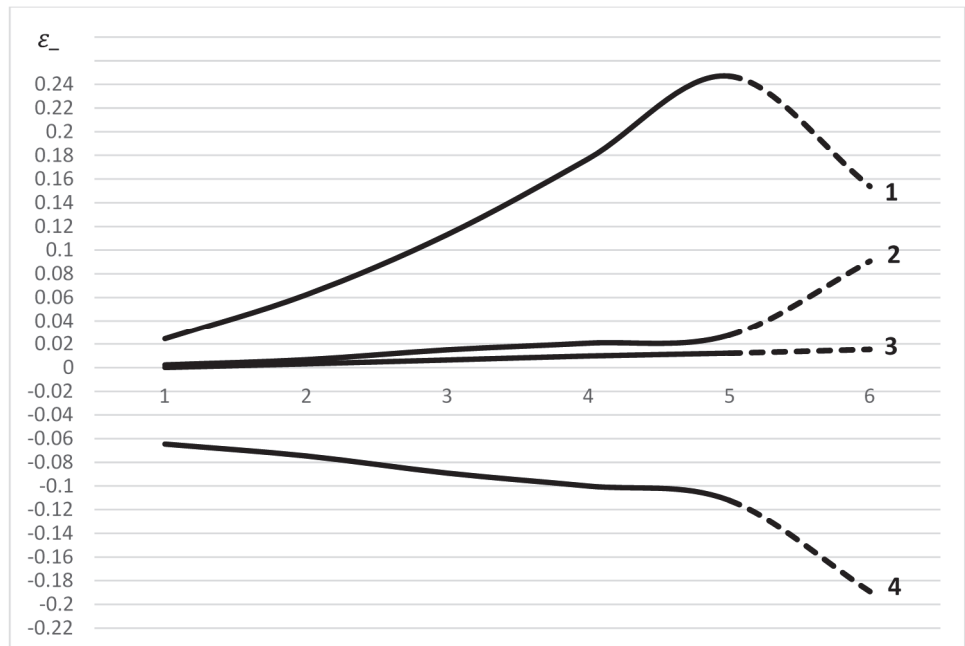
Հանգույց	S, Mises, σ_i	PEEQ, ε_i	PE11, ε_r	PE22, ε_z	PE33, ε_θ	PE12, γ_{rz}	VVF, v
1	2.19E+08	1.20E-02	-4.61E-03	1.79E-03	-4.47E-03	-1.41E-03	1.54E-01
2	2.35E+08	1.31E-02	-5.33E-03	2.57E-03	-4.81E-03	-2.95E-03	1.54E-01
3	2.67E+08	1.64E-02	-7.64E-03	5.23E-03	-5.73E-03	-6.07E-03	1.53E-01
4	2.93E+08	2.09E-02	-1.20E-02	1.01E-02	-7.27E-03	-8.50E-03	1.52E-01
5	3.12E+08	2.86E-02	-1.73E-02	1.73E-02	-9.32E-03	-8.19E-03	1.52E-01
6	3.51E+08	4.10E-02	-2.31E-02	3.05E-02	-1.20E-02	4.27E-03	1.56E-01
7	3.79E+08	4.81E-02	-2.65E-02	3.95E-02	-1.37E-02	1.56E-02	1.60E-01

Աղյուսակ 7

Դ-ճ հատույթի ներքին տարրերի տվյալները

Swpp	S, Mises, σ_i	PEEQ, ε_i	PE11, ε_r	PE22, ε_z	PE33, ε_θ	PE12, γ_{rz}	VVF, v
1	2.51E+08	4.23E-03	1.89E-03	-4.74E-03	1.66E-03	-9.38E-04	1.59E-01
2	2.63E+08	4.30E-03	2.16E-03	-4.82E-03	1.86E-03	-1.34E-03	1.60E-01
3	2.76E+08	5.12E-03	3.22E-03	-5.64E-03	2.09E-03	-1.43E-03	1.60E-01
4	2.66E+08	3.06E-03	1.64E-03	-2.97E-03	1.97E-03	-1.28E-03	1.60E-01
5	2.53E+08	1.05E-02	4.04E-03	-2.18E-03	2.42E-03	-1.62E-02	1.63E-01
6	2.98E+08	1.96E-02	3.73E-03	-3.77E-04	2.62E-03	-3.45E-02	1.65E-01

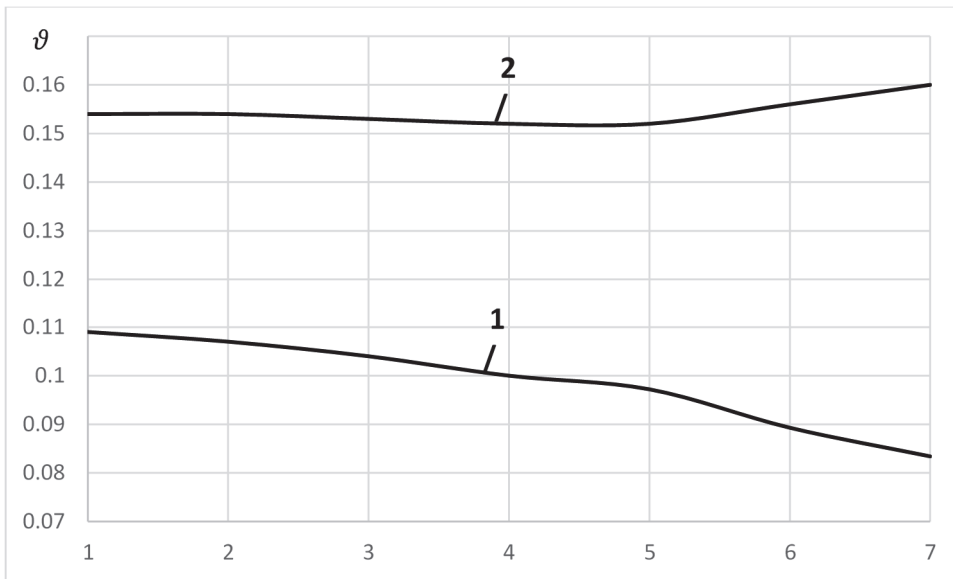
Նկ. 7 և 8 – ում բերված են e-e և Դ-ճ հատույթների վերնի տարրերի դեֆորմացիաների բաղադրիչների գրաֆիկները, իսկ նկ. 9 – ում՝ դրանց հանգույցների տվյալներով կառուցված ծակոտկենության փոփոխության գրաֆիկները:



Նկ. 7. e-e հատույթի վերնի տարրերի տվյալներով կառուցված դեֆորմացիաների բաղադրիչների գրաֆիկները
(1 - սահքի, 2 - շառավղային, 3 - շրջանային և 4 - առանցքային)



Նկ. 8. ռ-ռ հատույթի վերնի տարրերի տվյալներով կառուցված դեֆորմացիաների բաղադրիչների գրաֆիկները
(1 - սահքի, 2 - շառավղային, 3 - շրջանային և 4 - առանցքային)



Նկ. 9. e-e (1) և և-և (2) հատույթների հանգույցների տվյալներով կառուցված ծակոտկենության փոփոխության գրաֆիկները

Եզրակացություն.

1. Կատարվել են եռակալված նյութից գլանական աստիճանաձև ձողի արտադրման գործընթացի սկզբնական չկայունացված ժամանակաշրջանի դեֆորմացիոն վիճակի ABAQUS ԱՕՄ-ում մոդելավորումը՝ բացարձակ կոշտ մամլամատին հաղորդելով 3 մ/վողղահայաց տեղափոխություն, և ստացված տվյալների վերլուծում ու արդյունքերի համեմատում ՅBM EC 1022-ի վրա ՓՕՐՏՐԱԿ-IV ալգորիթմական լեզվով կազմված ծրագրով հաշվարկված տվյալների հետ:

2. Հետազոտվել են մամլամայրում ձողի e-e և և-և հանգույցների, դրանցից վերևի և ներքևի տարրերի աղյուսակային տվյալները (Միզեսի լարման, դեֆորմացիաների ինտենսիվության և բաղադրիչների, ինչպես նաև նյութի ծակոտկենության արժեքները), որոնցից ընտրվել են գործընթացը բնութագրող մեծությունները, և կառուցվել են դրանց գրաֆիկները (դեֆորմացիաների բաղադրիչների և ծակոտկենության փոփոխության):

3. Բոլոր դեֆորմացիաների բաղադրիչները ծայրագույն արժեքներին հասնում են կոնական մամլամայրի հետ ձողի հպակային գոտիներում: Դրանցից ամենամեծերը e-e-ի գոտում սահքի (0,247) և առանցքային սեղմող դեֆորմացիաներն (-0,19) են, որոնց պատճառով նյութի ծակոտկենությունը 16%-ից փոքրանում է 8,3%-ի (նկ. 9), իսկ շառավղային և շրջանային դեֆորմացիաները դրական են ու փոքր և ձողի առանցքից հաշված՝ առաջին հինգ տարրերում շատ մոտ են մեկը

մյուսին: $d-d$ – ի գոտում ամենամեծը առանցքային ձգող դեֆորմացիան է (0,08), իսկ մյուսները բացասական են:

4. ԱՕՄ–ում մոդելավորմամբ ստացվել են տվյալներ տեխնոլոգիական գործընթացի ամենակարևոր հպակային գոտու՝ վեցերորդ տարրի համար, ինչպես նաև ցույց է տրվել, որ, ի տարբերություն [6] – ի, $d-d$ – ի գոտում ամրանավորած մենուղղորդված թելիկների համար վտանգավոր սահքի դեֆորմացիաները $e-e$ -ի համեմատ շատ փոքր են և փոխել են իրենց նշանը: Ինչ վերաբերում է ԱՕՄ–ում ստացված մյուս արդյունքներին, ապա դրանք որակապես համընկնում են ЭВМ ЕС 1022–ի վրա ФОРТРАН–IV ալգորիթմական լեզվով կազմված ծրագրով հաշվարկված տվյալներին:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Petrosyan G.L., Verlinski S.V., Hakobyan N.G., Margaryan M.A.** Investigation of wide stripe pure bending plastic deformation in freely supported and restrained beam schemes// AIP Conference Proceedings 2166, 020014 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5131601> Published Online: 25 October 2019.- P.1-7.
2. **Маргарян М.А.** Компьютерное моделирование процесса прессования круглого спеченного образца в конических матрицах // Известия НАН РА. Механика. – 2020. - Т. 73, №3. - С. 44-53.
3. **Петросян Г.Л., Давтян А.А.** Исследование напряженно-деформированного состояния процессов волочения спеченных образцов прямоугольного сечения в клиновидных матрицах различных наклонов комбинированным методом // Международный сборник научных трудов ДонНТУ: Прогрессивные технологии и системы машиностроения.- Донецк, 2021.- №4 (75).- С. 69-79.
4. **Петросян Г.Л.** Пластическое деформирование порошковых материалов.- М.: Металлургия, 1988.- 153 с.
5. **Петросян Г.Л., Нерсисян Г.Г., Малхасян С.А., Петросян А.С.** Уплотнение пористых материалов в жестких конических и цилиндрических матрицах // Порошковая металлургия. - 1982. - №5. - С. 22-27.
6. **Манукян Н.В., Петросян Г.Л., Галоян Г.В., Петросян А.С.** О прочности композиционных материалов, армированных однонаправленными волокнами // Межвузовский тематический сборник научных трудов по ПМ: Теория и практика ПМ.- Ереван, 1982.- С. 71-78.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 23.12.2021:

Г.Л. ПЕТРОСЯН, А.С. ПЕТРОСЯН, М.А. МАРГАРЯН, А.А. БАБАЯН

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ СТУПЕНЧАТОГО СПЕЧЕННОГО
КРУГЛОГО СТЕРЖНЯ**

Проведено моделирование случая начального периода неустойчивого процесса экструзии ступенчатого спеченного образца круглого сечения в автоматизированной программной среде ABAQUS. В верхней части цилиндрического образца дано равномерное перемещение в вертикальном направлении, по причине чего он деформируется. Получены зоны распределения напряжения Мизеса, интенсивности деформаций, компонентов деформированного состояния и пористости материала. Найдены данные по семи узлам при входе (е-е) и выходе (д-д) из матрицы, а также по шести элементам сверху и снизу от них, которые представлены в виде таблицы. Все значения деформаций достигают максимума в зонах контакта матрицы со стержнем.

Полученные данные дали возможность построить графики зависимостей компонентов деформированного состояния верхних элементов сечений е-е и д-д и пористости в узлах этих сечений. Самые большие из этих в зоне е-е - осевые деформации сжатия и деформации сдвига. В зоне д-д деформации сдвига, по сравнению с е-е, очень малы и поменяли свой знак. Остальные данные качественно совпадают с расчетными данными программы, составленной с помощью алгоритмического языка ФОРТРАН – IV на ЭВМ ЕС 1022.

Ключевые слова: спеченный материал, пористость, экструзия, деформированное состояние, компьютерное моделирование.

G.L. PETROSYAN, H.S. PETROSYAN, M.A. MARGARYAN, A.A. BABAYAN

**COMPUTER MODELING OF THE DEFORMED STATE OF THE
STEPPED SINTERED BAR EXTRUSION**

The case of an unstable period at the initial stage of extrusion of a stepped sintered sample with a circular cross-section was simulated in the ABAQUS software environment. From the top of the cylindrical sample, uniform movement in the vertical direction is given, because of which it was deformed. Zones of von Mises stress, strain intensity, components of the deformation state and porosity of the material are obtained. The data were found for seven nodes at the entrance (e-e) and exit (d-d) from the matrix, as well as for six elements above and below them, which are presented in the form of a table. All values of deformations reach a maximum in the zones of contact between the matrix and the bar.

The data obtained made it possible to plot the graphs of the components of the deformation state of the upper elements of the sections e-e and д-д and changes in porosity at the nodes of these sections. The largest of these in the e-e zone are axial deformations compression and shift deformations. In the zone д-д, shift deformations are very small compared to e-e and have changed their sign. The rest of the data qualitatively coincide with the calculated data of the program compiled in the algorithmic language FORTRAN-IV on the ЭС 1022 computer.

Keywords: sintered material, porosity, extrusion, deformed state, computer simulation.

**ՄԵՏԱՂԱՊԱՏՎԱԾ ԱԼՄԱՍՏՍՅՈՒՆ ՀԱՏԻԿՆԵՐՈՎ ԿՈՄՊՈԶԻՏՍՅՈՒՆ
ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ՏԱՔ ՄԱՍԼՄԱՄԲ**

Մշակվել է տիտանով մետաղապատված HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկներով և $34\%Fe+6\%Ni+32\%Cu+8\%Sn+10\%WC+10\%C+18$ մակնիշի գորշ թուջի տաշեղի՝ փոշի բաղադրությամբ կապակցանյութով քարամշակման գործիքների պատրաստման նոր տեխնոլոգիա, որը ներառում է կապակցանյութի և տիտանով մետաղապատված HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկներով մետաղաալմաստային կոմպոզիտային բովախառնուրդի պատրաստում, սառը մամլում, եռակալում, տաք մամլում և մեխանիկական մշակում գործընթացները: Ընտրվել և հիմնավորվել են եռակալման և տաք մամլման լավարկված ռեժիմները. եռակալման ջերմաստիճանը՝ $800\pm 20^{\circ}C$, պահման տևողությունը՝ $0,75\ldots 1,0$ ժամ, տաք մամլման ջերմաստիճանը՝ $850\pm 10^{\circ}C$, պահման տևողությունը՝ $25\ldots 30$ րոպե, տեսակարար ճնշումը՝ $80\ldots 100$ ՄՊա, որոնց դեպքում կոմպոզիտի կարծրությունը կազմում է $60\ldots 102$ HRB, հարվածային մածուցիկությունը՝ KCU $2\ldots 36$ կՋ/սմ², խզման ամրությունը՝ $23\ldots 160$ ՄՊա:

Ցույց է տրված, որ կոմպոզիտային նյութն ունի հետերոգեն կառուցվածք. մայրակը ներկայացնում է հիմնականում α (անագի պինդ լուծույթը պղնձում՝ $13,5\%$ անագի պարունակությամբ) և δ ֆազերի (Cu_3Sn) խառնուրդ, որում հավասարաչափ բաշխված են α -երկաթի և նիկելի պինդ լուծույթները և ինտերմետաղական ֆազերն անագի և պղնձի հետ, իսկ լցանյութերը՝ գրաֆիտի և վոլֆրամի կարբիդի հատիկները, երևում են առանձին հատիկների տեսքով: Միաժամանակ, գորշ թուջի առկայությունը կոմպոզիտում հանգեցնում է ազատ գրաֆիտի առաջացմանը, որը նպաստում է կոմպոզիտի հակաշփական հատկությունների լավացմանը:

Առանցքային բառեր. մետաղապատված ալմաստային հատիկներ, կապակցանյութ, բովախառնուրդ, սառը մամլում, եռակալում, տաք մամլում, մետաղաալմաստային կոմպոզիտային նյութ, կառուցվածքագոյացում, մաշակայունություն:

Ներածություն. Մետաղների և ոչ մետաղական նյութերի մշակման բազմաթիվ տեխնոլոգիական գործընթացներում լայն կիրառություն են գտել ալմաստային գործիքները [1, 2], առանց որոնց հնարավոր չէ իրականացնել հատուկ մեքենաշինության մեջ կատարվող հղկման, ինչպես նաև ընդերքի շահագործման և քարամշակման արտադրությունում իրականացվող աշխատանքները:

Ալմաստամետաղական գործիքների հիմնական թերությունն ալմաստային հատիկների ոչ արդյունավետ օգտագործումն է: Ալմաստը, լինելով չեզոք նյութ, մետաղաալմաստային կոպոզիտում պահվում է միայն մեխանիկական կապի միջոցով: Մինչդեռ ալմաստային հատիկների արդյունավետ օգտագործման համար դա բավարար չէ: Նշվածը բացառելու նպատակով ալմաստային հատիկները նախօրոք պետք է ենթարկվեն մետաղապատման, որը հնարավորություն կտա՝ ստեղծելու ամուր կապ ալմաստային հատիկների և կապակցանյութի միջև [3-7]: Միաժամանակ, ինքնասրման ռեժիմով ալմաստային գործիքի արդյունավետ աշխատանքի համար մետաղական կապակցանյութը պետք է ունենա լավարկված մաշակայունություն, որը կապահովի ալմաստային հատիկների կտրող եզրերի անընդհատ նորացումը: Եթե կապակցանյութի մաշակայունությունը փոքր լինի պահանջվող արժեքից, ապա գործիքում ալմաստահատիկները ոչ արդյունավետ կօգտագործվեն, մինչդեռ բարձրի դեպքում ալմաստահատիկների գազաթները կմաշվեն, իսկ կապակցանյութը՝ ոչ: Արդյունքում՝ կտրող եզրերի բացակայության պատճառով կառաջանան հարթակներ, և շփման ուժը մեծանալով՝ կնպաստի ալմաստամետաղական կոմպոզիտի քայքայմանը: Ալմաստային գործիքի ինքնասրվող հատկությունը կախված է կապակցանյութի ֆիզիկամեխանիկական հատկություններից և մշակվող նյութի հատիկայնությունից: Որքան արագ է մաշվում կապակցանյութը, այդքան լավ է ընթանում ինքնասրման գործընթացը: Մյուս կողմից՝ պետք է խուսափել ալմաստային հատիկների ինտենսիվ պոկումից, իսկ մաշման աստիճանը պետք է ունենա որոշակի սահման: Կապակցանյութը պետք է ունենա նաև բավարար ջերմակայունություն, ջերմափոխանակություն, նվազագույն շփման գործակից և քիմիապես չփոխազդի մշակվող նյութի հետ:

Նշված խնդիրը խիստ արդիական է և կարելի է լուծել նոր կապակցանյութերի մշակման, ալմաստային հատիկների նախօրոք մետաղապատման, դրանցից նոր կոմպոզիտային նյութերի ստացման և ալմաստամետաղական գործիքների պատրաստման տեխնոլոգիաների մշակմամբ:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Ելնելով վերը նշվածից՝ աշխատանքի նպատակն է ջերմադիֆուզիոն եղանակով տիտանով մետաղապատված HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկների համար նոր մաշակայուն կապակցանյութի մշակումը և տաք մամլմամբ մետաղաալմաստային կոմպոզիտային հղկագործիքների պատրաստման տեխնոլոգիայի մշակումը, ինչպես նաև դրանց կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորման գործընթացների հետազոտումը:

Նշված խնդիրը հնարավոր է լուծել փոշեմետալուրգիական եղանակով, որը հնարավորություն է տալիս նախօրոք պատրաստված ալմաստամետաղական կոմպոզիտային բովախառնուրդից սառը մամլմամբ ստանալ ծակոտկեն մամլվածքներ, դրանք հեղուկ ֆազային միջավայրում ենթարկել եռակալման, այնու-

հետև տաք մամլման միջոցով գործնականում ստանալ անծակոտկեն կառուցվածքով գործիքներ՝ օժտված կտրման բարձր հատկություններով:

Ալմաստային հատիկների ջերմադիֆուզիոն մետաղապատման շնորհիվ՝ «ալմաստ-մետաղածածկույթ-կապակցանյութ» անցումային շերտերում տեղի են ունենում դիֆուզիոն գործընթացներ, որոնց արդյունքում առաջանում է քիմիական կապ՝ մեծացնելով ալմաստի հատիկների պահման ամրությունը: Ծածկութապատող մետաղը փոխազդում է ալմաստային հատիկների հետ և առաջացնում կարբիդներ: Դրանք լցվում են ալմաստային հատիկում գոյություն ունեցող միկրոճաքերի մեջ և մեծացնում ալմաստային հատիկի ամրությունը [8, 9]:

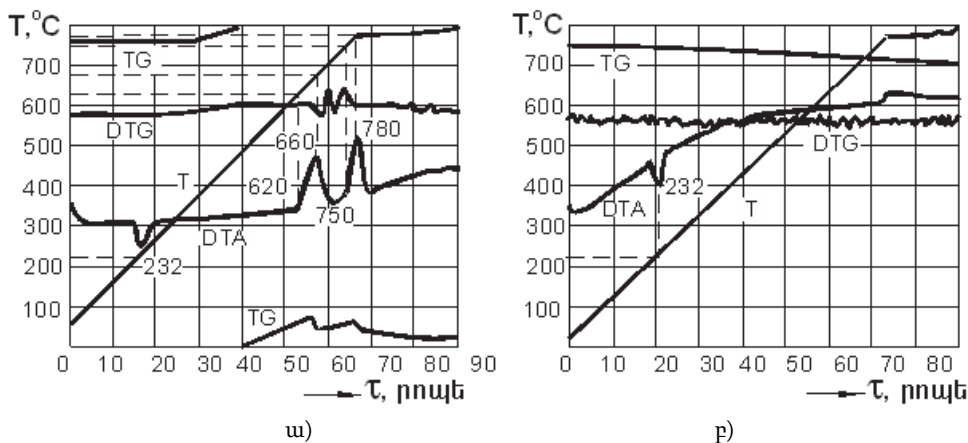
Հետազոտության արդյունքները. Համալիր փորձագիտական հետազոտությունների արդյունքում տիտանով մետաղապատված HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկների ([C]*) համար ընտրվել և հիմնավորվել է կապակցանյութի քիմիական կազմը՝ 32% Cu+8% Sn+6% Ni+34% Fe+10% WC+10% C₄H₁₈, որը ներկայացնում է պղնձի և անագի փոշիների խառնուրդ՝ 4:1 հարաբերությամբ, իսկ որպես լեգիրող տարրեր ընտրվել են երկաթը և նիկելը, որպես լցանյութ՝ վոլֆրամի կարբիդը, որպես պինդ քսանյութ՝ C₄H₁₈ մակնիշի գորշ թուջի տաշեղի փոշին [10]: Ալմաստամետաղական կոմպոզիտում ալմաստի կոնցենտրացիան վերցրվել է 50%:

Ռենտգենասպեկտրային վերլուծության մեթոդով ուսումնասիրվել է ծածկույթի փոխազդեցությունը կապակցանյութի բաղադրամասերի հետ: Բացահայտվել է, որ «ծածկույթ-կապակցանյութ» ֆազերի սահմանում տեղի է ունենում ծածկույթ մետաղի (Ti) և կապակցանյութի (Cu-Sn) փոխադարձ դիֆուզիա, որի արդյունքում ապահովվում է սահմանային ֆազերի ամուր կապը:

Հետազոտությունների արդյունքում պարզվել է, որ ալմաստամետաղական կոմպոզիտի կարծրությունը, հարվածային մածուցիկությունը և կտրման ամրությունը կախված են մի շարք գործոններից, մասնավորապես՝ ալմաստամետաղական կոմպոզիտի բաղադրությունից, սառը մամլման ճնշումից, եռակալման ջերմաստիճանից, այդ ջերմաստիճանում պահման տևողությունից և տաք մամլման ճնշումից: Բացահայտվել է, որ սառը մամլման տեսակարար ճնշումը 300 ՄՊա-ից ավելի բարձրացնելու դեպքում տեղի է ունենում մետաղապատված ալմաստի հատիկների ջարդում, ուստի այն ընտրվել է 200...250 ՄՊա, որի դեպքում ծակոտկենությունը ստացվում է՝ $\theta=20...25\%$:

Սառը մամլված բրիկետները ենթարկվել են եռակալման և տաք մամլման, արդյունքում մամլվածքները ձեռք են բերում պահանջվող կառուցվածք ու հատկություններ: Հատկապես կարևոր ազդեցություն ունի եռակալման ջերմաստիճանը, որի դեպքում նյութում տեղի են ունենում դիֆուզիոն գործընթացներ և նոր ֆազերի առաջացում: Cu-Sn հիմքով կապակցանյութերի եռակալումն ընթանում է հեղուկ ֆազում, իսկ եռակալման ջերմաստիճանը 650...800°C տիրույթում է: Եռա-

կալման ջերմաստիճանի ճիշտ ընտրության համար կատարվել են ջերմաձանրաչափական հետազոտություններ, որոնց արդյունքում այն ընտրվել է $800 \pm 20^\circ\text{C}$: Նշված ջերմաստիճանում ալմաստային հատիկների գրաֆիտացման գործընթաց գործնականում տեղի չի ունենում: Այդ է վկայում զանգվածի փոփոխության գրաֆիկը (TG) արգոնի միջավայրում տաքացնելիս, ինչպես նաև DTA կորի վրա էնդոթերմիկ կամ էկզոթերմիկ ռեակցիաների բացակայությունը (նկ. 1):

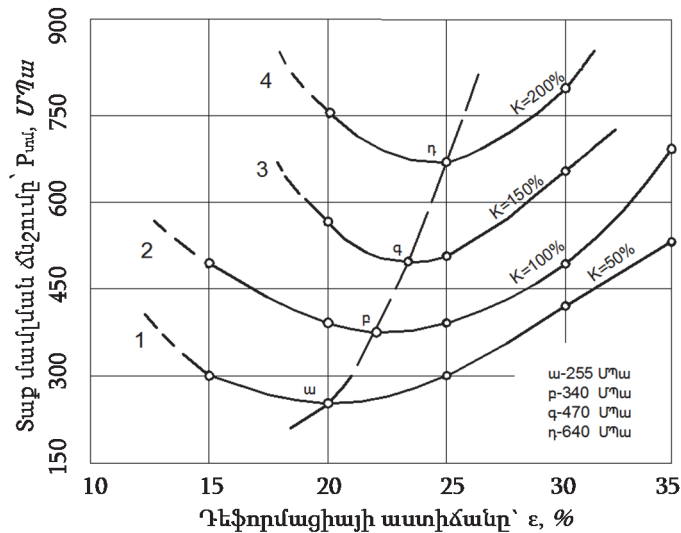


Նկ. 1. $[C]^*$ -կապակցանյութ ալմաստամետաղական կոմպոզիտային նյութի դերիվատագիրը՝ տաքացված օդի (ա) և արգոնի միջավայրերում (բ)

Ալմաստամետաղական կոմպոզիտային նյութի կառուցվածքագոյացումն ավարտվում է տաք մամլման ընթացքում, որի վրա ազդող պարամետրներն են մամլվածքի բաղադրությունը, տաքացման ջերմաստիճանը և տևողությունը, դեֆորմացման աստիճանը, ալմաստի հարաբերական կոնցենտրացիան և նրա հատիկայնությունը, ինչպես նաև մամլվածքի սկզբնական ծակոտկենությունը:

Ջերմաստիճանի ներքին սահմանն ընտրվել է 800°C , ինչը պայմանավորված է տաք մամլման ճնշման (P_0) մեծացմամբ և ալմաստային հատիկների ջարդմամբ: Բարձր ջերմաստիճաններում մեծանում է կապակցանյութի պլաստիկությունը, և հնարավորություն է ստեղծվում խուսափելու ալմաստային հատիկների ջարդումից: Տաք մամլման ջերմաստիճանում պահման տևողությունը վերցվել է $0,75 \dots 1,0$ ժամ, ինչը բավարար է ալմաստային հատիկների մետաղապատված շերտի և կապակցանյութի միջև դիֆուզիայի ընթացքի ու կառուցվածքագոյացման գործընթացների համար: Ուսումնասիրվել է տաք մամլման ճնշման կախվածությունը դեֆորմացիայի աստիճանից և ալմաստի կոնցենտրացիայից (նկ. 2), համաձայն որի դեֆորմացիայի աստիճանի (ε) մեծացումով տաք մամլման ճնշումն ($P_{\text{մմ}}$) աճում է, իսկ ծակոտկենությունը (θ)՝ նվազում: Մամլման ճնշումն աճում է նաև ալմաստի կոնցենտրացիայի (K) աճին զուգընթաց: Հետազոտությունների արդյունքում ընտր-

վել են տաք մամլման պարամետրերը՝ $T=850\pm 10^{\circ}C$, $\tau=0,5$ ժամ, մամլվածքի սկզբնական ծակոտկենությունը 20%, տաք մամլման ճնշման լավարկված արժեքը՝ $P_{տաք}=80\ldots 100$ ՄՊա, որոնց դեպքում կոմպոզիտի կարծրությունը կազմում է 60...102 HRB, հարվածային մածուցիկությունը՝ KCU 2...36 կՋ/սմ², խզման ամրությունը՝ 23...160 ՄՊա:

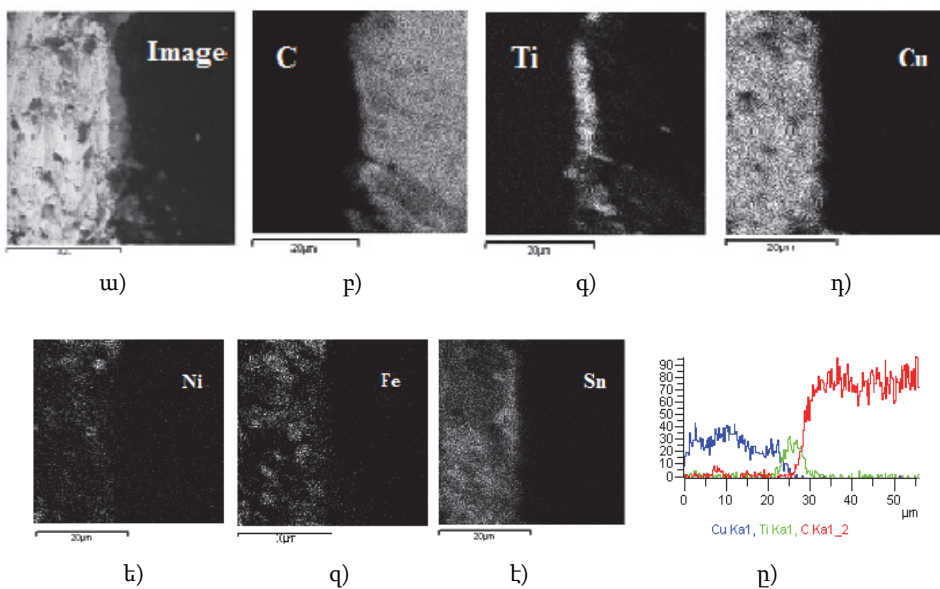


Նկ. 2. Տաք մամլման $P_{տաք}$ ճնշման կախվածությունը դեֆորմացիայի աստիճանից (ϵ) և $[C]^*$ -ի կոնցենտրացիայից (K). 1- $K=50\%$, 2- $K=100\%$, 3- $K=150\%$, 4- $K=200\%$ (կետագծերով գծեր տարվել է 1-4 կորերի ամենացածր կետերով)

Հետազոտությունների արդյունքում բացահայտվել է, որ կապակցանյութում C418 մակնիշի գորշ թուջի ավելացումը փոքրացնում է հարվածային մածուցիկությունը, որոշ չափով իջեցնում է կարծրությունը և կտրման ամրությունը: Ընդ որում, որքան փոքր է լցանյութի հատիկայնությունը, այնքան այն էականորեն է ազդում մեխանիկական հատկությունների վրա՝ ապահովելով գործիքի կապակցանյութի ինքնասրման պայմանը: Վուֆրամի կարբիդի ներմուծումը նպաստում է հարվածային մածուցիկության իջեցմանը և կարծրության բարձրացմանը, իսկ նիկելը և երկաթը նպաստում են կոմպոզիտի կարծրության, ամրության և մաշակայունության բարձրացմանը: Մետաղազիտական վերլուծության արդյունքում բացահայտվել է, որ մշակված ալմաստամետաղական կոմպոզիտային նյութն ունի հետերոգեն կառուցվածք. մայրակը ներկայացնում է α (անագի պինդ լուծույթը պղնձում՝ 13,5% անագի պարունակությամբ) և δ ֆազերի ($Cu_{31}Sn_8$) խառնուրդ, որում հավասարաչափ բաշխված են α -երկաթի և նիկելի պինդ լուծույթներն ու անագի և պղնձի ինտերմետաղական ֆազերը, իսկ լցանյութերը՝ գրաֆիտի և վուֆրամի կարբիդի հատիկները, երևում են առանձին հատիկների տեսքով: Գորշ թուջի առ-

կայությունը կոմպոզիտում, շնորհիվ ազատ գրաֆիտի, նպաստում է հակաշփական հատկությունների լավացմանը:

Ուսումնասիրվել է տիտանով մետաղապատված HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկների ծածկույթի փոխազդեցությունը մետաղական կապակցանյութի բաղադրամասերի հետ (նկ. 3): Բացահայտվել է, որ «ծածկույթ-կապակցանյութ» ֆազերի սահմանում տեղի ունի ծածկույթի մետաղի (Ti) և կապակցանյութի փոխադարձ դիֆուզիա, որն ապահովում է սահմանային ֆազերի ամուր կապը: Ցույց է տրված, որ տարրերի բաշխվածությունը կատարվում է ծածկույթի ամբողջ մակերևույթով:

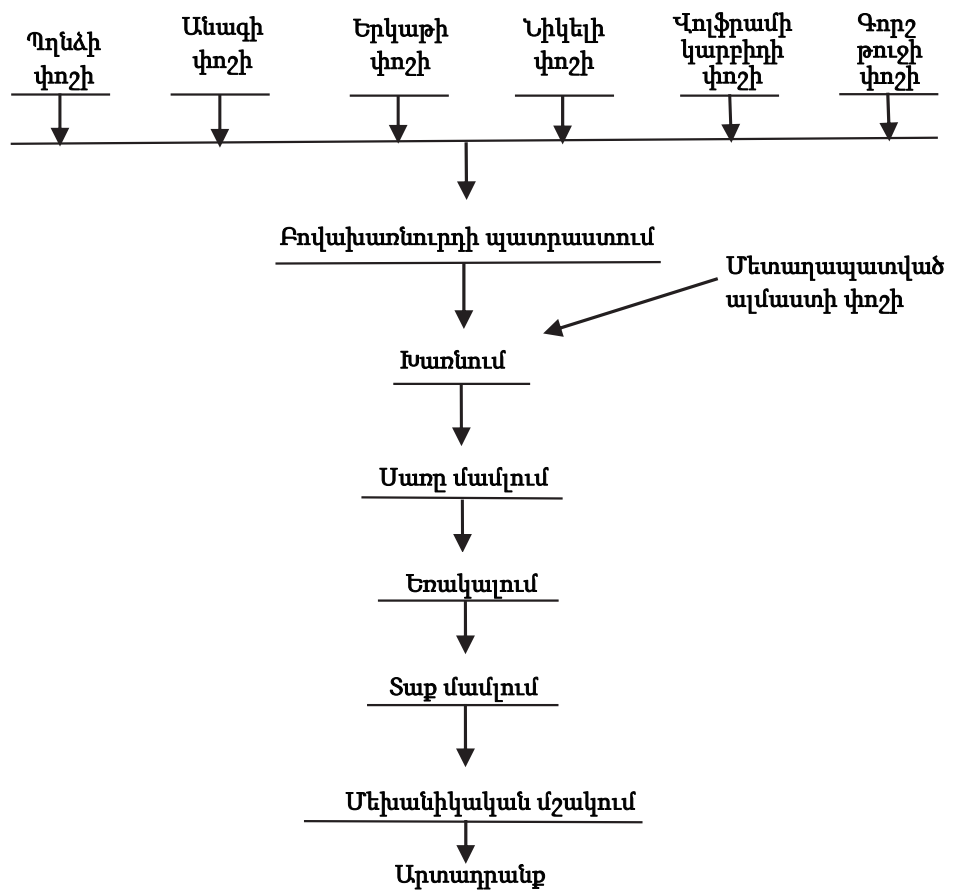


Նկ. 3. Տիտանե ծածկույթի փոխազդեցությունը մետաղական կապակցանյութի բաղադրիչների հետ. ա- HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստե հատիկի ($[C]^*$) և կապակցանյութի բաշխումը, բ- C-ի բաշխումը, գ- Ti-ի բաշխումը, դ- Cu-ի բաշխումը, ե- Ni-ի բաշխումը, զ- Fe-ի բաշխումը, է- Sn-ի բաշխումը, ը- Ti-ի, Cu-ի և C-ի սկանագիրը

Հետազոտությունների արդյունքում բացահայտվել է, որ եռակալված նմուշների սեղմման ամրությունը կտրուկ աճում է տաք մամլման ճնշման մեծացմանը զուգընթաց: Սակայն ալմաստամետաղական նմուշների պատրաստման տեխնոլոգիական ռեժիմների մնացած հավասար պայմանների դեպքում դրանց ամրության ցուցանիշները նվազում են ալմաստափոշու հարաբերական կոնցենտրացիան 25%-ից 100% բարձրացնելու դեպքում, որը բացատրվում է կապակցանյութի մետաղական բաղադրիչ տարրերի քիմիական կապի ավելի մեծ էներգիայով: Այդ է պատճառը, որ նմուշների մեջ ալմաստային փոշու կոնցենտրացիան ավելաց-

նելիս ալմաստամետաղական կոմպոզիտային նյութի կապի էներգիան նվազում է, և նրա քայքայումը տեղի է ունենում ավելի փոքր բեռնվածքների դեպքում:

Կատարված հետազոտությունների արդյունքների հիման վրա մշակվել է տիտանով մետաղապատված HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկներով և $34\% \text{ Fe} + 6\% \text{ Ni} + 32\% \text{ Cu} + 8\% \text{ Sn} + 10\% \text{ WC} + 10\% \text{ C} + 18\%$ մակնիշի գորշ թուջի տաշեղի՝ փոշի բաղադրությամբ կապակցանյութով քարամշակման գործիքների պատրաստման նոր տեխնոլոգիա (նկ. 4), որը հնարավորություն է տալիս՝ ապահովելու առավելագույն արտադրողականություն:



Նկ. 4. Քարամշակման համար ալմաստամետաղական HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկներով մետաղապատված ալմաստային նոր կոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիական սխեման

Համաձայն մշակված տեխնոլոգիայի՝ ալմաստային փոշիները նախօրոք ենթարկվել են տիտանով մետաղապատման հալոգենային միջավայրում, իսկ գորշ թուջի փոշին ստացվել է թուջի մեխանիկական մշակումից ստացված տաշեղների

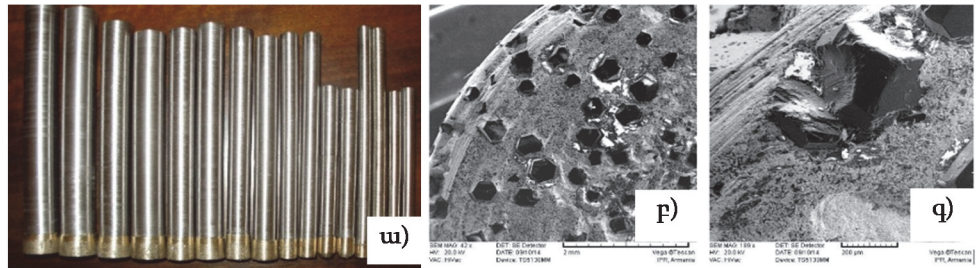
մանրացմամբ: Պատրաստվել է կապակցանյութ 34% Fe+6% Ni+32% Cu+8% Sn+ +10% WC+10% C₄18 մակնիշի գորշ թուջի տաշեղի փոշի բաղադրությամբ, ընդ որում, հավասարաչափ խառնում ապահովելու համար ավելացվել է ~1% տեխնիկական սպիրտ, իսկ խառնումը կատարվել է 7...8 ժամ:

Ալմաստամետաղական բովախառնուրդի հավասարաչափ խառնումն ապահովելու համար նրա մեջ ավելացվել է գլիցերինի 20%-ոց սպիրտային լուծույթ 1,5...2,0% քանակությամբ (ըստ զանգվածի): Խառնումն իրականացվել է 8...10 ժամ: Ստացված բովախառնուրդը կշռվել է ըստ պահանջվող զանգվածի և ենթարկվել սառը մամլման, որն իրականացվել է քանդվող մամլաձևի մեջ: Սկզբից մամլաձևի խոռոչի մեջ լցվել է ալմաստ չպարունակող շերտի բովախառնուրդը և հատուկ մամլամատով հարթեցվել, ապա լցվել է ալմաստ պարունակող բովախառնուրդը, հարթեցվել, ու կատարվել է մամլում: Մամլաձևի մասերի հաշվարկը կատարվել է այն նկատառումից ելնելով, որ ստացված մամլվածքի ծակոտկենությունը չգերազանցի 20...25%:

Կառուցվածքագոյացման նպատակով բրիկետները շարվել են տաք մամլման մամլաձևի մեջ, այնուհետև մամլվածքները մամլակաղապարի հետ միասին ենթարկվել են եռակալման՝ պաշտպանիչ միջավայրում: Եռակալման ժամանակ գլիցերինը ցնդում է և հեռանում, ինչպես նաև որոշակի չափով տեղի է ունենում մետաղափոշիների վերականգնում: $T_{\text{եռ}}=800\pm 20^{\circ}\text{C}$ -ում $\tau_{\text{եռ}}=0,75...1,0$ ժամ պաշտպանիչ միջավայրում եռակալումից հետո մամլաձևը եռակալված սեգմենտների հետ միասին 30 րոպե ընդհանուր տևողությամբ տաքացվել և պահվել է $850\pm 10^{\circ}\text{C}$, որից հետո այն դրվել է մամլիչի տակ, և կատարվել տաք մամլում, մինչև որ մամլամատերի վերին հարթությունը հավասարվի մամլաձևի վերին հարթությանը: Այս դիրքով մամլաձևը պահվել է 2...3 րոպե, ապա տեղափոխվել հովացման: Սառը մամլաձևը քանդվել է, իսկ սեգմենտների ալմաստ չպարունակող մակերևույթը ենթարկվել հղկման:

Մշակված կապակցանյութով պատրաստվել են ալմաստային մատային ֆրեզներ (նկ. 5ա)՝ թվածրագրային կառավարվող (θ ՄԿ) ֆրեզային հաստոցի վրա տարբեր կարծրություններով բնական քարերի մշակման համար: Գրանիտի ֆրեզման ժամանակ առավելագույն արդյունավետությամբ առանձնացել են կարծրության միջին ցուցանիշով ֆրեզները՝ HRB ~ 80 միավոր, իսկ HRB ~ 100 միավոր կարծրությամբ ֆրեզներն իրենց արտադրողականությամբ 1,5 անգամ զիջում են դրանց: Միաժամանակ՝ վերջիններս ավելի արդյունավետ են բազալտի մշակման ժամանակ: Ալմաստային մատային ֆրեզներով բնական քարերի ֆրեզման ժամանակ բազահայտվել է, որ մետաղապատված ալմաստահատիկները նույնիսկ ջարդվելով մնում են կապակցանյութի մեջ ամուր ամրացված և շարունակում մասնակցել կտրման գործընթացին (նկ. 5բ, գ):

Ալմաստամետաղական կոմպոզիտներից պատրաստված գործիքների համար իրականացվել են երկփուլանի փորձարկումներ: Նախնական փորձարկումների համար օգտագործվել են 500 մմ տրամագծով, իսկ վերջնական փորձարկումների համար՝ 1200 մմ տրամագծով սկավառակային սղոցներ: Որպես մշակվող նյութ օգտագործվել է բազալտը: Փորձարկումների արդյունքում որոշվել են գործիքների տեսակարար մաշվածքի չափերը և ալմաստի տեսակարար ծախսը: Իրականացվել է ալմաստամետաղական սեգմենտների աշխատանքային մակերևույթների ուսումնասիրում: Պարզվել է, որ ընկած ալմաստային հատիկների թիվը կազմել է մնացած հատիկների 8...10%-ը: Շատ հատիկներ կապակցանյութից դուրս են եկել իրենց չափի 50...60%-ով, որը փաստում է կապակցանյութով ալմաստի հատիկն ամուր պահելու ունակության մասին:



Նկ. 5. Ալմաստային ֆրեզներ (ա) և դրանց աշխատանքային մակերևույթը քարամշակումից հետո՝ բ) x40, գ) x180

Մշակված տեխնոլոգիայով պատրաստված գործիքների փորձարկումները ցույց են տալիս, որ դրանք ապահովում են բարձր արտադրողականություն, հատկապես կարծր քարերի մշակման ժամանակ, և շնորհիվ ալմաստի հատիկների ժամանակին բացվելուն՝ կտրման ողջ գործընթացի ժամանակ այս գործիքները չեն կորցնում իրենց կտրող հատկությունները:

Եզրակացություն. Մշակվել է տիտանով մետաղապատված HSD90 (AC200) մակնիշի ալմաստային հատիկներով և 34% Fe+6% Ni+32% Cu+8% Sn+10% WC+10% C+18 մակնիշի գորշ թուջի տաշեղի՝ փոշի բաղադրությամբ կապակցանյութով քարամշակման գործիքների պատրաստման նոր տեխնոլոգիա: Նշված տեխնոլոգիայով ալմաստամետաղական կոմպոզիտային նյութերից պատրաստված գործիքներն ունեն բարձր արտադրողականություն՝ շնորհիվ տիտանով մետաղապատված ալմաստային հատիկների օգտագործման և կոմպոզիտի մեջ վոլֆրամի կարբիդի ու գորշ թուջի 8...12% ավելացման: Դա նպաստում է արտադրողականության առավելագույն արժեքի ստացմանը:

Հետազոտությունները կատարվել են ՀՀ ԿԳՄՍ նախարարության գիտության կոմիտեի ֆինանսավորմամբ՝ № 18T-2F096 գիտական ծրագրի շրջանակներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Сидоренко Д.А.** Усовершенствование технологии получения алмазных отрезных сегментных кругов и сверл путем наномодифицирования связок на основе меди и железа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06.- М., 2012.- 18 с.
2. **Бойцов А.Г., Дудаков В.Б., Шкарупа М.И.** Металлообработка, Металлургия // Специализированный журнал РИТМ.- 2014.- №9.- С. 5-8.
3. **Агбалян А.С., Ордян Н.А., Мартиросян А.М., Погосян Х.В.** Новая технология изготовления алмазных инструментов на металлических связках // Вестник НПУА: Металлургия, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2017.- № 1.- С. 16-25.
4. Разработка технологии изготовления высокопроизводительных алмазных инструментов на металлической связке методом жидкофазного спекания / **А.М. Мартиросян, С.Г. Агбалян, Н.А. Ордян, А.С. Агбалян, Х.В. Погосян** // Сб. тез. докл. II Межд. конф. молодых ученых, работающих в области углеродных материалов.- М., 2019.- С. 187-190.
5. Քարամշակման արտադրությունում օգտագործվող պլմաստամետաղական կոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիաները և առանձնահատկությունները / **Ս.Գ. Աղբալյան, Ն.Ա. Օրդյան, Ա.Մ. Մարտիրոսյան, Ա.Ս. Աղբալյան, Խ.Վ. Պողոսյան** // Հաշվատանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2019.- Մաս 2.- էջ 508-522:
6. Изучение возможностей оптимизации технологии изготовления алмазных инструментов на металлической связке / **А.И. Саградян, С.Г. Агбалян, А.М. Мартиросян, Н.А. Ордян, Х.В. Погосян** // Научно-технический сборник “Різання та інструменти в технологічних системах”.- Харьковский Национальный технический университет (ХПИ).- Харьков, 2020.- Вып. 92.- С. 136-143.
7. Исследование механизма структурообразования в переходном слое металлоалмазных композиционных материалов с металлизированными алмазными зёрнами, полученных жидкофазным свободным спеканием / **С.Г. Агбалян, Н.А. Ордян, А.М. Мартиросян, А.С. Агбалян, Х.В. Погосян** // Вестник НПУА: Металлургия, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2020.- № 1.- С. 39-51.
8. **Оганян А.П.** Разработка технологии металлизации алмазных порошков термодиффузионным насыщением: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Л., 1987.- 16с.
9. **Казарян А.Н.** Технология нанесения металлических покрытий на алмазные порошки методом газотранспортных реакций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Ереван, 1990.- 17с.
10. Разработка связки для изготовления алмазнометаллического инструмента методом свободного спекания / **А.М. Мартиросян, А.С. Агбалян, Н.А. Ордян, А.С. Агбалян, Х.В. Погосян** // Сб. тез. докл. 12-й Межд. конф. “Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология”.- М., Троицк, 2020.- С. 107-110.

Հաշվատանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 06.12.2021:

**С.Г. АГБАЛЯН, Н.А. ОРДЯН, А.М. МАРТИРОСЯН, А.С. АГБАЛЯН,
Х.В. ПОГОСЯН**

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ АЛМАЗНЫМИ ЗЕРНАМИ

Разработана новая технология изготовления алмазных инструментов на связке состава 34% Fe+6% Ni+32% Cu+8% Sn+10% WC+10% Cч18 и с металлизированными титаном алмазными зернами марки HSD90 (AC200), включающая процессы изготовления композиционной шихты, холодное прессование, спекание, горячее прессование и механическую обработку. Выбраны и обоснованы оптимальные режимы спекания и горячего прессования: температура спекания - $800 \pm 20^\circ\text{C}$, время выдержки - 0,75...1,0 час; температура горячего прессования - $850 \pm 10^\circ\text{C}$, время выдержки - 25...30 мин, удельное давление - 80...100 МПа. В этом случае твердость композита составляет 60...102 HRB, ударная вязкость KCU - 2...36 кДж/м², прочность на срез - 23...160 МПа.

Показано, что композиционный материал имеет гетерогенную структуру: матрица представляет собой в основном смесь α (твердый раствор олова в меди – с 13,5%-ым содержанием олова) и δ фаз ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$), в которой равномерно распределены твердые растворы α железа и никеля, а также интерметаллидные фазы с оловом и медью, а наполнители – зерна графита и карбида вольфрама - видны как отдельные зерна. В то же время присутствие серого чугуна в композите приводит к образованию свободного графита, что способствует улучшению антифрикционных свойств композита.

Ключевые слова: металлизированные алмазные зерна, связка, шихта, холодное прессование, спекание, горячее прессование, металлоалмазный композиционный материал, структурообразование, износостойкость.

**S.G. AGHBALYAN, N.A. ORDYAN, A.M. MARTIROSYAN, A.S. AGHBALYAN,
KH.V. POGHOSSYAN**

DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING COMPOSITE MATERIALS BY HOT PRESSING WITH METALLIZED DIAMOND GRAINS

A new technology has been developed for the manufacture of diamond tools with a bond of 34% Fe+6% Ni+32% Cu+8% Sn+10% WC+10% Cч18 and with titanium metallized diamond grains of HSD90 (AC200) grade, including the processes of manufacturing a composite mixture, cold pressing, sintering, hot pressing and machining. Optimal sintering and hot pressing regimes were selected and substantiated: sintering temperature: $800 \pm 200^\circ\text{C}$, holding time: 0,75...1,0 hour, hot pressing temperature: $850 \pm 10^\circ\text{C}$, holding time: 25...30 minutes, specific pressure: 80...100 MPa, in this case the hardness of the composite is 60...102 HRB, impact strength KCU 2...36 kJ/m², shear strength is 23...160 MPa.

It is shown that the composite material has a heterogeneous structure: the matrix is mainly a mixture of α (hard alloy of tin in copper - with a 13,5% tin content) and δ phases ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$), in which solid solutions of α iron and nickel, as well as intermetallic phases with tin and copper, and fillers - grains of graphite and tungsten carbide, are seen as separate grains. At the same time, the presence of gray cast iron in the composite leads to the formation of free graphite, which improves the antifriction properties of the composite.

Keywords: metallized diamond powders, bond, mixture, cold pressing, sintering, hot pressing, metal-diamond composite material, structure formation, wear resistance.

Ն.Գ. ՄԱՀԱԿՅԱՆ

**ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԻՆՔՆԱՏԱՐԱԾՎՈՂ ՄԻՆԹԵԶԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ
ԵՐԿԱԹ ԵՎ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ MAX-ՖԱԶԻ ՍՏԱՑՈՒՄԸ ԵՎ
ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Քննարկվում են բազմաֆունկցիոնալ կոմպոզիտների նոր դասի ստացման և հատկությունների ուսումնասիրության հարցերը, որոնք ձեռք են բերվում տարբեր մետաղական փոշիների խառնուրդի բարձրջերմաստիճանային սինթեզի (ԲԻՍ) եղանակով: Նման կոմպոզիտներում ներառվում են MAX ֆազեր:

Կատարված գիտափորձերի արդյունքում ցույց է տվել, որ ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինիումի, ածխածնի փոշիների խառնուրդից ԲԻՍ մեթոդով կարելի է ստանալ փոշեման զանգված, որը պարունակում է 93% MAX-ֆազ բաղադրությամբ, $(\text{Fe,Ti})_3(\text{AlSi})\text{C}_2$ և 7% զանգվածի չափով ներառումներ, որոնք հարուստ են երկաթի բյուրեղներով՝ Fe_5Si_3 , Fe_3Si և FeSi , որոնք նյութին հաղորդում են մագնիսական հատկություններ, պարունակվում են նաև հիմնական ֆազում չլուծվող TiSi_2 և TiC - 2%-ի չափով:

Նման եղանակով ստացված MAX կոմպոզիտային նյութի միկրոկառուցվածքը, որը սինթեզվում է փոշեմետալուրգիայի (ԲԻՍ սինթեզ) մեթոդներով, ունի շերտավորված, լամինացված բնույթ և կարող է լավ հումք հանդիսանալ ստացված մետաղափոշին տարբեր մետաղափոշիների հետ լեգիրելու համար, որը, անշուշտ, կնպաստի Հայաստանում փոշեմետալուրգիայի զարգացման գործընթացին:

Առանցքային բառեր. MAX-ֆազ, մագնիսական հատկություններ, երկաթ, սիլիցիում, տիտան, միկրոռենտգենասպեկտրային անալիզ, ներդրումներ:

Ներածություն: Այսօր մեծ է հետաքրքրությունը նոր տիպի միացությունների՝ MAX-ֆազերի նկատմամբ, որոնք դասվում են դժվարահալ նյութերի դասին և ընդհանուր առմամբ նկարագրվում են հետևյալ բանաձևով՝ $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$, որտեղ M -ը անցումային կարգի d-մետաղ է (օրինակ, Ti, Fe, Mn, Cr, Co, Ni և այլն), A -ն՝ պարբերական համակարգի IIIԱ կամ IVԱ ենթախմբի տարր (օրինակ, Al, Si, Ge, S, Sn և այլն), X -ը՝ ածխածին կամ ազոտ: MAX-ֆազերն ունեն շերտավոր հեքսագոնալ բյուրեղային կառուցվածք, որոնցում կարբիդային կամ նիտրիդային խմբերը օկտաեդրում խիտ դասավորություն ունեցող $[\text{MeX}]$ ձևով բաժանված են իրարից մոնոշերտ A -ի ատոմներով [1, 2]: Շերտավոր բյուրեղային կառուցվածքը նմանեցվում է լամինատային կառույցի, որում գտնվում են մի քանի տասնյակ նանոմետրի

հասնող MAX-ֆազի հատիկների շերտեր: Շնորհիվ այդպիսի կառուցվածքի՝ MAX-ֆազերը ցուցաբերում են մետաղների և կոմպոզիտների կոմբինացված հատկություններ. մի կողմից՝ մետաղների նման ունեն բարձր էլեկտրական և մագնիսական հատկություններ, մյուս կողմից՝ կոմպոզիտների նման ցածր տեսակարար կշիռ, բարձր ամրություն և առաձգականության մոդուլ, ցածր ջերմային ընդարձակման գործակից, կայունություն օքսիդացման և ջերմային հարվածի նկատմամբ [3-5]:

Աշխատանքի նպատակն է սինթեզել երկաթ և սիլիցիում պարունակող մագնիսական հատկություններով օժտված $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Si,Al})\text{C}_2$ տիպի MAX-ֆազ, համապատասխան փոշենման նյութերի՝ Ti-ի, FeSi-ի, Al-ի և ածխածնի էկվիմոլեկուլային հարաբերություններով խառնուրդի բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզի եղանակով: Այդ նպատակով կատարվել են փորձարարական հետազոտություններ:

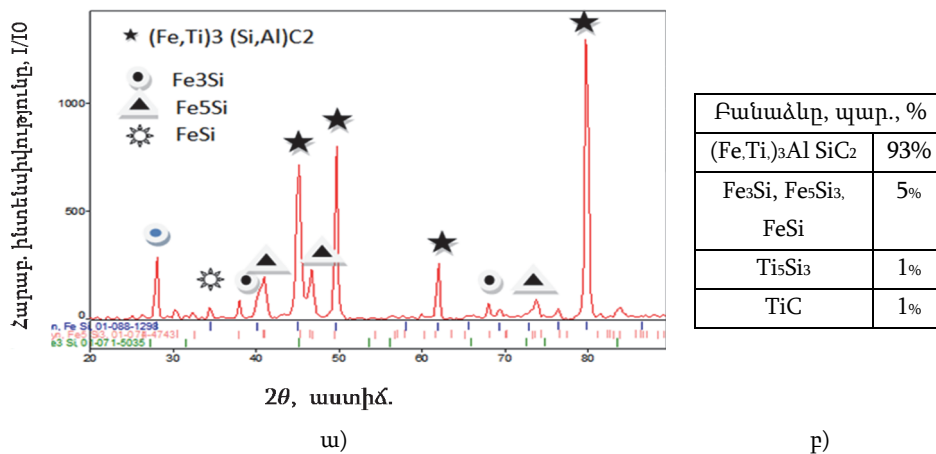
Խտրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Նմուշների սինթեզի համար օգտագործվել են հետևյալ փոշիները՝ FeSi - ΦC-75 (25% Si), 2 մկմ, տեխնիկական ածխածին (մուր) Π-701 մականիշի (99,5%, 2 մկմ), Ti ΠTC (մաքրությունը 98%, մասնիկների միջին չափսը 100 մկմ), ալյումին ΠA-4 (99%, 50 մկմ): Նշված նյութերի փոշիները զանգվածային որոշակի չափաբաժիններով խառնվել են ճենապակյա տարայի մեջ՝ մինչև համասեռ զանգվածի ստացումը: Սինթեզն իրականացվել է մթնոլորտային ճնշման պայմաններում տիտան-ռենիում համաձուլվածքից պատրաստված ռեակտորում, որի մեջ նախապես լցված է ավազ: Ավազի կենտրոնում փոս է արվել, որի մեջ տեղավորվել է բովախառնուրդը: Որպես հարուցիչ օգտագործվել է Ti և C-խառնուրդը: Շիկացած լարով սկիզբ է դրվում FհՄ գործընթացին: Այրման ալիքը տարածվում է վերնից ներքև, և սինթեզվում է համաձուլվածքը: Այրումը տևել է 25...30 մրկ, որից հետո համաձուլվածքը սառչում է: Մեխանիկական եղանակով համաձուլվածքն անջատվել է խարամից և ենթարկվել վերլուծության ռենտգենաֆազային անալիզի եղանակով: Ֆազային բաղադրության ուսումնասիրությունն իրականացվել է ռենտգենային Ultima IV (Rigaky) դիֆրակտորի միջոցով $\text{CuK}\alpha$ -ճառագայթմամբ: Նմուշների կառուցվածքի ուսումնասիրությունն իրականացվել է «Mira» տեսածրող էլեկտրոնային միկրոսկոպի միջոցով «Tescan» ֆիրմայի արտադրության (Չեխիա) «Aztec» անալիզատորով: FհՄ գործընթացով MAX-ֆազի ստացման սարքի աշխատանքը նկարագրված է [6,7] աշխատանքներում:

Հետազոտությունների արդյունքները: $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Si,Al})\text{C}_2$ բանաձևով MAX-ֆազերի ստացման համար նախապատրաստվել է երեք բաղադրություն՝ FeSi – 10, 20 և 30% ավելցուկով: Նախնական բովախառնուրդը պատրաստվել է բաղադրիչների տարատեսակ ստեխիոմետրային հարաբերություններով՝ $3\text{Ti}-1(\text{Al,Si})-2\text{C}-1\text{FeSi}$,

3Ti-1Al-2C-2FeSi, 3Ti-1Al-2C-3FeSi: Լավագույն արդյունքները, ինչպես ենթադրվում էր, ստացվել է 30% FeSi-ի ավելցուկի դեպքում, քանի որ վերջինիս ավելացմանը զուգահեռ ավելացել է նաև երկաթի պարունակությունը, որն իր հերթին հանգեցնում է բարձր մագնիսական հատկություններով համաձուլվածքի ստացմանը:

ԲԻՄ մեթոդով վերը նշված խառնուրդներից ստացվել են մետաղական զանգվածներ, հետագայում դրանք օգտագործվել են որպես ուսումնասիրության նյութ տարբեր անալիզների ժամանակ:

Նկ. 1-ում ներկայացված են ստացված MAX-ֆազի ռենտգենաֆազային անալիզի ռենտգենագրերը (ա) և ֆազային կազմը (բ):

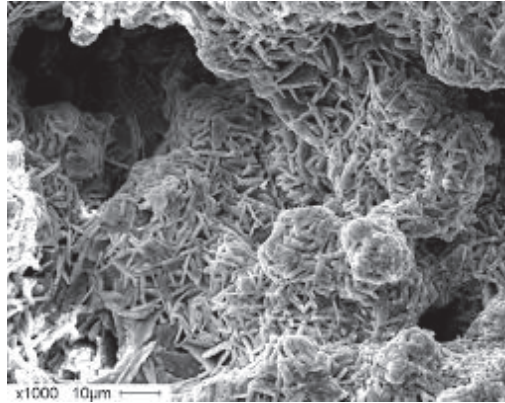


Նկ. 1. ԲԻՄ գործընթացով ստացված արգասիքի ռենտգենագիրը FeSi 30% ավելցուկի դեպքում (ա) և ֆազային կազմը (բ)

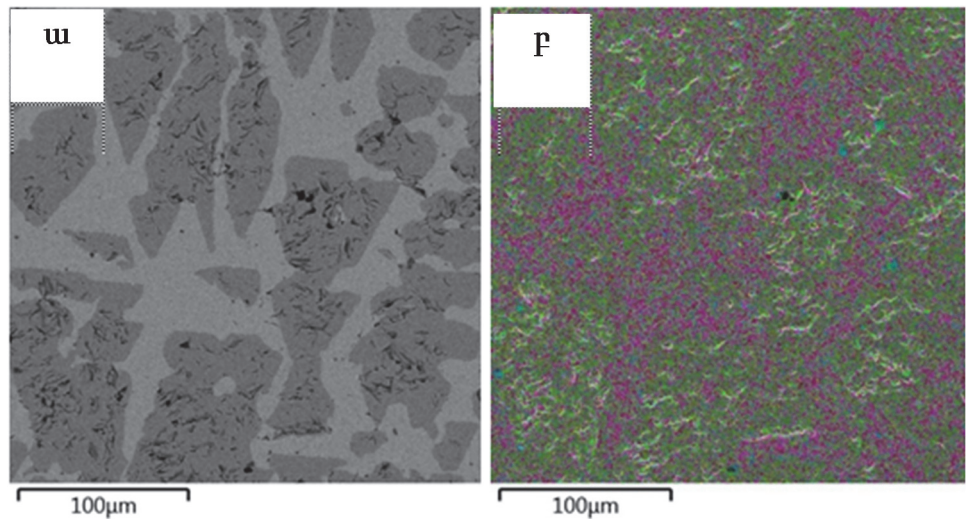
Ռենտգենաֆազային անալիզի տվյալների համաձայն՝ սինթեզի նյութերն են՝ հիմնական ֆազը (FeTi)₃(Al,Si)C₂, (93 զանգ.%), երկաթի սիլիցիդները (5 զանգ.%), ինչպես նաև տիտանի կարբիդը (1 զանգ.%) և սիլիցիդը Ti₅Si₃ (1 զանգ.%) (նկ. 1բ):

Նկ. 2-ում ցույց է տրված Ti-Fe-Si-Al-C համակարգում ԲԻՄ մեթոդով ստացված հիմնական նյութի մակերևույթի կառուցվածքը:

Նկ. 3-ում ներկայացված է ֆազերի անհավասար բաշխումը ինչպես հիմնական ֆազի (նկ.3ա) հատիկներում, այնպես էլ տեսածրոդ մանրադիտակի միջոցով ստացված պատկերներում (նկ. 3 բ):



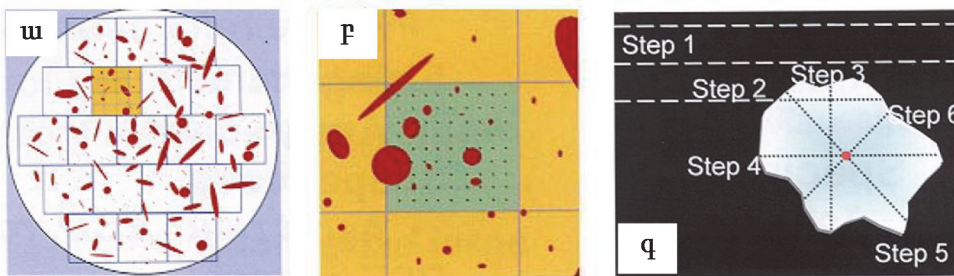
Նկ. 2. *Ti-Fe-Si-Al-C* համակարգում նյութի մակերևույթի կառուցվածքը՝ ստացված *FEU* մեթոդով



Նկ. 3. Ստացված *MAX*- ֆազի անհավասար բաշխումը. *ա* - հիմնական ֆազի հատիկներում ($\times 500$), *բ* – նույնը հանված է տեսածրոդ էլեկտրոնային մանրադիտակով

Ինչպես երևում է նկ. 3ա-ից, մետաղական ֆազը բաղկացած է հիմնական ֆազերից, ինչպես նաև երկաթի սիլիցիդների համար բնորոշ սև կետերից: Համասեռացման գործընթացում երկաթի սուլֆիդների ֆազերի փոխազդեցությունն ուղեկցվում է $(\text{Fe}, \text{Ti})_3(\text{Al}, \text{Si})\text{C}_2$ տիպի պինդ լուծույթների ձևավորմամբ՝ անկանոն կառուցվածքով: Երկաթի սիլիցիդներով հարստացված ֆազն առավելապես տեղակայված է մետաղի հատիկի սահմանի երկայնքով: Այդ ֆազերի հատիկները 25...50 մկմ չափսի են և հստակ պահպանում են իրենց սահմանները:

Ավելի ստույգ գնահատելու համար ստացված արգասիքների զարգացման ընթացքը և ներդրված սիլիցիդների բաշխումը ըստ չափսերի և ձևի, ընտրվել է վերլուծության նոր՝ ժամանակակից միկրոտենտգենասպեկտրային (ՄՌՄԱ) ավտոմատ եղանակը: Այդ եղանակով աշխատանքի սկզբունքը, որը վերաբերում է խառնուրդների վերլուծությանը, ներկայացված է նկ. 4 -ում:



Նկ. 4. Խառնուրդների ավտոմատ վերլուծությունը. ա - պատկերի բաժանումը դաշտերի, բ - էլեկտրոնների փնջի տեղափոխումը դաշտից դեպի գանգված, գ - մասնիկների չափերի որոշումը, որը կատարվում է յուրաքանչյուր մասնիկի վրա էլեկտրոնների փնջի բեկված ճառագայթների կենտրոնացմամբ՝ ըստ քայլերի, և դրա միջոցով բաղադրության որոշումը ՄՌՄԱ եղանակով

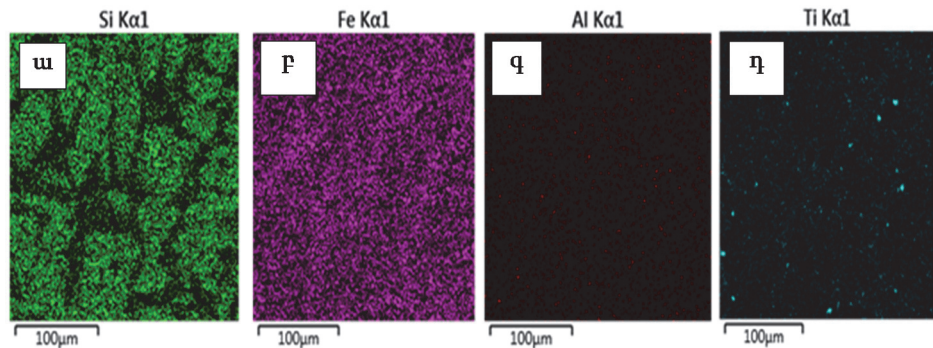
Աղյուսակում ցույց է տրված առանձին տարրերի բաշխումը MAX-ֆազի կազմի մեջ՝ ըստ սպեկտրների: Առանձնացված են 3 սպեկտրներ:

Աղյուսակ

Տարրերի ընդհանուր պարունակությունը

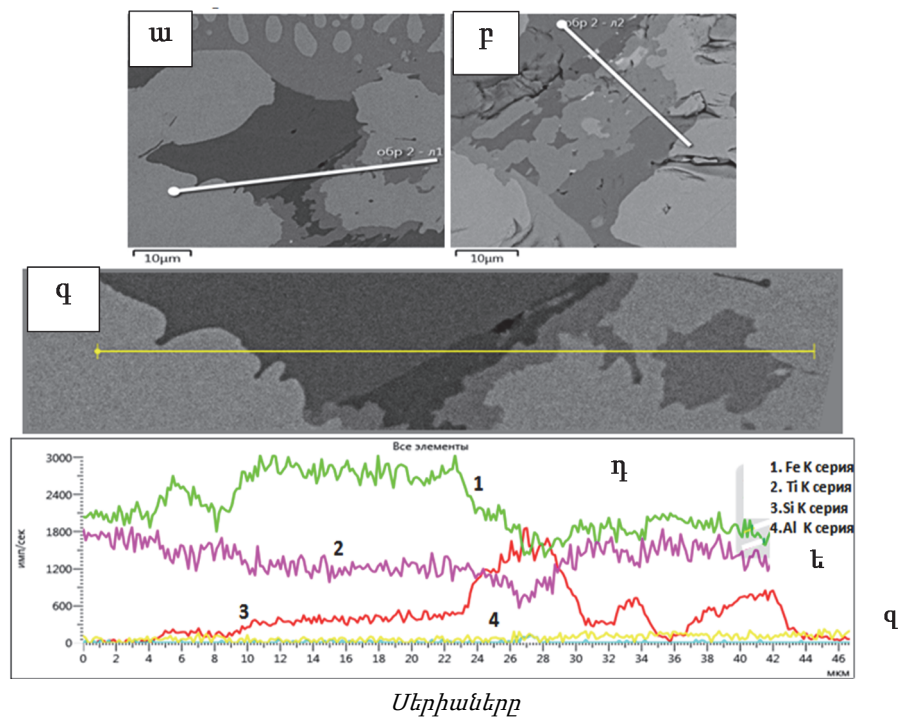
Սպեկտրի համարը	Al	Si	Ti	C	Fe
Սպեկտր 1	0,54	22,65	7,68	1,18	67,95
Սպեկտր 2	0,6	22,84	6,85	1,33	68,52
Սպեկտր 3	0,38	22,82	6,76	0,93	68,95
Միջինը	0,46	22,82	7,04	0,81	68,47

Ինչպես երևում է աղյուսակի թվերից, համաձուլվածքում առանձին տարրերի բաշխումը նույնպես անհավասար է: Հիմնականում համաձուլվածքում գերակշռում են սիլիցիդումը (նկ. 5ա), երկաթը (նկ. 5բ) և տիտանը (նկ. 5դ) Այլումինի քանակությունը փոքր է (նկ. 5 գ), որը, ըստ երևույթին, պայմանավորված է նրա՝ խարամի մեջ անցնելով:



Նկ. 5. *ԲԲՄ մեթոդով ստացված փորձանմուշում տարրերի բաշխվածությունը.*
ա – Si-ի բաշխումը, Բ – Fe-ի բաշխումը, գ – Al-ի բաշխումը, դ – Ti-ի բաշխումը

Նկ. 6.-ում ներկայացված են միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծության արդյունքները՝ ըստ 1 և 2 գծերի:



Նկ. 6. *Միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծության արդյունքները. ա – մինչև 9 մկմ չափսի մասնիկների բաշխվածությունը (x5000), Բ – մինչև 9 մկմ չափսի առաջացած նոր մասնիկների բաշխվածությունը (x5000), գ – 24...30 մկմ չափսի մասնիկների բաշխվածությունը (x10000), դ – Fe-ի բաշխվածությունը, ե – Ti-ի բաշխվածությունը, զ – Si-ի բաշխվածությունը*

Ինչպես երևում է նկ. 6-ից (գիծ 1դ, 2ե և 3գ), միկրոռենտգենասպեկտրային վերլուծության արդյունքները ցույց են տալիս, որ հիմնական ֆազերը երկաթը, տիտանը և սիլիցիումն են:

Ըստ 1-գծի (նկ. 6 ա, գ, դ)՝ 0...9 *մկմ* չափսերի մասնիկները գտնվում են հոմոգեն ֆազում: Սակայն երևում է (նկ. 6 դ), որ կոռերի տեսքը փոխվում է՝ կապված նոր ֆազերի առաջացման հետ:

0...9 *մկմ* չափսերի մասնիկները զբաղեցնում են բավականին մեծ տիրույթ, որոնք հիշեցնում են երկաթի սիլիցիդը (FeSi_3), որը կրկնվում է նաև 34...40 *մկմ* տիրույթում: 24...30 *մկմ* չափսի մասնիկներն առանձնանում են նորագոյացումներով, որոնք ձգվում են մինչև 34...42 *մկմ* տիրույթ: Այդ սիլիցիդները գտնվում են հոմոգեն MAX-ֆազում: Գծի վերևի մասում նկատվում են սև կետեր, որոնք հիշեցնում են տիտանի և ալյումինի զանազան կարբիդներ և սիլիցիդներ: Դա, ըստ երևույթին, կապված է երկաթով հարուստ սիլիցիդների գոյության հետ (FeSi_3 , Fe_3Si , FeSi), որոնք ունեն տարբեր չափսեր:

Ըստ 2-գծի (նկ. 6 գ, ե, զ)՝ 8 *մկմ* չափսի մասնիկները գտնվում են հոմոգեն ֆազում: 8...9 *մկմ* չափսի մասնիկների տիրույթը կապված է նոր ֆազերի առաջացման հետ, որոնք նման են խորանարդների: Ըստ երևույթին, այդ ֆազը հիշեցնում է տիտանի կարբիդը (TiC) և սիլիցիդը (TiSi_2): 9...11 չափսի մասնիկների զբաղեցրած տիրույթը կապված է ֆազային փոփոխության հետ: Այդ կոնգլոմերատը կապված է երկաթի սիլիցիդի առկայության հետ (FeSi_3):

Հետագա 11...14 չափսեր ունեցող մասնիկների ֆազային փոփոխությունները կապված են նոր ֆազի առաջացման հետ, որը հիշեցնում է երկաթի եռսիլիցիդը (FeSi): 14...15 չափսի մասնիկների զբաղեցրած տիրույթում գտնվող տարրերը հիշեցնում են երկաթի զանազան տեսակներով հարուստ ֆազերի գոյությունը: 15...16 *մկմ* չափսի մասնիկներն ունեն կլորացած տեսք: 16...25 և 28...30 *մկմ* չափսեր ունեցող մասնիկները բնորոշ են հիմնականում MAX-ֆազերին: Սրանց արանքում 0...8 *մկմ* չափսեր ունեցող տարածքում գտնվում է հոմոգեն ֆազը:

Այսպիսով, կարելի է ասել, որ ստացված MAX – ֆազն ունի անհավասարաչափ կառուցվածք: Հիմնական հոմոգեն զանգվածում գտնվում են կուտակումներ, որոնք հիշեցնում են երկաթի զանազան տեսակներով հարուստ սիլիցիդների՝ Fe_3Si -ի, FeSi_3 -ի և FeSi -ի առկայությունը: Չի բացառվում նաև տիտանի ու երկաթի և ալյումինի զանազան կարբիդների և սիլիցիդների առկայությունը, ինչպես դա ցույց են տալիս ռենտգենագրերը (նկ. 1բ):

Եզրակացություն: Փորձերը ցույց են տվել, որ ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինի փոշիներից կարելի է ստանալ MAX-ֆազ (փուլ), $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ -ի ոչ

միատարր կառուցվածքով զանգված և տիտանի և երկաթի սիլիցիդների և կարբիդների տարատեսակ պինդ լուծույթներ: Հարկ է նշել, որ ֆազերի ձևավորման ընթացքում տիտանը և երկաթը դրսևորվում են միատեսակ կերպով՝ սիլիցիդների և կարբիդների համեմատ:

Հայտնաբերվել են սինթեզվող ֆազի $(\text{Fe,Ti})_3\text{AlSiC}_2$ բյուրեղային-գրաֆիկական հիմնական պարամետրերը: Որոշվել է, որ այն ներկայացնում է պինդ լուծույթ՝ մի կառուցվածքով, որտեղ Ti և Fe ատոմները կանոնավոր կերպով տեղակայված են մետաղածխածնային շերտում՝ կառուցվածքում ունենալով հավասարազոր դիրքեր: Երկաթով հարուստ սիլիցիդների առկայությունը ստացված MAX-ֆազին հաղորդում է մագնիսական հատկություններ: Վերջինիս ստացումից հետո մամլման ճանապարհով ստացվում է նյութի փոշին:

Այսպիսով, ֆերոսիլիցիումի, տիտանի, ալյումինի, ածխածնի ԲԻՍ մեթոդով փոշիների խառնուրդից կարելի է ստանալ փոշենման զանգված, որը պարունակում է 93% MAX-ֆազ բաղադրությամբ, $(\text{Fe,Ti})_3(\text{AlSi})\text{C}_2$ և 7% զանգվածի չափով ներառումներ: Դրանք հարուստ են երկաթի բյուրեղներով՝ Fe_5Si_3 , Fe_3Si և FeSi , որոնք նյութին հաղորդում են մագնիսական հատկություններ: Պարունակվում են նաև հիմնական ֆազում չլուծվող Ti_5Si_2 և TiC 2%-ի չափով:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Barsoum M.W.** The MN+1AXN phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates // Progress in Solid State Chemistry. – 2000. – №28. – P.201–281.
2. **Barsoum M.W.** MAX phases. Properties of Machinable Ternary Carbides and Nitrides. – Wiley, VCH, 2013. – 437 p.; **Radovic M., Barsoum M.W.** MAX phases: Bridging the gap between metals and ceramics // American Ceramic Society Bulletin. – 2014. – V. 92, No. 3. – P. 20-27.
3. **Chun-Cheng Zhu, Jia Zhu, Hua Wu, Hong Lin.** Synthesis of Ti_3AlC_2 by SHS and thermodynamic calculation based on first principles // Rare Metals. – 2015. – V. 34, No. 2. – P. 107-110.
4. Влияние газифицирующих добавок на фазовый состав продуктов горения при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе MAX-фаз в системе Ti-C-Al / **А.Ф. Федотов, А.П. Амосов, Латухин Е.И. и др.** // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16, № 6. – С. 50-55.
5. $(\text{Cr}_{2/3}\text{Ti}_{1/3})_3\text{AlC}_2$ and $(\text{Cr}_{5/8}\text{Ti}_{3/8})_4\text{AlC}_3$: New MAX-phase Compounds in Ti-Cr-Al-C System / **Zhimou Liu, Liya Zheng, Luchao Sun, Yuhai Qian, et al** // J. Am. Ceram. Soc. – 2014. – V.97, No.1. – P. 67-69.

6. **Мартirosyan В.А., Айвазян А.А., Хачатрян А.Р., Талако Т.Л.** Исследование процессов механохимического и термического обогащения хромитов в присутствии хлоридов и получение порошкообразного хрома // Десятая Международная научно-техническая конференция: “Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка”, 12-14 сентября, 2012 г.- Минск, Беларусь, 2012.- С. 50-52.
7. **Martirosyan V., Sasuntsyan M.** The role of preliminary mechanical activation in the process of obtaining powder-like ferrosilicium from metallurgical slags // Journal of surface engineered materials and advanced technology.- 2016.- №6.- P. 11-17.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 06.12.2021:

Н.Г. СААКЯН

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗО- И КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ МАХ-ФАЗ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Обсуждаются вопросы получения и исследования свойств нового класса мультифункциональных композитов с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) различных металлических порошков. К классу таких композитов относятся МАХ-фазы.

Проведен синтез МАХ-фаз типа $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Si,Al})\text{C}_2$ путем СВС смеси Ti , FeSi , Al и углерода в эквимольных отношениях. Синтезированная основная фаза проявляет магнитные свойства благодаря содержанию железа и кремния. Эксперименты показали, что из смеси порошков ферросилиция, титана, алюминия, углерода методом СВС можно получить порошкообразную основную массу, содержащую 93% МАХ-фазового состава типа $(\text{Fe,Ti})_3(\text{AlSi})\text{C}_2$ по массе и 7% внедрений, богатых кристаллами железа Fe_5Si_3 , Fe_3Si и FeSi , которые придают материалу магнитные свойства, а также содержат нерастворимые в основной фазе Ti_5Si_2 и TiC -2% по массе.

Микроструктура такого МАХ-материала, синтезированного методами порошковой металлургии (СВ синтеза), имеет слоистую, ламинатную природу и может стать хорошим сырьем для дальнейшего легирования данного соединения с различными металлами с целью развития порошковой металлургии в Армении.

Ключевые слова: МАХ-фаза, магнитные свойства, железо, кремний, титан, микрорентгеноструктурный анализ, внедрения.

N.G. SAHAKYAN

**OBTAINING AND STUDYING THE PROPERTIES OF IRON AND
SILICON-CONTAINING MAX-PHASES BY THE METHOD OF SELF-
PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS**

The paper discusses the preparation and properties of a new class of multifunctional composites, which are obtained by high-temperature self-propagating synthesis (SHS) of various metal powders. The class of such composites includes MAX phases.

The aim of this work is to synthesize a MAX-phase of the $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Si,Al})\text{C}_2$ type by self-propagating high-temperature synthesis of a mixture of Ti, FeSi, Al and carbon in equimolar ratios. The synthesized main phase exhibits magnetic properties due to its iron and silicon content. Experiments have shown that from a mixture of powders of ferrosilicon, titanium, aluminum, carbon by the SHS method, it is possible to obtain a powdery base mass containing 93% of the MAX-phase composition of the type $(\text{Fe,Ti})_3(\text{Al,Si})\text{C}_2$ by mass, and 7% embedded in rich crystals iron Fe_5Si_3 , Fe_3Si and FeSi, which impart magnetic properties to the material, also contain Ti_5Si_2 and TiC-2% by weight insoluble in the main phase. In order to accurately assess the size distribution of embedded products in the main phase, a new analysis method was chosen - modern automatic microradiographic analysis (MRSA). The principle of the analysis was presented.

The microstructure of such a MAX material, synthesized by powder metallurgy (SHS synthesis) methods, has a layered, laminate nature and can become a good raw material for further alloying of this compound with various metals for the development of powder metallurgy in Armenia.

Keywords: MAX-phase, magnetic properties, iron, silicon, titanium, X-ray diffraction microanalysis, rooted.

Լ.Ա. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Վ.Վ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ

**ՄՈՂԵԼԱՅԻՆ ՀԵՏԱԳՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՒՄ ՀԱՄԱՐԺԵՔ ՆՅՈՒԹԻ
ՖԻԶԻԿԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ**

Որոշվել են ծավալային ֆիզիկական մոդելավորման համար ընտրված համարժեք նյութի ֆիզիկամեխանիկական և դեֆորմացիոն բնութագրերը՝ նմուշների ուղիղ և եռառանցք կտրման եղանակով լաբորատոր փորձերի կատարման միջոցով: Կատարված լաբորատոր հետազոտությունները ցույց են տվել, որ առկա է շատ քիչ տարբերություն համարժեք նյութի սահքի դիմադրության ուղիղ կտրումից և եռառանցք փորձարկումից ստացված բնութագրիչների միջև: Ցույց է տրվել, որ ֆիզիկական մոդելավորման համար ընտրված համարժեք նյութի ամրության բնութագրերը (ներքին շփման անկյունը և կապակցվածությունը) հնարավոր է որոշել փոքր դեֆորմացիաների նկատմամբ զգայուն՝ ժամանակակից լաբորատոր ուղիղ կտրման և եռառանցք փորձասարքերի միջոցով:

Առանցքային բառեր. համարժեք նյութ, ուղիղ կտրում, եռառանցք սարք, ներքին շփման անկյուն, կապակցվածություն:

Ներածություն. Երկրամեխանիկական միջավայրում ընթացող մեխանիկական գործընթացների ուսումնասիրության համար հայտնի են տարբեր մեթոդներ՝ հիմնված բնական ուսումնասիրությունների, տեսական և վերլուծական նկարագրությունների, ինչպես նաև մոդելային հետազոտությունների կատարման վրա: Մոդելային հետազոտությունների դեպքում առանձնահատուկ նշանակություն ունի համարժեք նյութերի կիրառմամբ երկրամեխանիկական հետազոտությունների տարբեր փուլերի կատարումը ֆիզիկական մոդելավորման մեթոդներով, որոնք ներկայումս լայն տարածում են գտել լեռնային երկրամեխանիկական պրոցեսների ուսումնասիրություններում: Ֆիզիկական մոդելավորման էությունն այն է, որ տրված լեռնային ապարային զանգվածով ներկայացված երկրամեխանիկական միջավայրում ընթացող մեխանիկական գործընթացների, ապարային զանգվածում լարվածադեֆորմացիոն բնութագրերի ուսումնասիրությունների համար համարժեք նյութի օգտագործմամբ կատարվում են մոդելային հետազոտություններ: Մոդելի պատրաստման համար կիրառվում է համարժեք նյութ, որի մեխանիկական հատկություններն ընտրվում են՝ հաշվի առնելով հայտնի նմանության չափանիշները [1]:

Լեռնային ապարային զանգվածի ֆիզիկամեխանիկական ցուցանիշները համարվում են գլխավոր գործոններից մեկը, որոնք բնութագրում են մոդելավորվող երկրամեխանիկական միջավայրում ընթացող գործընթացները: Մոդելավորման

հետազոտությունների հիմքում ընկած է լեռնային ապարային զանգվածի և համարժեք նյութի ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերի միջև առկա հարաբերակցությունների ստեղծումը:

Նախկինում կատարված լաբորատոր և դաշտային փորձարկումներով որոշվել են Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողում տարածվող ապարների, ինչպես նաև երկրաբանական խզվածքում առկա կավային և խախտված կազմությամբ նյութերի ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերը [2]:

Ֆիզիկական մոդելավորման դեպքում համարժեք նյութի ընտրությունը թողնում է զգալի ազդեցություն այս կամ այն խնդրի հստակ լուծման վրա: Ֆիզիկական մոդելավորմամբ լեռնային ապարային զանգվածում ուսումնասիրվող խնդրի լուծման և համարժեք նյութի ընտրության ժամանակ անհրաժեշտ է բարձրացնել ապարային զանգվածի ֆիզիկամեխանիկական հատկությունների որոշման ճշտությունը: Մեխանիկական գործընթացները մոդելավորելիս անհրաժեշտ է ապահովել համարժեք նյութի ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերը՝ ըստ նմանության չափանիշների. ըստ սեղմման, ձգման և սահքի՝ ամրության, նաև առաձգականության մոդուլը, ծավալային զանգվածը, կապակցվածությունը, պլաստիկությունը: Ֆիզիկական մոդելավորման ժամանակ անհրաժեշտ է մոդելի համարժեք նյութում և բնական պայմաններում ըստ մեծության պահպանել Պուասոնի գործակցի և ներքին շփման անկյան նմանությունը [3]: Ընդհանուր առմամբ հայտնի է, որ մոդելային հետազոտություններում դժվար է պահպանել համարժեք նյութի ամրության և դեֆորմացիոն հատկանիշները, ուստի խորհուրդ է տրվում առաձնացնել առաջնային և երկրորդական ցուցանիշները:

Համարժեք նյութի սահքի դիմադրությունը և ծավալային զանգվածը որոշվել են՝ համաձայն գործող նորմատիվային փաստաթղթերի պահանջների, մասնավորապես, օգտագործվել են նմուշների ուղիղ կտրման փոքր լարումների նկատմամբ զգայուն սարքեր (MatTest-ի թողարկված ուղիղ կտրման ժամանակակից զգայուն փորձասարքը):

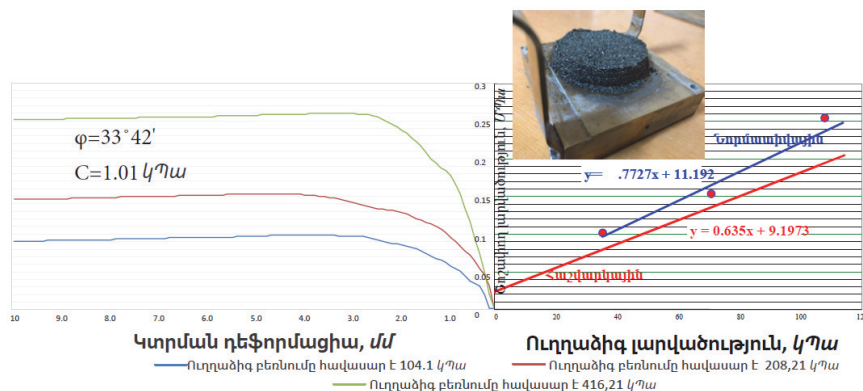
Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Ծավալային ֆիզիկական մոդելավորման ճշտության բարձրացման նպատակով առաջարկվում է որոշել ընտրված համարժեք նյութի ֆիզիկամեխանիկական բնութագրերը՝ ժամանակակից լաբորատոր ուղիղ կտրման և եռառանցք կտրման փորձասարքերի միջոցով:

Ֆիզիկական մոդելավորման համար որպես համարժեք նյութ ընտրվել է գետի ավազը, որը կանխավ լվացվել է՝ կավային մասնիկների առկայությունը բացառելու համար, ինչը նշանակալից ազդեցություն ունի համարժեք նյութի կապակցվածության վրա: Փոքր մասշտաբի մոդելների վրա լաբորատոր փորձարկումների կատարման ժամանակ համարժեք նյութի պատրաստման համար խորհուրդ է տրվում կիրառել 0,20 մմ-ից ցածր հատիկներով մաքուր գետային լվացված ավազը (երբ ընտրված մասշտաբը փոփոխվում է 1:100-ից 1:500 սահմաններ:

րում) [3]: Համարժեք նյութի կապակցվածության բարձրացման համար որպես կապակցանյութ մեր կողմից ընտրվել է տրանսֆորմատորային յուղը:

Հետազոտության արդյունքները. Նորմալ լարվածության միևնույն արժեքի դեպքում կտրման սարքում համարժեք նյութի սկզբնական և վերջնական խտությունները նշանակալիորեն ազդում են մոդելավորման արդյունքների վրա: Կտրման սարքում համարժեք նյութի միջին խտությունը պետք է լինի հավասար մոդելում նյութի խտությանը, և այն կախված է խտացման ժամանակից: Այսպես, կտրման փորձասարքում սահքի դիմադրության անփոփոխ արժեքի ապահովման համար խորհուրդ է տրվում ապահովել համարժեք նյութի նախնական խտացում նվազագույնը 5 և ավելի բուլե տևողությամբ [4], իսկ ծավալային ստենդում գրավիտացիոն ուժերի ազդեցության տակ համարժեք նյութը թողնել 2 օր, ինչը լաբորատոր փորձերի կատարման ժամանակ պահպանվել է:

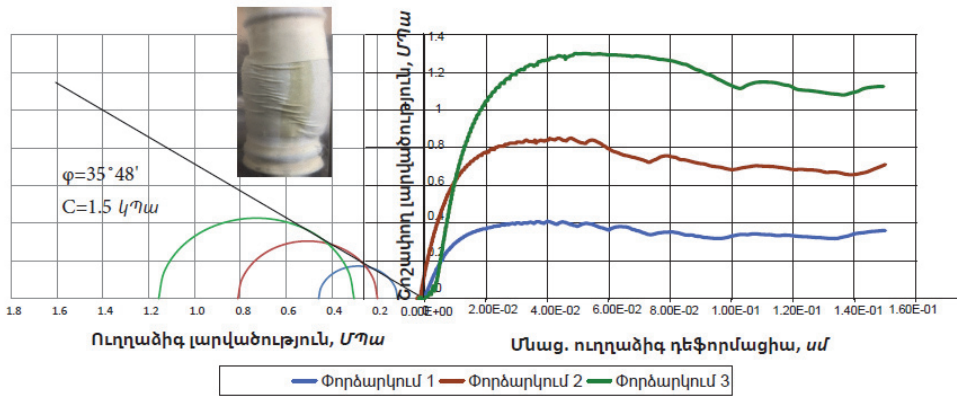
Աշխատանքում 98 : 2, 96 : 4, 94 : 6 և 92 : 8 հարաբերակցությամբ համարժեք նյութերի սահքի դիմադրությունները, փոքր լարումների առկայության պայմաններում, որոշվել են ժամանակակից ուղիղ կտրման լաբորատոր զգայուն փորձասարքով, որով իրականացվում է ընտրված հաստատուն կտրման արագությամբ համարժեք նյութի ուղիղ կտրում, իսկ շոշափող լարվածության և դեֆորմացիայի արժեքները ներկայացվում են տվյալների թողարկման համապատասխան հարթակում: Ուղիղ կտրմամբ փորձը կատարվել է ASTM D 3080/3080M-11 ստանդարտի նորմատիվային պահանջներին համապատասխան: Նկ. 1-ում բերված է 96:4 հարաբերակցությամբ համարժեք նյութի ուղիղ կտրմամբ սահքի ամրության որակական բնութագիրը:



Նկ. 1. 96:4 հարաբերակցությամբ համարժեք նյութի ուղիղ կտրմամբ որակական բնութագիրը և տեսքը ուղիղ կտրումից հետո

Որոշվել են նաև վերևում բերված չորս տարբերակների համար համարժեք նյութերի ամրության բնութագրիչները՝ ըստ կոնսոլիդացված և դրենացված եռա-

ռանցք սեղմմամբ լաբորատոր փորձարկման, հաշվի առնելով մոդելային ստենդում գործող կողային ճնշման միջինացված արժեքը: 96:4 հարաբերակցությամբ համարժեք նյութի եռառանցք կտրմամբ սահքի դիմադրության որակական բնութագիրը բերված է նկ. 2-ում:



Նկ. 2. 96:4 հարաբերակցությամբ համարժեք նյութի եռառանցք փորձարկմամբ սահքի դիմադրության բնութագրերի որոշումը

98 : 2, 96 : 4, 94 : 6 և 92 : 8 հարաբերակցությամբ համարժեք նյութերի ֆիզիկական և դեֆորմացիոն բնութագրերը որոշվել են նորմատիվային ստանդարտներին համապատասխան, և բնութագրերի ամբողջական տեսքը ներկայացված է աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Համարժեք նյութի ֆիզիկական և դեֆորմացիոն բնութագրերը

Հարաբերակցություն, %	Ծավալային զանգված, q/սմ³	Տեսակարար կշիռ, q/սմ³	Լցվածքի ծավալային զանգված, q/սմ³	Հարաբերական խտություն, %	Հատիկաչափական կազմ, մմ		Ծակուտ. գործակից	Յունգի մոդուլ, ՄՊա	Պոասոնի գործակից
					D10	D60			
98:2	1.68	2.79	1.42	54.62	0.30	0.70	0.55	34.050	0.331
96:4	1.70						0.60	30.300	0.353
94:6	1.74						0.64	27.750	0.320
92:8	1.80						0.66	25.900	0.343

Համարժեք նյութի ամրության բնութագրիչները՝ ստացված լաբորատոր գերզգայուն փոքր լարումների նկատմամբ ուղիղ կտրման և եռառանցք փորձերի արդյունքում, ներկայացված են աղ. 2-ում:

Համարժեք նյութի ամրության բնութագրերը՝ որոշված ուղիղ կտրման և եռառանցք փորձերի արդյունքում

Համարժեք նյութի կազմը	Կապակցա- նյութի պարունա- կությունը ըստ քաշի, %	Ներքին շփման անկյունը, աստ.		Կապակցվածությունը, $q^* \text{ ուժ/սմ}^2$		Ծավալային զանգված, $q/\text{սմ}^3$
		Ուղիղ կտրմամբ փորձարկում	Եռառանցք կտրմամբ փորձարկում	Ուղիղ կտրմամբ փորձարկում	Եռառանցք կտրմամբ փորձարկում	
գետային ավազ, տրասֆոր- մատորային յուղ	2	33.07	35.95	0.19	0.55	1.68
	4	33.42	35.2	1.01	1.5	1.7
	6	31.23	33.65	1.79	3.6	1.74
	8	30.47	32.3	3.77	5.35	1.8

Եզրակացություն. Առաջարկվել է ֆիզիկական մոդելավորման համար ընտրված համարժեք նյութի ֆիզիկամեխանիկական և դեֆորմացիոն բնութագրիչները որոշել փոքր լարումների նկատմամբ զգայուն ուղիղ և եռառանցք կտրման լաբորատոր փորձասարքերով: Եռառանցք սեղմմամբ (հաշվի առնելով կոդային ճնշումը) նմուշի կտրման դեպքում ստացվում են ավելի բարձր ներքին շփման անկյուն և կապակցվածություն՝ համեմատած ուղիղ կտրումից ստացված արդյունքների հետ: Մեր կողմից առաջարկվում է համարժեք նյութի ամրության և դեֆորմացիոն բնութագրերը որոշել նմուշի ուղիղ կտրման մեթոդով, իսկ արդյունքների բարձր հուսալիության ապահովման համար այն համեմատել նմուշի եռառանցք կտրմամբ ստացված արդյունքների հետ:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Глушихин Ф.П., Кузнецов Г.Н., Шклярский М.Ф. Моделирование в геомеханике. – М.: Недра, 1991. – 240 с.
2. Մանուկյան Լ.Ա., Հովակիմյան Վ.Վ. «Զանգեզուր ՊՄԿ» ՓԲԸ Քաջարանի բացահանքի հարավարևմտյան կողմի լեռնային զանգվածի վիճակի ռեյթինգային գնահատում// ՀԱՊՀ «Լրաբեր». Գիտ. հոդվածների ժողովածու.- Երևան, 2020.- էջ 448-458 :
3. Насонов И.Д. Моделирование горных процессов. – М.: Недра, 1978.- 254 с.
4. Панюков П.Н., Ржевский В.В., Истомин В.В., Гальперин А.М. Геомеханика отвалных работ на карьерах. – М.: Недра, 1972.-182 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 26.11.2021:

Л.А. МАНУКЯН, В.В. ОВАКИМЯН

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭКВИВАЛЕНТНОГО МАТЕРИАЛА В МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Для объемного физического моделирования определены физико-механические и деформационные свойства образцов выбранного эквивалентного материала методом лабораторных испытаний одноплоскостного и трехосного срезов. Результаты лабораторных исследований показали незначительную разницу между характеристиками одноплоскостного и трехосного срезов. Показано, что прочностные свойства (угол внутреннего трения и сцепление) выбранного эквивалентного материала для физического моделирования можно определить с помощью новейших лабораторных приборов одноплоскостного и трехосного срезов, которые обладают большой чувствительностью к малым значениям срезных усилий.

Ключевые слова: эквивалентный материал, одноплоскостной срез, трехосный прибор, угол внутреннего трения, сцепление.

L.A. MANUKYAN, V.V. HOVAKIMYAN

**DETERMINING THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF THE
EQUIVALENT MATERIAL IN MODEL INVESTIGATIONS**

For volumetric physical modeling, the physical-mechanical and deformation properties of the equivalent material for 3D physical modeling by direct and triaxial shear equipment in laboratory conditions are determined. The results of laboratory tests showed an insignificant difference between characteristics obtained from direct and triaxial shear tests. It has been found that the strength properties of the equivalent material, such as internal friction angle and cohesion, could be defined by modern, laboratory direct and triaxial equipment which possesses high susceptibility to small shear strains.

Keywords: equivalent material, direct shear, triaxial equipment, internal friction angle, cohesion.

Г.А. АГАРОНЯН

НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ

Практика ведения взрывных работ и анализ литературных данных в области управления энергией взрыва свидетельствуют о том, что существующие рекомендации по определению параметров буровзрывных работ (БВР) базируются на ряде приближенных эмпирических и геометрических зависимостей. В результате параметры БВР рассчитываются приближенными значениями, что отрицательно влияет на эффективность взрывных работ.

Считается общепринятым, что удельный расход взрывчатого вещества (ВВ) является основным технологическим фактором регулирования качества дробления, и независимо от физико-механических свойств взрываемого массива, увеличение удельного расхода ВВ приводит к улучшению степени дробления породы. Однако регулирование качества дробления в трещиноватых породах с изменением величины удельного расхода ВВ весьма ограничено.

Анализ существующих методик показал, что расчеты параметров БВР основаны на определении удельного расхода ВВ без учета трещиноватости и акустической жесткости взрываемого массива, что не позволяет получить взорванную массу требуемой кусковатости, поскольку трещиноватость, слоистость и акустическая жесткость взрываемого массива являются основными носителями энергии взрыва.

В статье предложена новая методика расчета параметров буровзрывных работ, учитывающая структурные особенности, прочностные характеристики и геомеханические свойства взрываемого массива, что позволяет в конкретных условиях разрабатываемого карьера иметь развал взорванной массы требуемой кусковатости.

Ключевые слова: трещиноватость, акустическая жесткость, взорванная масса, буровзрывные работы.

Введение. Качество дробления и компактность развала взорванной массы при массовом взрыве на карьерах определяют эффективность взрывных работ и зависят от целого ряда факторов природного и технологического характера.

Основным технологическим фактором при расчете параметров БВР считается удельный расход ВВ. В практике треста Союзвзрывпрома [1] расчеты параметров БВР основаны на определении удельного расхода ВВ в зависимости от крепости пород. В этом случае удельный расход ВВ выбирается по прочности породы без учета трещиноватости массива. Существует мнение

[1], что удельный расход ВВ является основным носителем энергии взрыва, и за счет изменения удельного расхода ВВ можно получить взорванную массу требуемой кусковатости. При взрывании в монолитных средах это положение считается приемлемым. В трещиноватых средах степень дробления зависит от интенсивности трещиноватости массива и резко снижается с ее увеличением. Следует отметить, что при взрывании в трещиноватых породах определение величины удельного расхода ВВ без учета структурных особенностей и геомеханических факторов взрываемого массива не может служить основанием для выбора оптимальных параметров взрывания.

Ряд авторов [2-4] в результате теоретических исследований предлагают расчетные формулы для определения удельного расхода ВВ в зависимости от трещиноватости (блочности) взрываемого массива. Однако предложенные зависимости при применении на производстве, в основном, сопровождаются значительными расхождениями. Это объясняется тем, что в расчетных формулах структурные и технологические факторы представлены эмпирическими коэффициентами, имеющими широкий диапазон изменения. Их уточнение для конкретных горногеологических условий требует проведения опытных взрывов.

Анализ литературных данных в области управления энергией взрыва свидетельствует о том, что существующие рекомендации по определению параметров буровзрывных работ базируются на ряде приближенных эмпирических и геометрических зависимостей. В результате параметры БВР рассчитываются приближенными значениями, что отрицательно влияет на эффективность взрывных работ.

Исходя из вышеизложенного, разработка новой методики расчета параметров БВР, учитывающей структурные особенности, прочностные характеристики и геомеханические свойства взрываемого массива, является актуальной задачей.

Постановка задачи и обоснование методики. Анализ ведения взрывных работ на карьерах показывает, что в монолитных породах на качество дробления взорванной массы влияют параметры БВР. Следует отметить, что с изменением параметров БВР можно получить взорванную массу требуемой кусковатости.

При взрывании в трещиноватых массивах путем изменения параметров БВР, без учета трещиноватости и геомеханических свойств взрываемого массива, невозможно улучшить качество дробления. В этом случае целесообразно осуществлять изменение распределения энергии взрыва в разрушаемом массиве за счет изменения параметров расположения зарядов ВВ. Параметры расположения зарядов ВВ в разрушаемом массиве зависят от диаметра скважинного

заряда ВВ, бризантности применяемых ВВ (скорость детонации ВВ), структурной особенности (трещиноватость, слоистость, анизотропность, неоднородность), прочностных и геомеханических свойств взрываемого массива (предела прочности пород, акустической жесткости массива, упругости пород, скорости волны напряжений в породе и т.д.). При выборе типа и диаметра заряда ВВ необходимо учитывать соответственно скорость детонации ВВ ($D_{ВВ}$) и скорость продольных волн ($V_{пр}$) в массиве.

Диаметр скважинного заряда ВВ зависит от интенсивности трещиноватости, характера прочности и мощности взрываемого массива. Распределение зарядов ВВ в массиве при взрывании блока уступов на карьере характеризуется величиной сопротивления по подошве уступа (W), длиной забойки ($l_{заб}$) и параметрами ($a \times b$) сетки скважин (рис.1). Для определения оптимальных параметров взрывания необходимо решить следующие задачи:

1. Определить оптимальный диаметр скважинных зарядов ВВ в зависимости от трещиноватости (блочности) массива и крепости пород при различной высоте уступа.

2. Выбрать тип применяемых ВВ с учетом акустической жесткости взрываемого массива ($\gamma_n V_{пр}$) и импеданса ВВ ($\rho_{ВВ} D_{ВВ}$).

3. Определить параметры сетки скважин, сопротивление по подошве уступа и оптимальные длины забойки в зависимости от диаметра скважин, типа ВВ, геомеханических параметров взрываемого массива и прочности пород.

На основе результатов производственных взрывов на карьерах Армении и анализа исследований в области управления энергией взрыва в трещиноватых массивах разработан способ определения оптимальной величины диаметра заряда ВВ в зависимости от высоты уступа с учетом трещиноватости массива и крепости пород (табл.1).

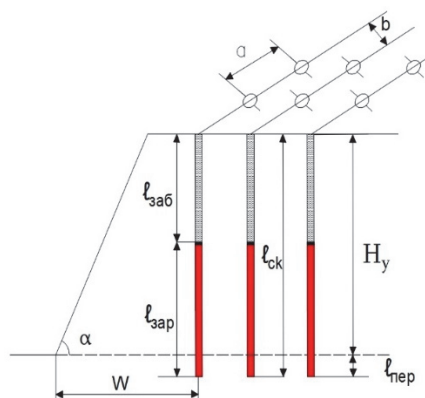


Рис.1. Схема размещения скважинных зарядов на уступе

Таблица 1

Выбор диаметра скважин в зависимости от трещиноватости взрываемого массива и крепости пород при различной высоте уступа

Степень трещиноватости (блочности) массива	Высота уступа Н _у , м				Крепость породы по М.М. Протодяконову, f
	5...10	10...15	15...20	>20	
Диаметр скважин, мм					
Чрезвычайно трещиноватый (мелкоблочный)	150...200	200...250	250...300	300...350	2...6
	140...190	190...240	240...290	290...340	6...10
	30...180	180...230	230...280	280...330	10...14
	110...160	160...210	210...260	260...310	> 14
Сильнотрещиноватый (среднеблочный)	140...180	180...210	210...250	250...290	2...6
	130...170	170...200	200...240	240...280	6...10
	120...160	160...190	190...220	220...260	10...14
	110...140	140...170	170...200	200...230	> 14
Среднетрещиноватый (крупноблочный)	130...170	170...200	200...240	240...280	2...6
	120...160	160...190	190...220	220...260	6...10
	110...150	150...180	180...210	210...240	10...14
	90...130	130...160	160...190	190...220	> 14
Мелкотрещиноватый (весьма крупноблочный)	110...150	150...180	180...210	210...250	2...6
	100...130	130...160	160...190	190...220	6...10
	90...120	120...150	150...180	180...210	10...14
	80...110	110...130	130...160	160...190	> 14
Практически монолитный (исключительно крупноблочный)	140...180	180...220	220...270	270...320	2...6
	120...160	160...200	200...250	250...300	6...10
	100...150	150...180	180...230	230...280	10...14
	90...130	130...170	170...200	200...240	> 14

В табл. 2 приведены области применения ВВ. Критерием выбора ВВ в соответствии с акустической жесткостью взрываемой среды ($\gamma_n V_{np}$) служит импеданс ВВ (табл.3), который определяется произведением плотности ($\rho_{ВВ}$) на скорость детонации ВВ ($D_{ВВ}$). Для передачи максимального количества энергии взрыва разрушаемой среды необходимо выполнение условия

$$0,5 \leq m = \frac{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}{\sqrt{A} \gamma_n V_{np}} \leq 1,5, \quad (1)$$

где $\rho_{ВВ}$ – плотность ВВ, $кг/м^3$; $D_{ВВ}$ – скорость детонации ВВ, $м/с$; V_{np} – скорость продольных волн в породе, $м/с$; γ_n – плотность породы, $кг/м^3$; A – акустический показатель трещиноватости массива (табл. 2).

Таблица 2

Область применения ВВ по акустической жесткости взрываемого массива

Тип	Плотность породы, $\gamma \cdot 10^3$, кг/м^3	Предел прочности пород на одноосное сжатие, $\sigma_{\text{сж}}$, МПа	Скорость продольных волн в породе, $V_{\text{пр}}$, 10^3 м/с	Предел прочности пород на одноосное растяжение, $\sigma_{\text{рас}}$, МПа	Акустическая жесткость взрываемого массива, $10^9 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$	Коэффициент Пуассона, μ	Крепость породы по М.М. Протодакинову, f
Сибирит, Грануло- тол, Акватол 65/35, Детонит 10А, Эмулит БЭТ 500, Эмулсоит	2,65...3,0	>100	5,0...6,0	9,5...20,5	8,3...11,35	0,15...0,25	> 14
Граммонит 79/21, Аммонит 6 ЖВ, Сибирит, Армекс, Гранулотол, Эмулит БЭТ 500	2,55...2,85	50...100	4,0...5,0	5,5...15,5	6,3...8,8	0,2...0,3	10...14
Граммонит 79/21, Аммонит 6 ЖВ, Гранулотол, Анфо, Гранулит АС-8, Игданит	2,35...2,65	<50	2,5...3,5	3,5...10,5	3,6...5,7	0,25...0,30	6...10
Граммонит 79/21, Аммонит 6 ЖВ, Гранулит АС-8, Игданит, Анфо	2,0...2,3	< 20	1,8...2,5	0,8...2,0	2,6...3,6	0,3...0,35	2...6

Таблица 3

Техническая характеристика применяемых ВВ

Тип	Скорость детонации, $D_{\text{вв}}$, м/с	Плотность, ρ , кг/м^3	Импеданс, $\rho \cdot V_{\text{пр}}$, $10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$	Начальное давление газообразных продуктов, P_0 , Па
Граммонит 79/21	3700	900	3,3	1540,1
Гранулотол	5000	1000	5,0	3125,0
Армекс	4800	1200	5,76	3456,0
Аммонит 6 ЖВ	4200	900	3,8	2646,0
Игданит	2200	900	1,98	544,5
Анфо	3600	820	2,95	1328,4
Эмулсоит	4500	1300	5,85	3290,6
Акватол 65/35	5000	1400	7,0	4375,3
Гранулит АС-8	3200	900	2,88	1152,0
Эмулит БЭТ 500	4600	1350	6,21	3570,8
Детонит 10А	5300	1520	8,0	5337,1
Сибирит	4800	1250	6,0	3600

Параметры сетки скважинных зарядов определяются согласно [5]:

$$a = b = 2d_{\text{ск}} \sqrt{\frac{\rho_0}{k_m \sigma_{\text{рас}}}}, \text{ м}, \quad (2)$$

$$P_o = \frac{1}{8} \rho_{BB} D_{BB}^2, \text{Па}, \quad (3)$$

$$k_m = 1 + (2\gamma_{из} P_o) \frac{1 + \mu}{E}, \quad (4)$$

$$E = \frac{v_{np}^2}{1 - \mu} (1 - 2\mu)(1 + \mu)\gamma_n, \text{Па}, \quad (5)$$

где $d_{ск}$ – диаметр скважины, мм; a – расстояние между скважинами в ряду, м; b – расстояние между рядами скважин, м; P_0 – начальное давление газообразных продуктов взрыва на стенке зарядной полости; $\sigma_{рас}$ – предел прочности пород на одноосное растяжение, Па; $\gamma_{из}$ – коэффициент изоэнтропы, $\gamma_{из} = 3$; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона.

На основе аналитических расчетов [6] и результатов опытно-промышленных взрывов предложена формула для определения длины забойки при уступной отбойке:

$$l_{заб} = \frac{K_3 d_{ск} H_y}{a \sqrt[3]{f}} \sqrt{\frac{\rho_{BB} D_{BB}}{2\sigma_{рас}}}, \quad (6)$$

где K_3 – коэффициент, зависящий от фракции (φ) забоечного материала ($\varphi = 0 \dots 5$ мм, $K_3 = 1,0$; $\varphi = 5 \dots 10$ мм, $K_3 = 1,05$; $\varphi = 10 \dots 20$ мм, $K_3 = 1,1$); H_y – высота уступа, м; f – коэффициент крепости пород по М.М. Протодеяконову (табл. 4).

Таблица 4

Акустический показатель трещиноватости в зависимости от степени трещиноватости массива

Категория трещиноватости	Степень трещиноватости (блочности) массива	Среднее расстояние между естественными трещинами, м	Акустический показатель трещиноватости, А	Коэффициент, зависящий от фракции (φ) забоечного материала, K_3
I	Чрезвычайно трещиноватый (мелкоблочный)	до 0.1	0.1	1.15
II	Сильнотрещиноватый (среднеблочный)	0.1...0.5	0.1...0.25	1.1
III	Среднетрещиноватый (крупноблочный)	0.5...1.0	0.25...0.4	1.0
IV	Мелкотрещиноватый (весьма крупноблочный)	1.0...1.5	0.4...0.6	0.9
V	Практически монолитный (исключительно крупноблочный)	>1.5	0.6...1	0.85

Длина заряда ВВ определяется в виде

$$l_{\text{зар}} = l_{\text{ск}} - l_{\text{заб}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где $l_{\text{ск}}$ - длина скважины, м:

$$l_{\text{ск}} = H_y + l_{\text{пер}}, \text{ м}; \quad (8)$$

$l_{\text{пер}}$ – длина перебура:

$$l_{\text{пер}} = \sqrt{H_y^2 + w^2} - H_y, \text{ м}; \quad (9)$$

w – сопротивление по подошве уступа:

$$w = 53 K_T d_{\text{ск}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ВВ}}}{\gamma_{\text{п}}}}, \text{ м}. \quad (10)$$

Количество заряда ВВ в скважине определяется в виде

$$Q = 0.785 l_{\text{зар}} d_{\text{ск}}^2 \rho_{\text{ВВ}}, \text{ кг}. \quad (11)$$

Характерными признаками при выборе схем короткозамедленного взрывания (КЗВ) являются последовательность взрывания отдельных зарядов ВВ и интервал замедления.

Интервал замедления при КЗВ определяется согласно [7]:

$$\tau_3 = \frac{a^2 \gamma_n}{2,5 d_{\text{ск}} \rho_{\text{ВВ}} D_{\text{ВВ}}}. \quad (12)$$

Результаты исследования. Предложенная методика расчета параметров БВР использована на Арамусском базальтовом карьере. Разработка производилась уступами высотой 12 м. Согласно табл. 2 и 3, в качестве ВВ применялся Анфо. В табл. 5 приведены исходные природные показатели взрывающего участка карьера. Взрывающиеся блоки обустраивались по прямоугольной сетке. Расположение скважин применялось многорядное.

В зависимости от структурных особенностей, геомеханических параметров, прочностных характеристик, высоты взрывающего уступа и типа ВВ, рассчитаны параметры БВР. Последовательность расчета параметров взрывания приведена в табл. 6. Учитывая блочность и размеры взрывающего блока, была принята схема многорядного короткозамедленного взрывания с клиновым врубом (рис. 2).

Таблица 5

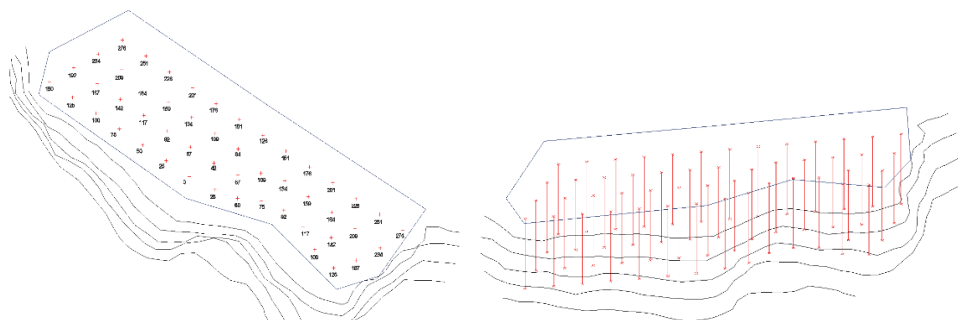
Исходные показатели взрываеваемого блок-уступа Арамусского карьера

Степень трещиноватости (блочности) массива	Среднетрещиноватые породы
Коэффициент крепости пород по М.М. Протодяконову	$f = 10$
Высота уступа	$H_y = 12 \text{ м}$
Акустический показатель трещиноватости массива	$A = 0,25$
Плотность породы, кг/м^3	$\gamma_n = 2650 \text{ кг/м}^3$
Скорость продольных волн в породе	$v_n = 3700 \text{ м/с}$
Акустическая жесткость взрываеваемой среды	$\sqrt{A}(\gamma_n \times v_n) = 4,9 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$
Коэффициент, учитывающий трещиноватость массива	$K_t = 1$
Предел прочности пород на одноосное сжатие	$\sigma_{сж} = 40 \text{ МПа}$
Предел прочности пород на одноосное растяжение	$\sigma_{рас} = 5,5 \text{ МПа}$
Коэффициент Пуассона	$\mu = 0,27$
Коэффициент изоэнтропы	$\gamma_{из} = 3,0$
Модуль Юнга	$E = \frac{\gamma_n^2}{1-\mu}(1-2\mu)(1+\mu)\gamma_n = 2,9 \cdot 10^{10} \text{ МПа}$

Таблица 6

Расчет параметров БВ

Выбор параметров БВР	
1. Выбор диаметра скважин Среднетрешиноватые породы: $f = 10$, $H_y = 12$ м, $K_T = 1$. Согласно таблице 1, диаметр скважины был принят 180 мм.	
2. Выбор типа ВВ $\gamma_n = 2650$ кг/м³, $v_n = 3700$ м/с, $\sqrt{A}(\gamma_n \cdot v_n) = 4,9 \cdot 10^6$ кг/м²с. Согласно таблицам 2 и 3, в качестве ВВ была принята Анфо. $D_{ВВ} = 3600$ м/с, $\rho_{ВВ} = 820$ кг/м³, $P_0 = 328,4$ МПа, $\rho_{ВВ} D_{ВВ} = 2,95 \cdot 10^6$ кг/м²с, $m = \frac{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}{\sqrt{A} \gamma_n \cdot v_{пр}} = \frac{2,95}{4,9} = 0,6.$	
Расчетные показатели параметров БВР	
3. Определение сопротивления по подошве уступа: $w = 53 K_T d_{ск} \sqrt{\frac{\rho_{ВВ}}{\gamma_n}} = 53 \times 1 \times 0,18 \sqrt{\frac{820}{2650}} = 5,2 \text{ м.}$	4. Определение сетки взрывааемых скважин $\sigma_{рас} = 5,5$ МПа; $\gamma_{из} = 3,0$, $k_m = 1 + (2\gamma_{из} P_0) \frac{1+\mu}{E} = 1,35,$ $E = 2,9 \times 10^{10}$ Па, $\mu = 0,27$, $a = b = 2d_{ск} \sqrt{\frac{\rho_0}{k_m \sigma_{рас}}},$ $a = b = 2 \times 0,18 \sqrt{\frac{1328,4}{1,35 \times 5,5}} = 4,8 \text{ м.}$
5. Определение длины перебура: $l_{пер} = \sqrt{H_y^2 + w^2}; l_{пер} = 1,0 \text{ м.}$	
6. Определение длины скважин: $l_{ск} = H_y + l_{пер} = 12,0 + 1,0 = 13,0 \text{ м.}$	
7. Определение длины забойки: $l_{заб} = \frac{K_3 d_{ск} H_y}{a \sqrt[3]{f}} \sqrt{\frac{\rho_{ВВ} D_{ВВ}}{2 \sigma_{рас}}} = \frac{1,0 \times 0,18 \times 12,0}{4,8 \times 2} \sqrt{\frac{820 \times 3600^2}{2 \times 5,5 \times 10^6}} = 3,6 \text{ м.}$	8. Определение длины заряда ВВ: $l_{зар} = l_{ск} - l_{заб} = 9,4 \text{ м.}$
	9. Определение количества ВВ в скважине: $Q = 0,785 l_{зар} d_{ск}^2 \rho_{ВВ} = 196 \text{ кг.}$
10. Определение интервала замедления при КЗВ: $\tau_3 = \frac{a^2 \gamma_n}{2,5 d_{ск} \rho_{ВВ} D_{ВВ}} = \frac{4,8^2 \times 2650}{2,5 \times 0,18 \times 3600 \times 820} = 46 \text{ мс.}$	11. Определение удельного расхода ВВ: $Q = \frac{Q_{ср}}{a w H_y} = \frac{196}{4,8 \times 5,2 \times 12} = 0,65 \text{ кг/м}^3.$



*Рис.2. Схема взрывания и размещения скважинных зарядов в блоке;
0, 25, 42...109...234, 251, 276 - интервал замедления (между скважинами - 25 мс,
между рядами скважин - 42 мс)*

Проведенные производственные взрывы на Арамусском базальтовом карьере показали, что применение рекомендованных параметров БВР позволяет сократить выход негабарита на 12...14%, а также значительно уменьшить разлет кусков взорванной массы.

Выводы

1. При взрывании в трещиноватых средах всегда наблюдается зона, в которой порода не подвергается дроблению взрывом. Основным технологическим подходом для сокращения зоны, не подвергающейся дроблению, является изменение параметров размещения зарядов ВВ в массиве.
2. Важными технологическими факторами при расчете параметров размещения зарядов ВВ считаются диаметр заряда и мощность ВВ.
3. Диаметр заряда ВВ необходимо выбирать с учетом трещиноватости массива и крепости пород.
4. При выборе типа ВВ необходимо учитывать соответственно акустическую жесткость взрывааемого массива и импеданс ВВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности. – М.: Недра, 1972. - 240 с.
2. Справочник взрывника/ Б.Н. Кутузов, В.М. Скоробогатов, И.Е. Ерофеев и др.; Под общ. ред. Б.Н. Кутузова. – М.: Недра, 1988. – 511 с.
3. Кутузов Б.Н., Рубцов В.К. Физика взрывного разрушения горных пород. – М.: МГИ, 1970. - 182 с.
4. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977. - 259 с.
5. Крюков Г.М., Докутович М.И., Жаровонко С.Н. Степень дробления и выхода негабарита при взрывном рыхлении горных пород на карьерах // ГИАБ. - 2011. - N5. - С. 347-351.

6. **Aharonyan G.A., Aharonyan A.G.** The optimal of the sealing material as the main index of regulating the massive explosion activities // Proceedings of National Polytechnic University of Armenia. - Yerevan, 2020. - №2. – P. 92-103.
7. **Тюпин В.Н.** Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. – Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. – 192 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 25.01.2022.

Գ.Ա. ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ

ԲԱՑԱՀԱՆՔԵՐՈՒՄ ՀՈՐԱՏԱՊԱՅԹԵՑՄԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՆՈՐ ՄԵԹՈԴԻԿԱ

Պայթեցման աշխատանքների իրականացման պրակտիկան և գրականության տվյալների վերլուծությունը պայթեցման էներգիայի կարգավորման ոլորտում վկայում են, որ հորատապայթեցման պարամետրերի հաշվարկման ներկայիս գործող առաջարկները հիմնված են մի շարք մոտավոր էմպիրիկ և երկրաչափական օրինաչափությունների վրա: Արդյունքում՝ պայթեցման պարամետրերը ներկայացվում են մոտավոր արժեքներով, որը բացասաբար է ազդում պայթեցման արդյունավետության վրա:

Ընդունված է, որ պայթուցիկ նյութի (ՊՆ) տեսակարար ծախսը ապարի մանրացման որակի կարգավորման հիմնական տեխնոլոգիական գործոնն է, և անկախ պայթեցվող զանգվածի ֆիզիկամեխանիկական հատկություններից՝ ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի մեծացումը հանգեցնում է ապարի մանրացվածության աստիճանի լավացմանը: Սակայն ճեղքավորված ապարներում մանրացվածության որակի կարգավորումը՝ ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի մեծության փոփոխմամբ, շատ սահմանափակ է:

Հորատապայթեցման պարամետրերի որոշման գործող մեթոդների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ հորատապայթեցման պարամետրերի հաշվարկը հիմնված է ՊՆ-ի տեսակարար ծախսի որոշման վրա՝ առանց հաշվի առնելու պայթեցվող զանգվածի ճեղքավորվածությունը, ակուստիկական կոշտությունը, որը թույլ չի տալիս ստանալ պահանջվող մանրացվածությամբ պայթեցված զանգված, քանի որ պայթեցվող միջավայրի ճեղքավորվածությունը, շերտայնությունը և ակուստիկ կոշտությունը համարվում են պայթեցման էներգիայի հիմնական կրողները:

Առաջարկվել է պայթեցվող միջավայրի կառուցվածքային առանձնահատկությունները, երկրամեխանիկական հատկությունները, ապարի ամրության բնութագրերը հաշվի առնող հորատապայթեցման աշխատանքների պարամետրերի հաշվարկման նոր մեթոդիկա, որը թույլ է տալիս մշակվող բացահանքի կոնկրետ պայմանների դեպքում ունենալ պայթեցված զանգվածի փվածք՝ անհրաժեշտ մանրացվածությամբ:

Առանցքային բառեր. ճեղքավորվածություն, ակուստիկական կոշտություն, պայթեցված զանգված, հորատապայթեցման աշխատանքներ:

G.A. AHARONYAN

**A NEW METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF DRILLING
AND BLASTING OPERATIONS AT OPEN PITS**

The practice of conducting blasting operations and the analysis of literature data in the field of explosion energy management indicates that the existing recommendations for determining the parameters of drilling and blasting operations (BVR) are based on a number of approximate empirical and geometric dependencies. As a result, the BVR parameters are calculated with approximate values, which negatively affects the efficiency of blasting operations.

It is generally accepted that the specific consumption of explosives is the main technological factor in regulating the quality of crushing and, regardless of the physical and mechanical properties of the exploding array, an increase in the specific consumption of explosives leads to an improvement of the degree of rock crushing. However, the regulation of the quality of crushing in fractured rocks with a change in the specific flow rate of explosives is very limited.

The analysis of the existing methods has shown that the calculations of the parameters of the BVR are based on the determination of the specific consumption of explosives without taking into account the fracturing and acoustic stiffness of the exploding array, which does not allow to obtain the exploded mass of the required lumpiness, since fracturing, layering and acoustic stiffness of the exploding array are the main carriers of the explosion energy.

The article proposes a new method for calculating the parameters of drilling and blasting operations, taking into account the structural features, strength characteristics and geo-mechanical properties of the exploding array, which allows, in the specific conditions of the open pit being developed, to have a collapse of the exploded mass of the required lumpiness.

Keywords: fracturing, acoustic stiffness, blasted mass, drilling and blasting operations.

Գ.Ռ. ԿԱՆԵՑՅԱՆ, Ա.Գ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Ա.Մ. ԱՄԻՐՋԱՆՅԱՆ,
Ա.Ա. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

**ՀԱԷԿ-Ի ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ԾՐԱԳՐԻ ՍՏՈՒԳՈՒՄ
ՌԻՍԿ-ՏԵՂԵԿԱՑՎԱԾ ՄՈՏԵՑՄԱՍԲ**

Միջուկային կարգավորող մարմնի՝ ատոմային էլեկտրական կայաններում (ԱԷԿ) իրականացվող ստուգումների գործընթացի մաս են կազմում համակարգերի պարբերական փորձարկումների իրականացման ստուգումները: Պարբերական փորձարկումները ԱԷԿ-ի համակարգերի և տարրերի աշխատունակության հավաստման հիմնական միջոցն են: Փորձարկումների պարբերականության սահմանումը բարդ խնդիր է և ենթադրում է բազմաթիվ գործոնների վերլուծություն: ՀԱԷԿ-ի փորձարկումների ծրագիրը սահմանվում է փորձագիտական մոտեցմամբ և ներառում է փորձարկումների տևողությունն ու պարբերականությունը: ՀԱԷԿ-ի համակարգերի փորձարկումների պատշաճ իրականացման, ինչպես նաև ծրագրի արդյունավետության ստուգման համար մշակվել է անվտանգության հավանականային վերլուծության (ԱՀՎ) արդյունքների վրա հիմնված մեթոդաբանություն: Մշակված մեթոդաբանությունը կիրառվել է Հայկական ատոմային էլեկտրակայանի (ՀԱԷԿ) երեք համակարգերի նկատմամբ:

Առանցքային բառեր. միջուկային կարգավորող մարմնի ստուգումներ, փորձարկումներ, փորձարկումների ծրագիր, ԱՀՎ կիրառություն, ռիսկ-տեղեկացված ստուգումներ:

Ներածություն. Պարբերական փորձարկումները մեծ նշանակություն ունեն կայանի անվտանգության վրա համակարգերի տարրերի անսարքությունների հնարավոր բացասական ազդեցության կանխման տեսանկյունից, քանի որ դրանց միջոցով հայտնաբերվում են համակարգերի անհասկանալի նորոգում կամ փոխարինում պահանջող տարրերը: Կարգավորող մարմնի՝ ատոմային էլեկտրական կայաններում իրականացվող ստուգումների գործընթացում կարևոր է հավաստիանալ, որ կայանում ստուգումներն իրականացվում են սահմանված պարբերականությամբ: Փորձարկումների պարբերականությունների որոշումը բարդ խնդիր է և պահանջում է բազմաթիվ գործոնների և նպատակների վերլուծություն: Փորձարկումների միջին պարբերականության որոշման վրա կարող են ազդել կայանի անվտանգության՝ տարրերի հուսալիության հետ կապված ենթադրությունները [1]:

Կարճ պարբերականությամբ հաճախակի փորձարկումները կհավաստիացնեն, որ պաշարային տարրերն աշխատունակ են: Մակայն փորձարկումների ընթացքում տարրերն անջատվում են համակարգից՝ անընդունակ դառնալով կատա-

րելու իրենցից պահանջվող գործառնությունները: Այս հանգամանքը կայանի անվտանգության հետ կապված թաքնված ռիսկեր է ծնում:

Փորձարկումների իրականացումը պահանջում է մարդկային և ֆինանսական ռեսուրսներ: Ռեսուրսախնայողության հետ կապված հետազոտություններ [2] են արվել՝ փորձելով մեծացնել նվազ կարևորությամբ համակարգերի տարրերի ստուգումների պարբերականությունները: Այդպիսի մոտեցումներում, որպես կանոն, կիրառվում են կայանի անվտանգության հավանականային վերլուծության արդյունքները: Հետազոտություններից մեկում [2] ցույց է տրվել, որ նվազ կարևորությամբ համակարգերի տարրերի փորձարկումների պարբերականության մեծացմամբ պայմանավորված՝ ռիսկերի աճը փոխհատուցվում է ավելի կարևոր տարրերը առավել հաճախակի ստուգելով:

Որոշ հետազոտություններում [3,4] ներկայացված են հստակ թիրախներ: Այդպիսի մի հետազոտությունում [3] իրականացված է փորձարկումների պարբերականության օպտիմալացում՝ Մոնտե Կառլոյի մեթոդով մոդելավորմամբ: Դա թույլ է տալիս բավարարել տարրի հասանելիության նվազագույն թիրախը՝ առանց լիամասշտաբ օպտիմալացման [3]: Մեկ այլ հետազոտության նպատակն է նվազեցնել փորձարկումների ծախսատարությունը պարբերականության օպտիմալացմամբ՝ հաշվի առնելով, որ բարձրացած ռիսկը պետք է մնա թույլատրելի սահմանների շրջանակում [4]:

Քանի որ օպտիմալ պարբերականությունների սահմանումը կախված է բազմաթիվ գործոններից, որոշ հետազոտողներ սկսելով են կարևոր գործոնները հավասարակշռված կերպով հաշվի առնելու վրա: Փորձարկումների ռազմավարության՝ համակարգերի տարրերի հասանելիության վրա ունեցած ազդեցության պարամետրական հետազոտություններ են արվել, և անհասանելիության ռիսկերի նվազեցմանն ուղղված փորձարկումների օպտիմալ ռազմավարություններ են առաջարկվել հետազոտական աշխատանքներից մեկում [5]:

Ներկայումս շահագործումից դուրս բերված «Իզնալինա» ԱԷԿ-ի համար մշակված աշխատանքում [6] տրված է փորձարկումների պարբերականությունը տարրերի հասանելիության և հուսալիության հետ կապող մաթեմատիկական մոդել: Մոդելում հաշվի են առնված միաժամանակյա բազմակի խափանումները [6]:

Անձնակազմի սխալներից և անսարքությունների չհայտնաբերմամբ պայմանավորված անհասանելիությունից բխող տարրերի անպատրաստությունը դիտարկվել է համակարգի փորձարկման օպտիմալ պարբերականության որոշման նպատակով [7]:

Մեկ այլ հետազոտությունում [8] մշակվել և իրական տարբերակի կիրառմամբ ցույց է տրվել ժամանակից կախված ինտեգրալ մոդել, որը միաժամանակ ընդգրկում է ծերացման, հսկողության, փորձարկման, ընթացիկ նորոգման և

հիմնանորոգման, ինչպես նաև տեխնիկական սպասարկման գործոնները: Բազմագործոն մոդելի կիրառումը ցույց է տվել, որ փորձագիտական գնահատման միջոցով ընտրված լավագույն լուծումը թույլ է տալիս մեծացնել փորձարկումների պարբերականությունը՝ միաժամանակ նվազեցնելով ակտիվ գոտու վնասման հաճախականությունը, փորձարկումների ծախսատարությունը, ինչպես նաև անձնակազմի ճառագայթման բաժնեչափերը:

Տարբեր տարրերի ստուգումների գործընթացները կարող են ըստ ժամանակի ցրված լինել: Այս հանգամանքը հաշվի առնելիս նկատվել է, որ փորձարկումների պարբերականության օպտիմալացման հարաբերական արդյունքները նվազում են [9]:

Հետազոտություններից մեկում [10] փորձարկումների օպտիմալացման համար ներկայացված է ռիսկերի վրա հիմնված մոտեցում: Մոտեցումը գլխավորապես հիմնվում է ԱՀՎ-ի արդյունքների վրա, և մշակվել են տարրերի՝ համակարգի անհասանելիությամբ պայմանավորված ռիսկերը՝ ակտիվ գոտու վնասման հաճախության վրա դրանց ազդեցությունները նվազեցնելու համար: Մոտեցման կիրառումը ցույց է տրված օրինակով: Ժամանակի ընթացքում ռիսկերի վրա հիմնված մոտեցումներից անցում կատարվեց առավել հուսալի ռիսկ-տեղեկացված մոտեցումների կիրառմանը:

ԱԷԿ-ների որոշ համակարգեր կամ համակարգերի տարրեր ունեն ինքնաարատորոշման հատկություն: Ինքնաարատորոշման հատկությունն օգտակար է փորձարկումների շրջանակի կրճատման տեսանկյունից: Վերևում թվարկված հետազոտություններում դիտարկված էին առանց ինքնաարատորոշման հատկության համակարգերը: Թվալին համակարգերի համար ինքնաարատորոշման ունակության ազդեցությունը փորձարկումների պարբերականության վրա շեշտադրված է հետազոտություններից մեկում [11]: Այդ աշխատանքում փորձարկումների պարբերականության որոշումն իրականացվել է ռիսկ-տեղեկացված մոտեցումների կիրառմամբ:

Ինքնաարատորոշման հատկություն չունեցող համակարգերի տարրերի համար, սարքավորումների փորձարկման պարբերականությունները կրճատելու և արդյունքում տարրերն ավելի հաճախ անհասանելի վիճակի հասցնելու փոխարեն՝ նախընտրելի է ռիսկ-տեղեկացված թիրախային ստուգումների իրականացումը: Դա երկու հաջորդական փորձարկումների միջև ընկած ժամանակային միջակայքում դրական ազդեցություն կունենա կայանի անվտանգության տեսանկյունից: Ռիսկ-տեղեկացված ստուգումների ծրագրման ընթացքում հաշվի են առնվում ԱՀՎ արդյունքները, և հայտնաբերվում են ստուգման ենթակա ամենից նշանակալի տարրերը: Թեև դրանք չեն կարող փոխարինել պարբերական փորձարկումներին և պարբերաբար ցուցադրել տարրերի աշխատունակությունը, սակայն

կարող են օգտակար լինել որպես ստուգումների գործընթացը լրացնող գործիք: Գլխավորապես փաստաթղթերի, կարգավորումների, պիտակների, տարրերի տեղակայման դիրքերի ստուգումները կարող են նվազեցնել համակարգերի խափանման հավանականությունները՝ նվազեցնելով անձնակազմի A տիպի (Type A) սխալներով պայմանավորված ռիսկերը:

Խնդրի դրվածքը. Փորձարկումները ԱԷԿ-ի համակարգերի և տարրերի աշխատունակության հավաստման հիմնական միջոցն են: Այս աշխատանքի հիմնական նպատակն է ներկայացնել ԱՀՎ կիրառող մեթոդաբանություն՝ ՀՀ Միջուկային անվտանգության կարգավորման կոմիտեի կողմից Հայկական ատոմային էլեկտրակայանում օգտագործվող համակարգերի տարրերի փորձարկումների պարբերականության արդյունավետության ստուգման համար: Այդ նպատակով փորձարկումների իրականացման ժամանակ տարրի անպատրաստությամբ պատճառված ռիսկերի աճը պետք է համեմատվի անվտանգության տեսանկյունից կարևոր այդ տարրերը հնարավոր անպատրաստ վիճակում ավելի երկար պահելու ռիսկերի հետ: Աշխատանքում առաջարկված են ՀԱԷԿ-ի համակարգերի փորձարկումների իրականացման հիմնավորված նոր պարբերականություններ՝ գործողների հետ համեմատելու համար:

Նպատակին հասնելու համար գործողությունները բաժանվել են երկու փուլի՝

- մեթոդաբանության մշակում,
- ՀԱԷԿ-ի համակարգերի փորձարկումների ծրագրի արդյունավետության ստուգում:

Առաջին փուլի նպատակն է հայտնաբերել գործողությունների բոլոր պահանջվող քայլերը և նկարագրել դրանք [12]:

Երկրորդ փուլն ուղղված է առաջին փուլում նկարագրված մեթոդաբանության կիրառմանը: Վերլուծության առարկան փորձարկումների ռազմավարությունում արված փոփոխությունների՝ կայանի անվտանգության վրա ունեցած ազդեցության գնահատումն է:

ՀԱԷԿ-ի համակարգերի փորձարկումների ծրագրի ստուգման մեթոդաբանությունը. ՀԱԷԿ-ի համակարգերի փորձարկումների ծրագրի ստուգման մշակված մեթոդաբանությունը հիմնվում է միջազգային փորձի վրա [13-18]:

Հավանականային մեթոդներով փորձարկումների ծրագրի վերլուծություն իրականացնելու համար անհրաժեշտ է որոշել համակարգերի տարրերի շրջանակը: Համակարգերի տարրերի ընտրության համար կարևոր են համարվել հետևյալ տվյալները՝ ԱՀՎ արդյունքները, ՀԱԷԿ-ում ընդունված տարրերի դասակարգումը, փորձարկումների իրականացման հատուկ պայմանները, ներառյալ՝ տնտեսական: Որոշ տարրեր կարող են դուրս թողնվել օպտիմալացման գործընթացից՝ ելնելով փորձարկումների ծախսատարությունից, տարրերի հասանելիության

վրա փորձարկումների ազդեցությունը, եթե տարրը անհասանելի է փորձարկման ընթացքում, այն կարող է ազդեցություն ունենալ անվտանգության վրա, դետերմինիստական մեթոդները և չափանիշները:

ԱՀՎ մոդելի միջոցով կարևոր տարրերի ընտրության համար կարող են օգտագործվել տարատեսակ չափանիշներ՝ Fussel Vesely (FV), ռիսկի աճի գործոն (RIF) և ռիսկի նվազման գործոն (RDF) [19]:

ԱՀՎ արդյունքները, ինչպես նաև փորձարկումների ծրագրի ստուգման արդյունքները կախված են տվյալ էներգաբլոկին բնորոշ հավաքագրված տեղեկության որակից: Պետք է հավաքագրվի ողջ հասանելի տեղեկությունը. կարևոր է տվյալ էներգաբլոկին բնորոշ տեղեկության առկայության դեպքում չկիրառել այլ էներգաբլոկների ընդհանրացված տվյալները: Ասվածը վերաբերում է ոչ միայն փորձարկումների պարբերականության արդյունավետության գնահատման խնդրում անմիջականորեն ընդգրկված տեղեկություն, այլ նաև ԱՀՎ կիրառության այլ ոլորտների, օրինակ՝ տարրերի խափանումների տվյալների վերլուծությանը: Տվյալների հավաքագրման սկզբում որոշվել է պահանջվող տվյալների շրջանակը, և այնուհետև հավաքվել են էներգաբլոկին հատուկ տվյալները: Որոշվել է հավաքագրել երկու հիմնական կատեգորիայի տեղեկություն՝ կայանի էներգաբլոկում դիտարկված համակարգերի փորձարկումների իրականացմանը վերաբերող տեղեկություններ; այլ օժանդակ տեղեկություններ, որոնք կարող են ազդել գործընթացի և վերլուծության արդյունքների վրա:

Դիտարկվել է էներգաբլոկին բնորոշ տեղեկության հավաքագրման երեք հնարավոր տարբերակ՝ կայանի մասնագետների հետ հաղորդակցություն, վերլուծություն իրականացնող արտաքին մասնագետների հետ հաղորդակցություն; կայանի և արտաքին մասնագետների հետ հաղորդակցություն:

Էներգաբլոկին բնորոշ տեղեկության հավաքագրման լավագույն տարբերակը կարող է լինել տարրերի վերաբերյալ (ներառյալ գրառումները և ողջ համապիտանի տեղեկությունը) կայանի պատասխանատու անձնակազմի և ԱՀՎ իրականացնող անկախ արտաքին մասնագետների համագործակցությունը:

Առաջարկվող մոտեցումն ունի երեք հիմնական բաղադրիչներ:

Բաղադրիչ 1. Սահմանել ստուգման առարկան: Այս բաղադրիչն ընդգրկում է վերլուծության շրջանակի սահմանումը և օժանդակ տեղեկության հավաքագրումը:

Բաղադրիչ 2. Իրականացնել ճարտարագիտական վերլուծություն: Ներառում է հետևյալ քայլերը՝ փոփոխության հետ կապված ողջ տեղեկության հավաքագրում, ստուգման առարկայի դետերմինիստական վերլուծություն, ԱՀՎ մոդելի ստուգում, նախորդ քայլերի արդյունքներից կախված՝ ԱՀՎ մոդելի թարմացում, հաստատված ԱՀՎ մոդելի հաշվարկում, ԱՀՎ մոդելի մեջ փոփոխությունների իրականացում, որպեսզի ընդգրկվի ստուգման առարկան, թարմացված և փոփոխված ԱՀՎ մոդելի հաշվարկում և արդյունքների ներկայացում:

Բաղադրիչ 3. Իրականացնել այլընտրանքային տարբերակների ճարտարագիտական վերլուծություն և ստուգման ընթացքում համեմատության չափանիշների որոշում: Նպատակն է ԱՀՎ-ի մոդելում ստուգման առարկայի արտացոլումը և ձևափոխված ԱՀՎ մոդելի վերահաշվարկումը:

Նկարագրվել է փորձարկումների ծրագրի արդյունավետության գնահատման՝ կարգավորող մարմնի տեսանկյունից հետաքրքրություն ներկայացնող եզրակացությունների երկու հիմնական ոլորտ՝ փորձարկումների պարբերականությանը վերաբերող եզրակացություններ, փորձարկումների տևողությանը վերաբերող եզրակացություններ:

Առաջին դեպքում անվտանգության վրա ազդեցությունը պայմանավորված նրանով, որ փորձարկումներն էականորեն նվազեցնում են տարրի անպատրաստ վիճակում գտնվելու հավանականությունը դրա գործարկման անհրաժեշտության դեպքում: Երկրորդ դեպքում անվտանգության վրա ազդեցությունը պայմանավորված է նրանով, որ փորձարկումների ժամանակ տարրը գտնվում է անպատրաստ վիճակում:

ՀԱԷԿ-ի համակարգերի փորձարկումների ծրագրի արդյունավետության գնահատումը. Համակարգերի ընտրությունը կատարվել է ըստ անվտանգության վրա դրանց ունեցած ազդեցության: Համակարգերի կարևորության գնահատման համար (հիմնվելով կարևորության FC և RIF ցուցիչների վրա) կիրառվել է ԱՀՎ մոդելը [19]: Ընտրության գործընթացում հաշվի է առնվել նաև փորձարկումների ակնկալվող ազդեցությունը համակարգի հասանելիության վրա: Իրականացվել է հետևյալ համակարգերն ընդգրկող դեպքերի վերլուծություն՝ վթարային լրասնման համակարգ, լրասնման համակարգ, ցայտաշրմուղային (սպրինկլերային) համակարգ, ընտրված երեք համակարգերը համատեղ:

ՀԱԷԿ-ի ընտրված համակարգերի փորձարկումների ծրագրի արդյունավետության գնահատման նպատակն էր գնահատել փորձարկումների պարբերականության փոփոխման հնարավոր փոփոխությունների ազդեցությունը: Դիտարկվել է երկու դեպք.

- Դեպք 1. տարեկան երկու անգամից ավելի հաճախ փորձարկումներ.
- Դեպք 2. տարեկան երկու անգամից պակաս փորձարկումներ:

Տեսականորեն կարող էին դիտարկվել նաև հաճախականության՝ այլ թվային արժեքով տարբերվող փորձարկումներ (օրինակ՝ չորս կամ հինգ անգամ ավել կամ պակաս և այլն): Մակայն այդպիսի պարբերականությամբ ստուգումները իրականացման տեսանկյունից գործնականում իրատեսական չեն: Ընտրված համակարգերում փորձարկումների տևողությունը 30...40 րոպե է, որը հսկվող պարամետրերի կայունացման համար պահանջվող նվազագույն ժամանակն է: Գործնականում ավելի կարճատև փորձարկումը չի ապահովի բավարար հուսալի և լիակատար տեղեկատվություն՝ համակարգի կամ տարրի բնականոն աշխատանքը

հավաստելու համար: Հետևաբար, փորձարկման տևողության կրճատման ազդեցության վերլուծությունը չունի գործնական կիրառելիություն: Ուստի ուշադրությունը սևեռվել է միայն փորձարկումների պարբերականության փոփոխման վրա: ՀԱԷԿ-ի դիտարկված համակարգերի փորձարկումների պարբերականության արդյունավետության գնահատման համար արվել են հետևյալ ենթադրությունները.

- ընդունվում է, որ փորձարկման ժամանակ ստուգվող բոլոր տարրերը փորձարկման մաս են կազմում,

- ընդունվում է, որ տարրերը փորձարկման ընթացքում ստուգվում են մեկ անգամ:

Յուրաքանչյուր համակարգի համար կազմվում է փորձարկման ենթակա տարրերի, դրանց խափանման տիպերի ցանկ: Ցանկից հեռացվում են այն տարրերը, որոնց աշխատունակությունը նորմալ շահագործման կամ վթարային ռեժիմներում չի կարող հավաստվել: Երբ հայտնաբերվում են տարրերը, որոնց խափանման պարամետրերը կախված են փորձարկումների պարբերականությունից, ստուգվում է մոդելում դրանց ներկայացումը, և արդյո՞ք մոդելը թույլ է տալիս տվյալ նպատակով ԱՀՎ կիրառումը: Ընտրված տարրերի տարրական պատահարների հավանականությունները փոխվել են՝ ավելացնելով պարբերականության փոփոխման չափից ստացված բազմապատկման գործակից:

Հետազոտության արդյունքները. Ընտրված համակարգերի փորձարկումների պարբերականության փոփոխման արդյունքները ամփոփված են աղյուսակում:

Աղյուսակ

Դիտարկված դեպքերի վերլուծության արդյունքները

Դիտարկված դեպքը	Ակտիվ գոտու վնասման հաճախության փոփոխությունը, արտահայտված %-ով	Նվազում / Աճ
Վթարային լրասնման համակարգ		
Դեպք 1	1,82%	Նվազում
Դեպք 2	3,26%	Աճ
Լրասնման համակարգ		
Դեպք 1	0,03%	Նվազում
Դեպք 2	0,03%	Աճ
Ցայտաջրմուղային (սպրինկլերային) համակարգ		
Դեպք 1	3,04%	Նվազում
Դեպք 2	8,06%	Աճ
Վթարային լրասնման համակարգ, Լրասնման համակարգ, Ցայտաջրմուղային (սպրինկլերային) համակարգ		
Դեպք 1	4,88%	Նվազում
Դեպք 2	11,10%	Աճ
Դեպք 1. Տարեկան կրկնակիից ավելի փորձարկում		
Դեպք 2. Տարեկան կրկնակիից պակաս փորձարկում		

Վթարային լրասնման համակարգ. Հաշվարկները ցույց են տվել, որ ստացված ազդեցությունը մեծ չէ, թեև վթարային լրասնման համակարգը բարձր կարևորության համակարգ է և 32 ՆՆՎ պայմանական տրամագծից մեծ տրամագծով ջերմակրի արտահոսքով վթարի դեպքում առաջին կոնտուրի ջերմակրի կորստի փոխհատուցման համար նախատեսված միակ համակարգն է:

Լրասնման համակարգ. Հաշվարկները ցույց են տվել, որ ազդեցությունը աննշան է, քանի որ լրասնման համակարգը բնականոն շահագործման համակարգ է, որի միջոցով կարելի է փոխհատուցել միայն մինչև 32 ՆՆՎ պայմանական տրամագծով պատռվածքից ջերմակրի արտահոսքերը: Բացի այդ, համակարգի այդ գործառույթը կարող է կատարել վթարային լրասնման համակարգը:

Ցայտաջրմուղային (սպրինկլերային) համակարգ. Հաշվարկները ցույց են տվել, որ սա դիտարկված տարբերակներից ամենից մեծ ազդեցությամբ տարբերակն է, որի հիմնավորումն այն է, որ համակարգի գործառույթներից մեկով նախատեսվում է ջերմակրի արտահոսքով վթարի պարագայում հովացնել բորաթթվի լուծույթով բաքը (ՅԶԿ-8/2): Այս համակարգի խափանման դեպքում ակտիվ գոտու հովացման գործառույթը լիովին տապալվում է՝ պոմպի խափանման պատճառով:

Երեք համակարգերի համադրմամբ դեպք. Նախորդ դեպքերի համեմատ ավելի զգալի ազդեցությունը ակտիվ գոտու վնասման հաճախության վրա ընդգծում է բոլոր առաջարկվող փոփոխությունները մինչև ԱՀՎ մոդելում հաշվի առնելու կարևորությունը: Տարբեր համակարգերի կամ տարբեր փորձարկումների պարբերականության փոփոխման արդյունաբար ազդեցությունը հնարավոր չէ ճիշտ գնահատել, եթե համապատասխան փոփոխություններն արված են ԱՀՎ տարբեր մոդելներում:

Եզրակացություն. Մշակվել է ՀՀ Միջուկային անվտանգության կարգավորման կոմիտեի կողմից ՀԱԷԿ-ում փորձարկումների ծրագրի արդյունավետության ստուգման մեթոդաբանություն, և դրա հիման վրա իրականացվել է ՀԱԷԿ-ի ընտրված համակարգերի փորձարկումների ծրագրի արդյունավետության ստուգում: Փորձարկումների օպտիմալ պարբերականությունների որոշման նպատակով կանխադրվել են նոր պարբերականություններ, որոնց ազդեցությունը ՀԱԷԿ-ի անվտանգության վրա գնահատելու համար ԱՀՎ մոդելում փոփոխվել են համապատասխան տարրական պատահարները: Վերլուծության բոլոր դեպքերի համար իրականացվել է ՀԱԷԿ-ի ԱՀՎ մոդելի վերահաշվարկում, և ակտիվ գոտու վնասման հաճախության ստացված արժեքները համեմատվել են ելակետային արժեքների հետ (հաշվարկվել է ակտիվ գոտու վնասման հաճախության փոփոխությունը):

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. https://www.onr.org.uk/operational/tech_asst_guides/ns-tast-gd-009.pdf (16.12.2021).
2. IAEA-TECDOC-1436 Risk informed regulation of nuclear facilities: Overview of the current status.- Vienna, 2005.
3. **Yun-Fu W.U. & LEWINS J.D.** Mechanical System Surveillance Test Interval Optimization// Journal of Nuclear Science and Technology.-1993.-30:12.-P.1225-1233, DOI: 10.1080/18811248.1993.9734616.
4. **Vaurio J.K.** Optimization of test and maintenance intervals based on risk and cost// Reliability Engineering & System Safety.-1995.-Vol. 49, issue 1.-P.23-36, ISSN 0951-8320, [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00035-Z](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00035-Z).
5. **Kleppmann W.G.** The influence of test and repair strategies on the unavailability of safety systems// Nuclear Safety. -1983.-Vol. 24, №5.-P.628-636.
6. **Voronov R. & Alzbutas R.** Optimization of Test Interval of Ignalina Nuclear Power Plant Auxiliary Feedwater Pumps// Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering. Volume 4: Codes, Standards, Licensing and Regulatory Issues; Student Paper Competition.- Brussels, Belgium, July 12–16, 2009. -P.601-605. ASME. <https://doi.org/10.1115/ICONE17-75713> (16.12.2021).
7. **Jong Ho Lee, Soon Heung Chang, Won Hyo Yoon, Seung Yull Hong.** Optimal test interval modeling of the nuclear safety system using the inherent unavailability and human error// Nuclear Engineering and Design.-1990.-Vol. 122, issues 1–3.- P. 339-348, ISSN 0029-5493, [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(90\)90217-L](https://doi.org/10.1016/0029-5493(90)90217-L) (16.12.2021).
8. https://arhiv.djs.si/proc/nene2012/Publication_datoteke/Proceedings/1404.pdf (16.12.2021).
9. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/025/31025625.pdf?r=1&r=1 (16.12.2021).
10. **Cepin M., Mavko B.** Risk Based Surveillance Test Interval Optimization// Nuclear Society of Slovenia 2nd Regional Meeting: Nuclear Energy in Central Europe.- Portoroz, Slovenia, 11-14, September, 1995.
11. **Shi J. and Wang G.** Risk-informed periodic surveillance testing interval of digital safety systems with self-diagnosis capacity // 2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS).- 2014.- P. 1156-1160, doi: 10.1109/ICRMS.2014.7107385.
12. **Hustak S., Sedlak J.** Evaluation of measures regarding surveillance intervals for NPP Dukovany I&C systems ESFAS and SAS: Report UJV Z1888T. -2007.
13. Safety Standards Series No. NS-G-2.6. Maintenance, surveillance and in-service inspection in Nuclear Power Plants.-Vienna, 2002.
14. TECDOC-960. Regulatory surveillance of safety-related maintenance at nuclear power plants.- IAEA.- Vienna, 1997.
15. Safety Series no.50-SG-08. Surveillance of items important to safety in Nuclear Power Plants.- IAEA, Vienna, 1982.
16. Guide № AERB/SG/O-8. (1999). Regulatory Board Safety.- Government of India, 1999.

17. IAEA nuclear energy series, No. NP-T-3.14 Advanced Surveillance, Diagnostic and Prognostic Techniques in Monitoring Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants.- IAEA, Vienna, 2013.
18. Summary of VVER Regulators' Forum PSA Working Group 4th Mandate / **G. Kanetsyan, et al.**- PSA, Los Angeles, USA, 2019.
19. **Խաչատրյան Ա.Գ., Կանեցյան Գ.Ռ., Գևորգյան Ա.Ա.** ՀԱԵԿ-ում ռիսկ-տեղեկացված ստուգումների իրականացման գործընթացի մշակումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա.- 2021.- Հ. LXXIV, N2.- Էջ 158-167:

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 23.02.20221:

Г.Р. КАНЕЦЯН, А.Г. ХАЧАТРЯН, А.М. АМИРДЖАНИЯН, А.А. ГЕВОРГЯН

ПРОВЕРКА ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ААЭС РИСК-ИНФОРМИРОВАННЫМ ПОДХОДОМ

Проверки исполнения периодических испытаний систем атомных электростанций (АЭС) являются частью процесса проверок, проводимых ядерным регулирующим органом на атомных электростанциях. Периодические испытания являются основным средством проверки работоспособности элементов систем АЭС. Определение частоты испытаний является сложной задачей и включает в себя анализ многих факторов. Программа испытаний Армянской АЭС (ААЭС) определяется экспертным подходом, включает длительность и периодичность испытаний. Для проверки надлежащего проведения испытаний систем ААЭС и эффективности проекта испытаний разработана методология на основе результатов вероятностного анализа безопасности. Разработанная методология применена к трем системам ААЭС.

Ключевые слова: проверки ядерного регулирующего органа, испытания, программа испытаний, применение вероятностного анализа безопасности, риск-информированные инспекции.

**G.R. KANETSYAN, A.G. KHACHATRYAN, A.M. AMIRJANYAN,
A.A. GEVORGYAN**

INSPECTION OF THE ANPP SYSTEMS TEST PROGRAM USING THE RISK-INFORMED APPROACH

Checking the periodic test performance of the nuclear power plant systems is part of the inspection process performed by the nuclear regulatory body at the nuclear power plants. Periodic tests are the main means of checking the operability of the elements of NPP systems. Determining the frequency of tests is a complex task and involves the analysis of many factors. The ANPP test program is determined by expert judgement and includes the duration and frequency of tests. A methodology based on the results of the PSA has been developed to check whether the testing of the ANPP systems is properly performed and to estimate the effectiveness of the test project. The developed methodology has been applied to three ANPP systems.

Keywords: nuclear regulatory body inspections, testing, testing program, PSA application, risk-informed inspections.

Ա.Ա. ԴՈՆՈՑԱՆ, Գ.Պ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ռ.Հ. ԱՎՈՑԱՆ

ԱՐԵՎԻ ՇԱՐԺՄԱՆԸ ԵՐԿՈՒ ԱՌԱՆՑՔՈՎ ՀԵՏԵՎՈՂ ՀԻԲՐԻՂԱՅԻՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Մշակվել է Արևի շարժմանը երկու առանցքով հետևող հիբրիդային համակարգ, որը օրվա ցանկացած պահին ընտրում է սարքի թեքման այն անկյունը, որի դեպքում էլեկտրական էներգիայի արտադրությունը լինում է առավելագույնը: Հետևող համակարգի համար մշակվել է աշխատանքի ալգորիթ, կառուցվել է կառավարման համակարգի սկզբունքային սխեման:

Առանցքային բառեր. արևի շարժմանը երկու առանցքով հետևող համակարգ, հիբրիդային հետևող համակարգ, միկրոկոնտրոլեր:

Ներածություն: 21-րդ դարում հասարակության անընդհատ զարգացման, նոր տեխնոլոգիաների կիրառման, դրանց ոլորտների ընդլայնման հետևանքով առաջանում է էլեկտրաէներգիայի ավելի ու ավելի մեծ պահանջարկ [1]: Բնակչության աճին զուգընթաց ավելանում է նաև սննդի պահանջարկը, ինչը առաջնային կենսական նշանակություն ունի մարդկության համար: Արդյունաբերության ողջ թափով աշխատանքի արդյունքում աղտոտվում են շրջակա միջավայրը, գյուղատնտեսական հողերը, ռոռոգման ջրերը, լճերը, ծովերն ու օվկիանոսները: Այս բոլորը սննդի հիմնական աղբյուրներն են, որոնց թունավորումը հանգեցնում է բազմաթիվ անբուժելի հիվանդությունների, մարդկության կյանքի որակի և կյանքի տևողության անկման [2]: Էլեկտրական էներգիայի անվտանգ, առանց արտանետումների և մատչելի արտադրությունը կարևոր դեր է խաղում ժամանակակից աշխարհում: Ածխաթթու գազի արտանետումների կրճատումը եվրոպական երկրներում վերահսկվում է սերտիֆիկատների և էներգիայի ծագումը հավաստող փաստաթղթերի միջոցով [3]: Այս արդեն կայացած շուկայում շրջանառությունը հասնում է անհավանական ցուցանիշների:

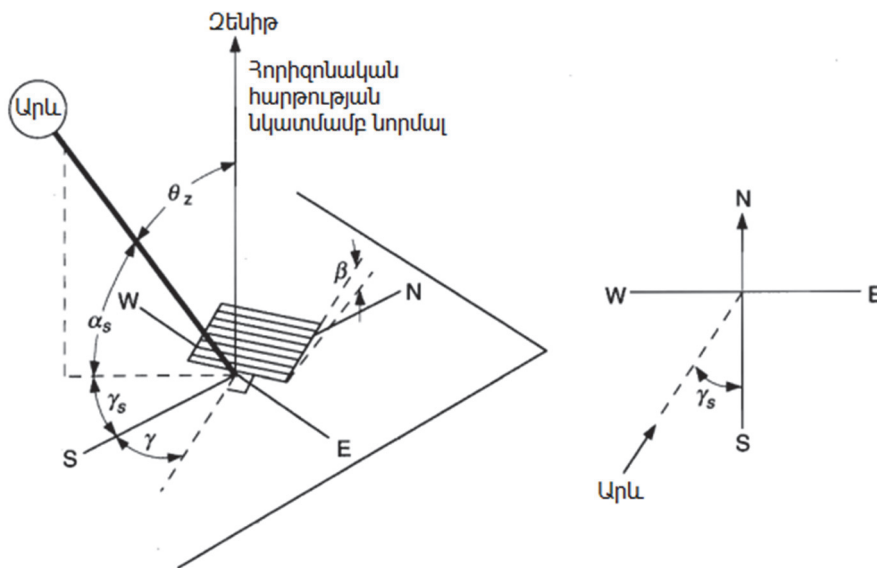
Վերականգնվող էներգետիկայի տեսանկյունից արևային էներգետիկան առանցքային նշանակություն ունի ՀՀ էներգետիկ անկախության և տնտեսության համար: Արևային էներգետիկայի կայուն և օրվա ընթացքում ավելի երկար օգտագործումը արդյունավետ կդարձնի էներգիայի պահանջարկի բավարարման գործընթացը: Երկու առանցքով Արևի շարժմանը հետևող համակարգերը օրվա ընթացքում Արևի էներգիան օգտագործում են 20%-ով ավելի երկար, քան օպտիմալ անկյան տակ տեղադրված կայանները [4]:

[5] աշխատանքում իրականացված է Արևի շարժմանը հետևող համակարգերի ուսումնասիրություն՝ օպտիկական արդյունավետության և պատրաստման տեխնոլոգիաների տեսանկյունից: [6] աշխատանքում ներկայացված է Արևի շարժմանը հետևող գծային ֆրենելային խտարարներով համակարգ, որի օպտիկական արդյունավետությունը կազմել է ընդամենը 47%: Արդյունավետությունը մեծացնելու համար հեղինակներն առջարկել են օգտագործել նոր սերնդի ընդունիչ (evaluated receiver): [7] աշխատանքում Արևի շարժմանը հետևող երկու առանցքներով համակարգի փոխարեն առաջարկվել է գնդաձև մեկ շարժիչով հետևող համակարգ, որը, սակայն, չի առանձնանում բարձր օպտիկական արդյունավետությամբ: Համաձայն հետևող համակարգում կիրառվող (tracing systems) կառավարման մեթոդի՝ առանձնանում են փակ և բաց շղթաներով (close loop, open loop) հետևող համակարգերը: Բաց շղթայով համակարգերում նախապես տրվում է Արևի դիրքի մասին տեղեկությունը՝ օրացուցային տվյալներից ելնելով, իսկ փակ շղթայով համակարգերում՝ սենսորային սարքերի միջոցով փնտրվում է Արևի ամենամեծ խտությամբ ճառագայթներին ուղղահայաց հարթությունը: Փակ շղթայով համակարգերն ավելի աշխատատար և թանկ են, սակայն, միևնույն ժամանակ, ապահովում են ավելի մեծ ճշտություն՝ օգտագործելով առավելագույն հզորության թեքման անկյունը՝ անկախ եղանակային փոփոխություններից: [8] աշխատանքում քննարկվում են Արևի շարժմանը հետևող հիբրիդային համակարգի աշխատանքի սկզբունքները: Արևի շարժմանը հետևող հիբրիդային համակարգերն օգտագործում են բաց և փակ շղթայով համակարգերի հնարավորությունները և օրվա եղանակային պայմաններից ելնելով՝ ընտրում են դրանցից որևէ մեկով աշխատանքի հնարավորությունը: Արևային օրերին հիբրիդային համակարգերը, արևի լույսի ինտենսիվության արժեքներից ելնելով, օգտագործում են Արևի շարժմանը հետևելու սկզբունքը՝ փակ շղթա, իսկ ամպամած օրերին օրացուցային տվյալները՝ բաց շղթա [9]: Այս համակարգերն անընդհատ տեղեկություն են ստանում եղանակային տվյալների մասին և ամպամած օրերին՝ ցրված ճառագայթների դեպքում, չեն փորձում գտնել Արևի շարժմանը հետևող համակարգի ավելի արդյունավետ դիրք:

Խնդրի դրվածքը: Հետազոտության խնդիրն է կազմել Արևի շարժմանը հետևող հիբրիդային համակարգ, որը անկախ օդերևութաբանական կենտրոնի եղանակային տվյալներից՝ հնարավորություն կտա օրվա ցանկացած ժամին գտնել Արևի շարժմանը հետևող համակարգի թեքման օպտիմալ անկյունը:

Արևի շարժմանը երկու առանցքով հետևող համակարգի սխեման և միացվող սարքավորումները: Արևի շարժմանը հետևող համակարգի նախագծման և աշխատանքի մանրամասների ներկայացման համար նախ անհրաժեշտ է սահմանել Արևի դիրքը՝ կախված օրից և ժամից՝ նշանակելով Արևի դիրքը նկարագրող անկյունները:

Նկ. 1-ում ներկայացված են Արևի դիրքը բնութագրող անկյունները արևային համակարգի նկատմամբ: Կարևորագույն նշանակություն ունեն Արևի ազիմուտային և զենիթային անկյունները: Արևի զենիթային անկյունը ցույց է տալիս տվյալ պայմանի Արևի և Երկրի կենտրոնները միացնող գծի և տվյալ կետում Երկրի մակերևույթին տարված նորմալի կազմած անկյունը: Ազիմուտային անկյունը ցույց է տալիս Երկրի հարթության վրա Արևի և Երկրի կենտրոնները միացնող գծի պրոյեկցիայի և հարավային ուղղության կազմած անկյունը: Օրվա ցանկացած պահին այս անկյունների իմացությունը հնարավորություն է տալիս՝ ստեղծելու բավականին ճշգրիտ աշխատող Արևի շարժմանը հետևող համակարգեր:

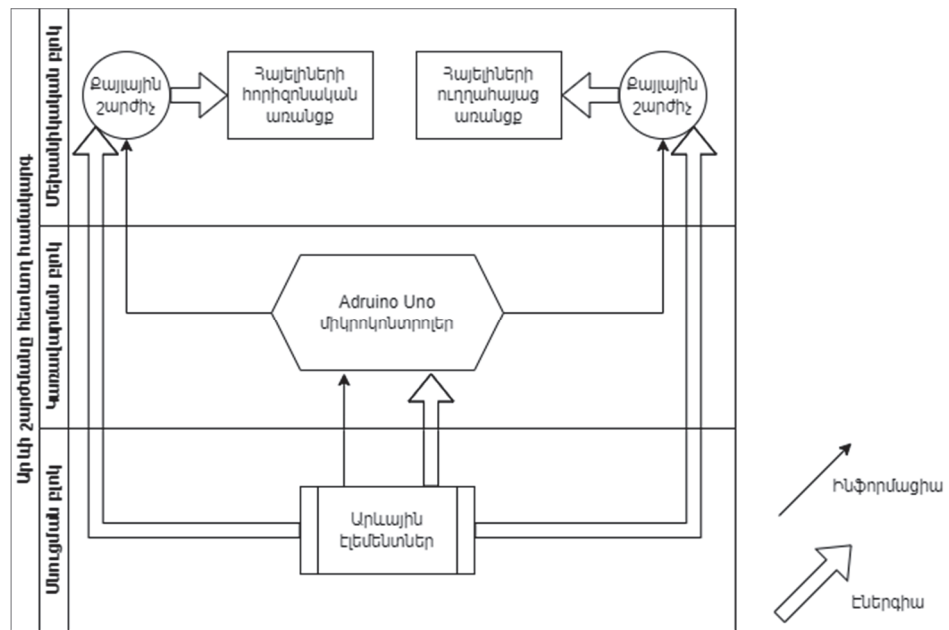


Նկ. 1. Արևի դիրքը երկնակամարում և արևային էներգետիկայում օգտագործվող բնորոշ անկյունները.

γ - հարթության ազիմուտային անկյուն, γ_s - Արևի ազիմուտային անկյուն, α_s - Արևի բարձրության անկյուն, θ_z - Արևի զենիթային անկյուն, β - հարթության բարձրության անկյուն, ϕ - աշխարհագրական լայնություն

Արևի շարժմանը հետևող համակարգը բաղկացած է Արևի շարժմանը հետևող մեխանիկական մասից՝ խտարարներ, հայելիներ, արևային մոդուլի պտտվող հիմքեր և այլն, լուսաէլեկտրական տարրերից, կառավարող միկրոկոնտրոլերից, երկու էլեկտրամեխանիկական քայլային շարժիչներից: Հետևող համակարգի միացման սխեման բաժանվել է երեք պայմանական բլոկների: Էներգասնուցման բլոկը Արևի շարժմանը երկու առանցքներով հետևող համակարգի համար ծառայում է որպես էներգիայի և տեղեկատվության աղբյուր: Արևային տարրերից էներգիա է մատակարարվում կառավարման բլոկին և քայլային շարժիչներին, որոնք

մեխանիկական շարժման միջոցով իրականացնում են պտույտը երկու առանցքների շուրջը: Մյուս կողմից՝ արևային տարրերից վոլտմետրի և ամպերմետրի չափումների արդյունքում իրական ժամանակում հոսանքի և լարման արժեքները տեղեկության տեսքով փոխանցվում են միկրոկոնտրոլերին, որն էլ իր հերթին տեղեկությունը մշակում և վերածում է համապատասխան հրամանի ու փոխանցում այն քայլային շարժիչներին (նկ.2):



Նկ. 2. Արևի շարժմանը հետևող համակարգի միացման սկզբունքային բլոկ-սխեման

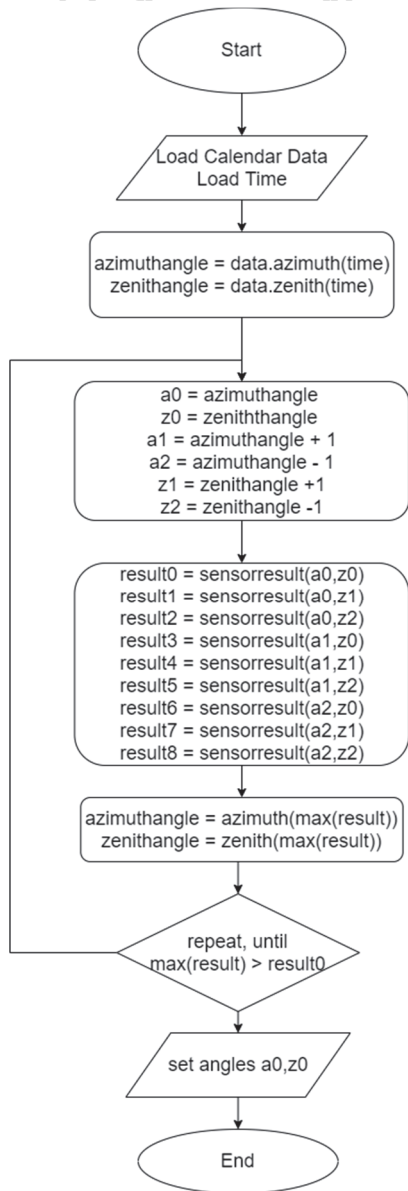
Որպես կառավարող հիմնական տարր ընտրվել է Arduino UNO միկրոկոնտրոլերը, որը պարզ է օգտագործման առումով և բավականին հաջող կիրառություն ունի արևային էներգետիկայում:

Միկրոկոնտրոլերի մուտքերին միացվում են արևային տարրերից արտադրության ցուցանիշների անալոգային արժեքները, որոնք միկրոկոնտրոլերը վերածում է թվայինի: Ելքային օղակներից միկրոկոնտրոլերին միացվում են քայլային շարժիչները, որոնք կառավարվում են նախօրոք տրված ծրագրի միջոցով:

Մշակվել է Արևի շարժմանը հետևելու հիբրիդային համակարգ, որի դեպքում ճշտվում է Արևի դիրքը՝ ըստ օրացուցային տվյալների, այնուհետև արևային մոդուլները բերվում են օպտիմալ դիրքի՝ ըստ սենսորներից ստացված տեղեկությունների:

Նկ. 3-ում բերված է Արևի շարժմանը ծրագրավորված հետևող հիբրիդային համակարգի ալգորիթմը, որը սենսորների փոխարեն օգտագործում է արևային

տարրերից ստացված հզորության արժեքները: Այս համակարգն օգտագործվում է սարքի աշխատանքում՝ կիրառելով ազիմուտային անկյան 1° քայլ, ինչի շնորհիվ



Նկ. 3. Արևի շարժմանը հետևող հիբրիդային համակարգի ալգորիթմը

պամած օրերին: Այս եղանակով համակարգը խնայում է սենսորների համար օգտագործվող միջոցները և աշխատում է արդյունավետ՝ շնորհիվ ծրագրի, որը

ալգորիթմի աշխատանքը, կախված եղանակային պայմաններից, տևում է մինչև 5 վայրկյան:

Օրվա ցանկացած պահի համակարգը թեքվում է օրացույցով նախատեսված անկյամբ և չափում կատարում: Եթե չափման արդյունքը փոքր է տվյալ աշխարհագրական տեղանքի համար Արևի ուղիղ ճառագայթների դեպքում արտադրված միջին հզորությունից, համակարգը թեքվում է մեկ աստիճանով յուրաքանչյուր ուղղությամբ և կրկնում չափումը: Եթե չափման արդյունքներից որևէ մեկը մեծ է օրացույցային անկյան չափման արդյունքից, ապա որպես նոր համեմատության արդյունք ընտրվում է մեծ արդյունքը, և գործողությունը կրկնվում է: Այս գործողությունը շարունակվում է առավելագույնը 8 անգամ, որպեսզի ցրված ճառագայթների դեպքում հետևող համակարգը ավելորդ էներգիայի ծախս չունենա: Այսպես համակարգը օրվա ցանկացած պահի գտնում է հզորության էքստրեմումի կետը և ապահովում առավելագույն էներգիայի արտադրություն:

Արդյունքներ: Նախագծված համակարգը, այլ հիբրիդային համակարգերի համեմատ, չի օգտագործում սենսորներ և չափման արդյունքները համեմատում է հենց արևային մոդուլի իրական ժամանակում արտադրության արդյունքների հետ: Համակարգը, անկախ եղանակային պայմաններից, կատարում է չափումներ և գտնում հետևող համակարգի թեքվածության օպտիմալ անկյունը նաև ամ-

արագ և արդյունավետ կերպով գտնում է առավելագույն արտադրության համար համակարգի թեքման անկյունը:

Եզրակացություն.

- Երկու առանցքով Արևի շարժմանը հետևող համակարգերը օրվա ընթացքում ավելի երկար են օգտագործում արևային էներգիան՝ ապահովելով կայուն էներգամատակարարում:

- Արևի շարժմանը հետևող բազմաթիվ համակարգերն ու դրանց կոնցեպտները հիմնված են օրացուցային տվյալների և իրական ժամանակում կատարվող չափումների վրա:

- Մշակվել է Արևի շարժմանը երկու առանցքներով հետևող հիբրիդային համակարգ, որն օգտագործում է Arduino UNO միկրոկոնտրոլեր և հիբրիդային ալգորիթմ, որի միջոցով հնարավոր է օրվա ցանկացած պահի գտնել համակարգի թեքվածության առավելագույն հզորություն ապահովող անկյունը՝ անկախ եղանակային պայմաններից:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Van Ruijven B.J., De Cian E., Sue Wing I.** Amplification of future energy demand growth due to climate change //Nature communications. – 2019. – Vol. 10, №. 1. – P. 1-12.
2. **Thissen W.** Investigations into the World3 model: Lessons for understanding complicated models //IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1978. – Vol. 8, №. 3. – P. 183-193.
3. Incorporating oligopoly, CO2 emissions trading and green certificates into a power generation expansion model / **P. Linares, et al** // Automatica. – 2008. – Vol. 44, №. 6. – P. 1608-1620.
4. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output / **H. Mousazadeh, et al** //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13, №. 8. – P. 1800-1818.
5. Review on sun tracking technology in solar PV system / **A. Anshul, K.S. Akash, M.S.R. Murali, D. Chandrakant, et al** // Energy Reports.-2020.- Vol. 6.- P. 392-405, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.004>.
6. **Perini S., Tonnellier X., King P., Sansom C.** Theoretical and experimental analysis of an innovative dual-axis tracking linear Fresnel lenses concentrated solar thermal collector// Sol. Energy.- 2017.-153.-P. 679-690.
7. **Oner Y., Cetin E., Ozturk H.K., Yilanci A.** Design of a new three degree of freedom spherical motor for photovoltaic-trackingsystems// Renew. Energy.-2009.- 34.-P. 2751–2756, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.025>.
8. **Rubio F.R., Oretga M.G., Gordillo F., Lopez-Martinez M.** Application of new contro strategy for Sun tracking system// Energy Convers. Manage.-2007.-48.-P. 2174–2284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.020>.

9. **Tamang D. and Roy O.P.** Hybrid Solar Tracking System: A Brief Overview// IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT).- 2019.- P. 1-5, Doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869348.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 23.02.2021:

А.А. ДРНОЯН, Г.П. ВАРДАНЯН, Р.О. АВОЯН

**РАЗРАБОТКА ДВУХСЛОЙНОЙ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА
ДВИЖЕНИЕМ СОЛНЦА**

Разработана гибридная система слежения за движением Солнца, которая выбирает тот угол наклона системы в любое время суток, где получается наибольшее количество энергии. Разработан алгоритм работы гибридной системы, построена принципиальная схема системы управления.

Ключевые слова: двухосная система слежения, за движением Солнца гибридная система слежения, микроконтроллер.

A.A. DRNOYAN, G.P. VARDANYAN, R.H. AVOYAN

**DEVELOPING A TWO-AXIS HYBRID SYSTEM FOR TRACKING THE
MOVEMENT OF THE SUN**

A hybrid system for tracking the Sun movement is developed which selects the angle of inclination of the system at any time of the day, at which the largest amount of energy is obtained. An algorithm for the operation of the hybrid system is developed, the principle scheme of the control system is constructed.

Keywords: two-axis tracking system, hybrid tracking system, microcontrollers.

UDC 004.832

COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATICS

DOI: 10.53297/0002306X-2022.v75.1-72

T.B. KHACHATRYAN, D.F. DAVTYAN

DEPTH ESTIMATION AI INFERENCING COMPARISON OF JETSON XAVIER
NX AND CORAL DEV BOARD

AI inferencing, especially the real time processing of neural networks may require excessive calculation power in terms of speed and memory, thus opening a big area for research and design of new devices intended for AI acceleration. Examples of such devices are Nvidia's Jetson series, Google's Coral. Also, there are FPGA solutions such as Xilinx's AI applicable FPGA. Depending on application requirements it could be difficult to choose between these devices, as in most cases, speed and accuracy are the most important factors, while there are also applications which require low power and low cost. Thus, investigation and comparison of these inferencing devices in terms of speed, memory, power and cost for the chosen field of subject may be useful for choosing the right device for the given task. We have done such an analysis for the depth estimation task using Jetson Xavier NX and Coral Dev Board as inferencing devices.

Keywords: a artificial intelligence, neural network, depth estimation, Jetson Xavier NX, Coral Dev Board.

Introduction. In this work, we are analyzing the inference of depth estimation deep learning model on AI inferencing devices to find out their advantages and disadvantages for the specified task. We have chosen depth estimation from computer vision subtasks, as it is more challenging and comparably less investigated in literature. Also, the possible opportunity of replacing the traditional methods of depth estimation increases the interest of this analysis, because the Photogrammetry which is the main tool for depth estimation nowadays requires heavy 3D reconstruction processing, that is only suitable on stationary processing units. Meanwhile, there are applications that require instantaneous information on scene properties, such as UAVs obstacle avoidance, indoor navigation, self-driving vehicles, etc. [1]. We have used aerial footage for training and testing our models as it is the hardest in terms of picture properties due to long shooting distances, meaning low resolution on objects.

Many authors solved the depth estimation problem, using supervised neural networks [2-4]. Although, supervised methods provide high accuracy, they require large datasets with accurate ground truth depth maps, thus reducing their applicability. As an alternative, self-supervised methods can be applied, which do not require any

ground truth depths and provide enough accuracy. There are two main methods of self-supervised depth estimation: through stereo pairs [5, 6] and through monocular videos [7, 8]. We have used monocular videos in this work.

The inferencing devices were compared in terms of the output image depth quality, speed, required memory, power usage. We have chosen Jetson Xavier NX and Google Coral as inferencing devices, as they have one of the best price-performance ratios in the market and have not been sufficiently investigated in literature.

The chosen model. This section briefly describes the chosen model for depth estimation and also presents the inferencing hardware and the steps for preparing models to inference.

For depth estimation we have used a convolutional neural network which is similar to the network presented by [9] with some small architectural changes. One of such changes is the replacement of Exponential Linear Units (ELU) with Parametric Rectified Linear Units (PReLU) in the decoder part. This is necessary, because Edge TPU Compiler [10] does not support ELU operation.

Jetson Xavier NX specifications. Jetson Xavier NX is a power-efficient, compact module for AI edge devices. It accelerates the NVIDIA software stack in as little as 10 W with more than 10x the performance of its widely adopted predecessor Jetson TX2. The brief properties of this device are described below.

GPU	NVIDIA Volta architecture with 384 NVIDIA CUDA cores and 48 Tensor cores
Memory	8 GB 128-bit LPDDR4x 51.2 GB/s
Video Encode	2x 4Kp30 6x 1080p 60 14x 1080p30

Xavier NX is capable of **21 TOPS** (int8) or **6 TFLOPS** (fp16) of AI performance while consuming only 15 watts of power. When limited to 10 watts, it can still perform at **14 TOPS**. More detailed evaluation can be found in Nvidia's site.

Coral Dev Board specifications. The Coral Dev Board is a single-board computer that's ideal for performing fast machine learning (ML) inferencing in a small form factor. The on-board Edge TPU coprocessor is capable of performing **4 trillion operations (tera-operations) per second (TOPS)**, using 0.5 watts for each TOPS (2 TOPS per watt). The brief properties of this device are described below.

CPU	NXP i.MX 8M SoC (quad Cortex-A53, Cortex-M4F)
GPU	Integrated GC7000 Lite Graphics
ML accelerator	Google Edge TPU coprocessor
Memory	4 GB LPDDR4

Inference. We have done inference on Jetson Xavier NX using Nvidia TensorRT Python API, CUDA Python API and Jetson-inference library. For generating the TensorRT engine which is required for the inference, first we have converted our PyTorch model to Open Neural Network Exchange (ONNX) format, and then we have generated TensorRT engine from ONNX model [11].

The PyCoral Python API and TFLite models have been used during the inference on Coral Dev Board [12]. For generating TFLite models, first we have converted our PyTorch model to Open Neural Network Exchange (ONNX) format, then we have converted ONNX format to OpenVINO, and finally the TFLite models have been created by converting OpenVINO model to Tensorflow and using TFLite converter. The ONNX to OpenVINO step was necessary, because PyTorch and Tensorflow use different data storing formats and it is difficult to directly convert between them.

We have created various engines with different input resolution and precision parameters and have performed extensive experiments which are described in the following section.

Experiments. In this section we introduce the dataset and the comparison of TensorRT and TFLite models' results.

Dataset. We have used China video sequences from the UAVid dataset [13] for creating training, validation and test sets. There are 34 video sequences with a resolution of 3840x2160 in China sub-dataset.

Like [14], for testing the model performance, we compared the depth maps generated by the model with reference depths. As reference depths the point clouds generated through Pix4D photogrammetric tool were used. A total of 412 images were obtained as reference depths through this process.

Evaluation metrics. To assess the performance, various pixel-wise metrics are calculated between the predicted and reference depths. The evaluation of the accuracy is done based on calculating several metrics between the single image depths (d') generated from the model and the reference depths (d) produced using Pix4D. The evaluation metrics are: Absolute Relative difference (Abs Rel) given in equation (1), Squared Relative difference (Sq Rel) given in equation (2), Root Mean Square Error (RMSE) given in equation (3), Root Mean Square Logarithmic Error (RMSE log) given in equation (4). The accuracy given in equation (5) is described in [9] and [14]:

$$AbsRel = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|d(x_i) - d'(x_i)|}{d(x_i)}, \quad (1)$$

$$SqRel = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|d(x_i) - d'(x_i)|^2}{d(x_i)}, \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d(x_i) - d'(x_i))^2}, \quad (3)$$

$$RMSElog = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log(d(x_i)) - \log(d'(x_i)))^2}, \quad (4)$$

$$Accuracy(\delta_\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \max\left(\frac{d_i}{d'_i}, \frac{d'_i}{d_i}\right) < \theta. \quad (5)$$

Here the accuracy represents the fraction of pixels that are within a certain threshold θ to the corresponding pixel wise value in the reference depth map. The thresholds chosen are 1.05, 1.15, 1.25, $(1.25)^2$, $(1.25)^3$.

Comparison of results. We have performed the comparison of TensorRT and TFLite models in terms of accuracy, inference statistics, memory usage, power usage, model complexities. The evaluation of our models' accuracies was carried out by comparing the results with reference depths generated using the PIX4D software. We also present the comparison with the result published by [14] which is one of the best works that uses the UAVid dataset.

In Table 1 and Table 2 are shown the comparisons of model accuracies with input resolutions of 256x160 and 320x192 respectively.

From Table 1, we can see that decreasing precision from fp32 to fp16 does not significantly change the results. The results are slightly decreased when using int8 data type, but it gives more performance boost. The results of the model with int8 data type were measured after performing the calibration process. For that we have used calibration dataset, which includes more than 400 images from the original training dataset.

The difference between TFLite and TensorRT Int8 models' accuracies may be caused by different calibration processes of the TensorRT and TFLite converter.

From Table 2, we can see that using higher input resolution improves the results for both TensorRT and TFLite; however, it increases the model complexity.

Table 1

Results achieved over models with input resolution of 256x160

Model name	TensorRT model (256x160)			TFLite model (256x160)	Results from Madhuanand et al (2021)
Data type	Fp32	Fp16	Int8	Int8	Fp32
Absolute relative	0.269	0.269	0.27	0.29	0.109
Square relative	17.552	17.549	17.541	23.692	7.742
RMSE	52.463	52.479	52.352	63.314	48.303
RMSE log	0.293	0.293	0.293	0.316	-
a1 (<1.25)	0.649	0.649	0.649	0.642	0.878
a2 (<1.25 ²)	0.859	0.859	0.86	0.836	-
a3 (<1.25 ³)	0.936	0.937	0.936	0.92	-
a2* (<1.15)	0.487	0.487	0.485	0.466	0.761
a3* (<1.05)	0.192	0.191	0.193	0.175	0.327

Table 2

Results achieved over models with input resolution of 320x192

Model name	TensorRT model (320x192)			TFLite model (320x192)	Results from Madhuanand et al (2021)
Data type	Fp32	Fp16	Int8	Int8	Fp32
Absolute relative	0.255	0.255	0.259	0.234	0.109
Square relative	15.523	15.528	15.954	16.095	7.742
RMSE	51.523	51.552	52.132	55.275	48.303
RMSE log	0.279	0.279	0.282	0.262	-
a1 (<1.25)	0.65	0.65	0.643	0.709	0.878
a2 (<1.25 ²)	0.874	0.874	0.869	0.902	-
a3 (<1.25 ³)	0.945	0.945	0.944	0.956	-
a2* (<1.15)	0.489	0.489	0.484	0.517	0.761
a3* (<1.05)	0.2	0.2	0.196	0.204	0.327

Table 3 and Table 4 show the model complexities expressed in floating point operations (FLOPs) and memory usages of the models. As we can see, TFLite models on Coral are simpler and significantly superior TensorRT models in terms of the memory used. Table 3 shows that TensorRT models require less memory in case of fp16 and int8 data types.

Table 3

TensorRT model complexities and memory usages

Input resolution		256x160	320x192
Number of parameters		14.8 M	14.8 M
Model complexity	Fp32	0.85 GFLOPs	1.6 GFLOPs
	Fp16	0.6 GFLOPs	0.65 GFLOPs
	Int8	NA	NA
Memory usage	Fp32	4 Gb	4 Gb
	Fp16	3.3 Gb	3.3 Gb
	Int8	3.3 Gb	3.3 Gb

Table 4

TFLite model complexities and memory usages

Input resolution		256x160	320x192
Number of parameters		14.8 M	14.8 M
Model complexity	Int8	NA	NA
Memory usage	Int8	175 Mb	180 Mb

Comparisons of models' performances measured by the number of frames processed in a second (FPS) are given in Table 5 and Table 6. From these tables, we can see that decreasing the precision significantly improves FPS numbers of TensorRT models giving about 4-5 times higher results compared to TFLite models.

Table 5

Inference statistics (FPS) of various models with input resolution of 256x160

Video resolution	Input resolution	TensorRT model			TFLite model
		Fp32	Fp16	Int8	Int8
640x192	256x160	65 FPS	95 FPS	106 FPS	20 FPS
720x480	256x160	48 FPS	62 FPS	68 FPS	16 FPS
1280x720	256x160	31 FPS	38 FPS	39 FPS	11 FPS

Table 6

Inference statistics (FPS) of various models with input resolution of 320x192

Video resolution	Input resolution	TensorRT model			TFLite model
		Fp32	Fp16	Int8	Int8
640x192	320x192	44 FPS	75 FPS	85 FPS	16 FPS
720x480	320x192	30 FPS	55 FPS	60 FPS	14 FPS
1280x720	320x192	25 FPS	33 FPS	36 FPS	10 FPS

In Table 7 and Table 8 are shown the power usages of TensorRT models with input resolutions of 256x160 and 320x192 respectively. TFLite models consume less than 2000 mW on Coral Dev Board. We are not presenting detailed power consumption results for Coral Dev Board, as Google has not developed yet an accurate utility for power estimation. As we can see, Coral Dev Board is much more power-efficient than Jetson Xavier NX.

Table 7

Power usage of TensorRT models with input resolution of 256x160

Video resolution	Input resolution	TensorRT model			Idle power usage
		Fp32	Fp16	Int8	
640x192	256x160	10100 <i>mW</i>	7700 <i>mW</i>	6800 <i>mW</i>	3000 <i>mW</i>
720x480	256x160	8800 <i>mW</i>	6800 <i>mW</i>	6200 <i>mW</i>	3000 <i>mW</i>
1280x720	256x160	7800 <i>mW</i>	6400 <i>mW</i>	5900 <i>mW</i>	3000 <i>mW</i>

Table 8

Power usage of TensorRT models with input resolution of 320x192

Video resolution	Input resolution	TensorRT model			Idle power usage
		Fp32	Fp16	Int8	
640x192	320x192	11000 <i>mW</i>	8200 <i>mW</i>	7100 <i>mW</i>	3000 <i>mW</i>
720x480	320x192	9600 <i>mW</i>	7400 <i>mW</i>	6400 <i>mW</i>	3000 <i>mW</i>
1280x720	320x192	8400 <i>mW</i>	6600 <i>mW</i>	6000 <i>mW</i>	3000 <i>mW</i>

Conclusion. For the comparison of metrics evaluated in this work, it is obvious that Jetson Xavier NX outperforms Coral Edge TPU in terms of inference speed and computational power. Meanwhile, Coral Edge TPU is more energy and memory efficient. Adding to this Coral's low price, we can argue that it can be a good choice in applications where low power and low cost are essential. Although, both devices perform well, they still have to work on improving data transmission, as we can see both of them have difficulties with high resolution inputs.

For future work, we would like to explore the depth estimation inference on high resolution videos, as the experiments show, that increasing resolution can significantly improve the accuracy.

REFERENCES

1. **Nex F., Remondino F.** UAV for 3D mapping applications: A review // Appl. Geomatics. - 2014. - Vol. 6. - P. 1-15.
2. **Eigen D., Puhrsch C., Fergus R.** Depth Map Prediction from a Single Image using a Multi-Scale Deep Network // Advances in Neural Information Processing Systems. - 2014. - P. 2366-2375.
3. Deep ordinal regression network for monocular depth estimation / **H. Fu, M. Gong, C. Wang, et al** // CVPR. - 2018. - P. 2002-2011.
4. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks / **I. Laina, C. Rupprecht, V. Belagiannis, et al** // 3DV. - 2016. - P. 239-248.
5. **Garg R., Kumar BG V., Carneiro G., Reid I.** Unsupervised CNN for Single View Depth Estimation: Geometry to the Rescue // ECCV. - 2016. - P. 740-756.
6. **Godard C., Mac Aodha O., Brostow G. J.** Unsupervised Monocular Depth Estimation with Left-Right Consistency // Computer Vision and Pattern Recognition. - 2017. - P. 6602-6611.

7. **Zhou T., Brown M., Snavely N., Lowe D.** Unsupervised learning of depth and ego-motion from video // Computer Vision and Pattern Recognition. - 2017. - P. 6612-6619.
8. **Casser V., Pirk S., Mahjourian R., Angelova A.** Depth prediction without the sensors: Leveraging structure for unsupervised learning from monocular videos // AAAI. – 2019.
9. **Godard C., Aodha O.M., Firman M., Brostow G.** Digging into self-supervised monocular depth estimation // IEEE International Conference on Computer Vision. - 2019. - P. 3827-3837.
10. <https://coral.ai/docs/edgetpu/compiler/>.
11. <https://docs.nvidia.com/deeplearning/tensorrt/developer-guide/index.html>.
12. <https://coral.ai/docs/reference/py/>.
13. **UAVid: A semantic segmentation dataset for UAV imagery / Y. Lyu, G. Vosselman, G. Xia, et al** // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. - 2020. - Vol. 165. - P. 108-119.
14. **Madhuanand L., Nex F., Yang M.Y.** Self-supervised monocular depth estimation from oblique UAV videos // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. - 2021. - Vol. 176. - P. 1-14.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 03.03.2022.

Տ.Բ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Դ.Ֆ. ԴԱՎԹՅԱՆ

ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ԲԱՆԱԿԱՆՈՒԹԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ ՊԱՏԿԵՐԻ ԽՈՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ JETSON XAVIER NX-Ի ԵՎ CORAL DEV BOARD ՏՐԱՄԱԲԱՆԱԿԱՆ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅԱՆ ՍԱՐՔԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Արհեստական բանականության (ԱԲ) տրամաբանական եզրակացությունը, մասնավորապես՝ ներդոնային ցանցերի իրական ժամանակում մշակումը, կարող են պահանջել չափազանց մեծ հաշվարկային հզորություններ, այդպիսով բացելով մեծ դաշտ ԱԲ արագացման համար նախատեսված նոր սարքերի հետազոտման և նախագծման համար: Այդպիսի սարքերի օրինակներ են Nvidia-ի Jetson շարքը, Google-ի Coral-ը: Կան նաև FPGA լուծումներ, ինչպիսին է Xilinx-ի ԱԲ կիրառելի FPGA-ը: Կախված հավելվածի պահանջներից՝ կարող է դժվար լինել ընտրության կատարումը այս սարքերի միջև, քանի որ հիմնականում ամենակարևոր գործոնները արագությունն ու ճշգրտությունն են, մինչդեռ կան նաև հավելվածներ, որոնք պահանջում են ցածր հզորություն և գին: Այս եզրակացության սարքերի հետազոտումն ու համեմատումը, ընտրված ոլորտի համար արագության, հիշողության, ծախսած հզորության և գնի տեսանկյունից, կարող են օգտակար լինել տրված խնդրի համար ճիշտ սարք ընտրելու գործում: Կատարվել է այսպիսի վերլուծություն պատկերի խորության գնահատման խնդրի համար՝ որպես եզրակացության սարքեր օգտագործելով Jetson Xavier NX-ը և Coral Dev Board-ը:

Առանցքային բառեր. արհեստական բանականություն, ներդոնային ցանց, խորության գնահատում, Jetson Xavier NX, Coral Dev Board:

Т.Б. ХАЧАТРЯН, Д.Ф. ДАВТЯН

**СРАВНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА JETSON XAVIER NX
И CORAL DEV BOARD ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЛУБИНЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ С
ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Логический вывод искусственного интеллекта (ИИ), в частности - обработка нейронных сетей в реальном времени, требует чрезмерно больших вычислительных мощностей, тем самым открывая большую область для исследования и проектирования новых устройств ускорения ИИ. Примерами таких устройств являются Nvidia Jetson, Google Coral. Имеются также решения FPGA, такие как FPGA Xilinx, для применения ИИ. В зависимости от требований приложения, выбор этих устройств может быть трудным, так как самыми главными факторами в основном являются скорость и точность, но имеются приложения, которые требуют низких мощностей и цен. Таким образом, исследование и сравнение этих устройств применения, с точки зрения скорости, памяти, потраченной мощности и цены для выбранной сферы, позволят выбрать правильное устройство для поставленной задачи. Проведен анализ для задачи оценки глубины изображения, используя в качестве устройств применения Jetson Xavier NX и Coral Dev Board.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронная сеть, оценка глубины, Jetson Xavier NX, Coral Dev Board.

Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՀԱԿԱԱՆԴՐԱԴԱՐՁՆՈՂ
ՄԱԿԵՐՆԵՎՈՒԹՅՈՒՆԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ.
ՄԱՍ 1. ՕՂՏԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐ

Ժամանակային տիրույթի վերջավոր տարբերության մեթոդով մոդելավորվել և փորձ-նականորեն հետազոտվել են սիլիցիումային արևային էլեմենտների տարբեր տեսքերի անհարթություններով (միկրոկառուցվածքային բուրգ, նանոկառուցվածքային անցք, պուն և կոն) հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական բնութագրերը: Ցույց է տրվել, որ առավել արդյունավետ են կոնաձև անհարթություններով մակերևույթները, որոնք ձևավորվում են ռեակտիվ իոնային խաճատմամբ սև սիլիցիումի առաջացման ռեժիմում: Քննարկվել է արդյունաբերական նշանակությամբ արևային էլեմենտներում միկրո- և նանոկառուցվածքային հակաանդրադարձնող մակերևույթների հիբրիդային կիրառման նպատակահարմարությունը:

Առանցքային բառեր. արևային էլեմենտ, հակաանդրադարձնող մակերևույթ, սև սիլիցիում, օպտիկական բնութագրեր:

Ներածություն: Միլիցիումային արևային էլեմենտների օպտիկական կորուստների փոքրացման արդյունավետ մեթոդներից է հակաանդրադարձնող մակերևույթների կիրառումը: Դրանք մակերևութային կանոնավոր կամ անկանոն տեղաբաշխված ծակոտիների, ասեղիկների, բուրգերի կամ փոսիկների տեսքով տեքստուրաներ են, որոնք, ըստ անհարթությունների չափսերի, կարող են լինել միկրո- կամ նանոկառուցվածքային [1-5]:

Ընդհանուր առմամբ, լուսային ճառագայթների հետ հակաանդրադարձնող մակերևույթների փոխազդեցությունը բացատրվում է հետևյալ երկու սահմանային մեխանիզմով [5-8].

1. Միկրոկառուցվածքային մակերևույթների դեպքում, երբ անհարթության բնորոշ Λ չափսը մեծ է ընկնող լուսային ճառագայթների ալիքի λ երկարությունից ($\Lambda > \lambda$), հարևան անհարթություններից տեղի են ունենում բազմաթիվ անդրադարձումներ՝ հանգեցնելով ճառագայթների ծուղակավորման: Արդյունքում՝ էականորեն նվազում է ընկնող լուսային ճառագայթների անդրադարձումը, և դրանք հիմնականում կլանվում են:

2. Նանոկառուցվածքային մակերևույթների դեպքում, երբ փոխազդեցությունը տեղի է ունենում ենթաալիքային տիրույթում ($\Lambda < \lambda$), առաջնային է դառնում տեքս-

տուրայում բեկման ցուցի օպտիկապես փոքր խտությամբ միջավայրից ավելի մեծ խտությամբ միջավայր գրադիենտային փոփոխությունը՝ հանգեցնելով բազմաշերտ օպտիկական ծածկույթների նմանակությամբ անդրադարձման նվազմանը:

Բնականաբար, լայնաշերտ ճառագայթման դեպքում այս երկու մեխանիզմն էլ գործում են, իսկ յուրաքանչյուրի ներդրումը կախված է բազմաթիվ գործոններից, այդ թվում՝ անհարթությունների չափսերից և տեսքից:

Գրականությունում ինչպես տեսականորեն, այնպես էլ փորձնական ճանապարհով լայնորեն հետազոտվել են հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական և էլեկտրական բնութագրերը՝ կախված անհարթությունների չափսերից (բարձրություն, հիմքի մակերես, պարբերականություն) [9-16]: Սակայն գրեթե բացակայում են դրանց տեսքերին առնչվող նմանատիպ հետազոտությունները: Մինչդեռ տեքստուրավորման տարբեր տեխնոլոգիական մեթոդներ հանգեցնում են տարբեր տեսքերի անհարթությունների ձևավորմանը՝ միկրոկառուցվածքային բրգաձև (անիզոտրոպ ընտրողական քիմիական խաժատում) [9, 10], նանոկառուցվածքային անցքեր (էլեկտրաքիմիական խաժատում ծակոտկեն սիլիցիումի առաջացման ռեժիմում) [15, 16], նանոկառուցվածքային սյունաձև (էլեկտրոնա-ճառագայթային լիտոգրաֆիա) [17], նանոկառուցվածքային կոնաձև (ռեակտիվ իոնային խաժատում սև սիլիցիումի առաջացման ռեժիմում) [11, 12] և այլն:

Աշխատանքում (Մաս 1) իրականացվել է տարբեր տեսքերի անհարթություններով հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական բնութագրերի համեմատական վերլուծություն: Էլեկտրական բնութագրերի հետազոտությունների արդյունքները կներկայացվեն Մաս 2-ում:

Մոդելավորում: Հակաանդրադարձնող մակերևույթները դիտարկվել են որպես երկչափ համակարգեր, որոնք պարբերական են երկու ուղղություններով և սահմանափակ են երրորդ ուղղությամբ: Հետազոտվել են համակարգեր, որոնց միավոր բջիջները ներկայացնում են կանոնավոր միկրոկառուցվածքային բուրգ և նանոկառուցվածքային անցք, սյուն և կոն:

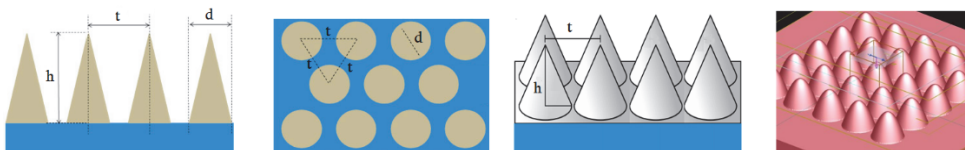
Միկրոկառուցվածքային հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական հատկությունները կարելի է թվայնորեն մոդելավորել երկրաչափական օպտիկայի տեսությամբ՝ կիրառելով ճառագայթների հետազոտման (ray-tracing, RT) մեթոդը [6, 8]: Վերջինս ներառում է բազմաթիվ երկրաչափական ճառագայթներից յուրաքանչյուրի անդրադարձման-կլանման-անցման դիտարկում անհարթություն-օդ սահմանագծային կետերում: Նանոկառուցվածքային մակերևույթների օպտիկական բնութագրերի մոդելավորումն իրականացվում է արդյունավետ միջավայրի մոտարկմամբ (effective medium approximation, EMA), վերջավոր տարրերի մեթոդով (finite element method, FEM), խիստ զուգակցված ալիքի վերլուծությամբ (rigorous coupled-wave analysis, RCWA), մատրիցային փոխանցման մեթոդով

(transfer matrix method, TMM), հարթ ալիքների մեթոդով (plane wave method, PWM) և այլն [18-22]:

Ընդհանուր առմամբ, սիլիցիումային արևային էլեմենտներում կիրառվող նանոկառուցվածքային մակերևույթների անհարթությունների չափսերը համեմատելի են սիլիցիումի համար «աշխատանքային» հանդիսացող սպեկտրի տեսանելի տիրույթի ալիքների երկարությունների հետ՝ $\lambda \sim 400...800$ նմ: Ուստի հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական հատկությունների մոդելավորումը սահմանային այս կամ այն մեթոդով կարող է հանգեցնել զգալի սխալանքների:

Ելնելով վերոնշյալից՝ մեր կողմից ընտրվել է ժամանակային տիրույթի վերջավոր տարբերության (finite-difference time-domain, FDTD) մեթոդը, որը մեծ ճշտությամբ հաշվի է առնում ճառագայթների հետ անհարթությունների փոխազդեցության երկու մեխանիզմն էլ և, հետևաբար, կարող է միաժամանակ կիրառվել ինչպես միկրո-, այնպես էլ նանոկառուցվածքային մակերևույթների դեպքում [19, 23-25]: Կիրառվել է FDTD Solutions (Lumerical Solutions Inc, Canada) առևտրային ծրագրային փաթեթի Rough Surface (version 8.17.1072, 2017a) մոդուլը, որը հնարավորություն է տալիս, կախված պարբերական համակարգի միավոր բջջի տեսքից, չափսերից, ալիքի երկարությունից և անկման անկյունից, ստանալ և 2D/3D արտապատկերել հակաանդրադարձնող մակերևույթների անդրադարձման և կլանման սպեկտրները:

Մոդելավորման ընթացքում դիտարկվող հարթ պարբերական համակարգերը բնութագրվել են հետևյալ բազային պարամետրերով՝ h -բարձրություն, d -տրամագիծ (բուրգի դեպքում՝ հիմքի ներգծող շրջանագծի տրամագիծը), t -պարբերականություն: Նկ. 1-ում որպես օրինակ ցուցադրված են կոնաձև բջջով պարբերական համակարգի լայնական հատույթը, տեսքը վերևից, եռաչափ պատկերը և FDTD Solutions ծրագրային փաթեթով ստացված գրաֆիկական տեսքը:



Նկ. 1. Կոնաձև բջջով պարբերական համակարգի լայնական հատույթը, տեսքը վերևից, եռաչափ պատկերը և FDTD Solutions ծրագրային փաթեթով ստացված գրաֆիկական տեսքը

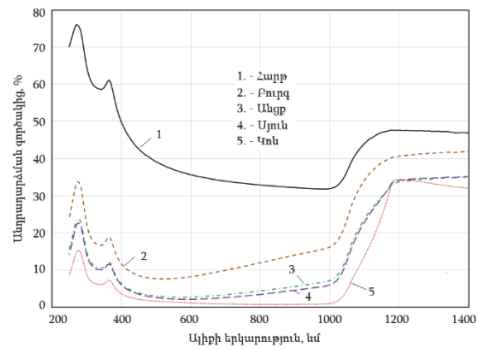
Նանոկառուցվածքային մակերևույթների համար ընտրվել են բազային պարամետրերի հետևյալ բնորոշ արժեքները՝ $h=600$ նմ, $d=150$ նմ և $t=250$ նմ: Միկրոկառուցվածքային բրգաձև մակերևույթի դեպքում այդ պարամետրերի բնորոշ արժեքները հետևյալն էին՝ $h=4,0$ մկմ, $d=5,0$ մկմ և $t=6,0$ մկմ: Օպտիկական գրգռումն իրականացվել է լայնաշերտ ($\lambda = 250...1400$ նմ) ալիքների աղբյուրով:

Մոդելավորվել են պարբերական համակարգերի անդրադարձման $R(\lambda)$ և թափանցիկության $T(\lambda)$ սպեկտրները, իսկ կլանման սպեկտրը որոշվել է $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$ արտահայտությամբ: Նկ. 2-ում բերված են միկրոկառուցվածքային բուրգի և նանոկառուցվածքային անցքի, սյան և կոնի տեսքերով միավոր բջիջներով պարբերական համակարգերի մոդելավորման արդյունքում ստացված անդրադարձման, կլանման և անցման սպեկտրները: Համեմատության համար այնտեղ զետեղված են նաև հարթ (առանց անհարթությունների) մակերևույթների համապատասխան սպեկտրները:

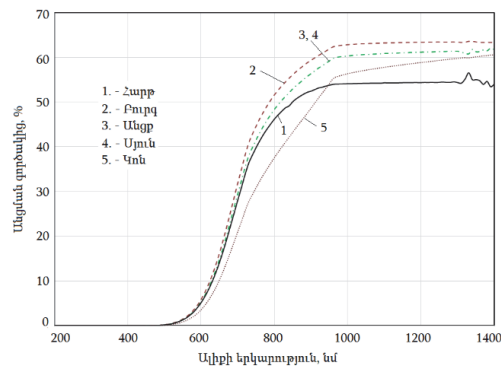
Ինչպես երևում է ստացված սպեկտրներից, հակաանդրադարձնող մակերևույթները հանգեցնում են լայնաշերտ տիրույթում անդրադարձման գործակցի զգալի նվազմանը և կլանման գործակցի մեծացմանը: Նվազագույն անդրադարձում դիտվում է սպեկտրի ամբողջ տեսանելի տիրույթում և ինֆրակարմիր տիրույթի կարճալիքային միջակայքում: Ուլտրամանուշակագույն տիրույթում ճառագայթների զգալի մասն անդրադառնում է, իսկ ինֆրակարմիր տիրույթի երկարալիքային միջակայքում՝ հիմնականում թափանցում: Միկրոկառուցվածքային բրգաձև բջիջներով համակարգերն իրենց օպտիկական բնութագրերով զգալիորեն զիջում են նանոկառուցվածքային համակարգերին, որոնցից առավել արդյունավետ են կոնաձև բջջով պարբերական համակարգերը:

Նկատված օրինաչափությունները կարելի է բացատրել հետևյալ հանգամանքներով: Նախ՝ նանոկառուցվածքային հակաանդրադարձնող մակերևույթներն ունեն ավելի մեծ մակերես, քան միկրոկառուցվածքային բրգաձև մակերևույթը: Դա էական է ճառագայթների ծուղակավորման արդյունավետության տեսանկյունից: Այնուհետև, նանոկառուցվածքային կոնաձև միավոր բջիջների դեպքում, բեկման ցուցիչի փոփոխությունը սահուն է՝ ի հակադրություն անցքի և սյան տեսքերով բջիջների, որոնց համար այդ փոփոխությունը կտրուկ է: Տեսակականորեն հիմնավորվել և փորձերով հաստատվել է, որ սահուն փոփոխվող բեկման ցուցիչներով բազմաշերտ հակաանդրադարձնող ծածկույթները միաշերտ ծածկույթների համեմատ ավելի արդյունավետ են [7, 21, 26]:

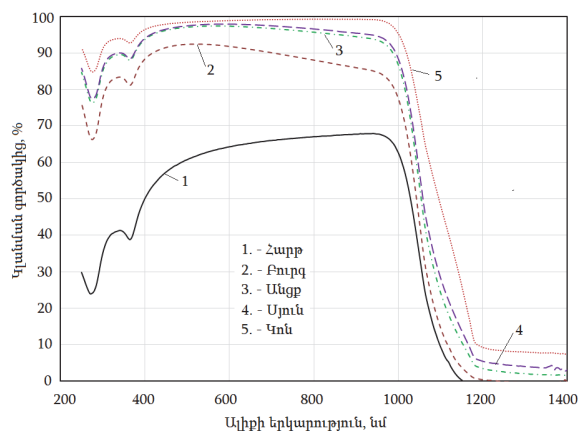
Փորձնական հետազոտություններ: Պատրաստվել են փորձնական նմուշներ, որոնց հակաանդրադարձնող մակերևույթներն ունեն միկրոկառուցվածքային բուրգի և նանոկառուցվածքային անցքի և կոնի տեսքերով անհարթություններ: Որպես ելակետային կիրառվել են Չոխրալսկու մեթոդով աճեցված, բյուրեղագիտական (100) կողմնորոշմամբ, 2,0...10,0 *Օմ.սմ* տեսակարար դիմադրությամբ և երկկողմանի ողորկված P-տիպի միաբյուրեղային արևային դասի սիլիցիումային հարթակներ: Հարթակների չափսերը կազմում են 100x100 *մմ*, իսկ հաստությունը՝ 350 *մկմ*:



ա)



բ)



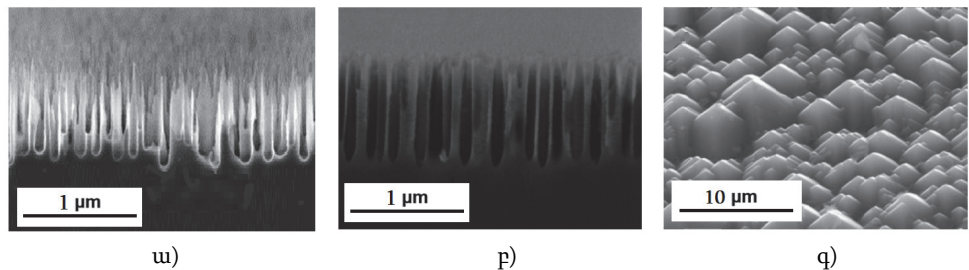
գ)

Նկ. 2. Տարբեր տեսքերով միավոր բջիջներով պարբերական համակարգերի անդրադարձման (ա), անցման (բ) և կլանման (գ) սպեկտրները

Նանոկառուցվածքային կոնաձև (սև սիլիցիում) և անցքի տեսքով (ծակոտ-կեն սիլիցիում) անհարթություններով հակաանդրադարձնող մակերևույթների

ձևավորումն իրականացվել է համապատասխանաբար ռեակտիվ իոնային և էլեկտրաքիմիական խաճատման մեթոդներով: Սև սիլիցիումի պարամետրերի միջինացված արժեքներն են՝ $h=640$ նմ, $d=130$ նմ և $t=245$ նմ, իսկ ծակոտկեն սիլիցիումի՝ $h=670$ նմ, $d=155$ նմ և $t=270$ նմ: Միկրոկառուցվածքային բրգաձև անհարթությունները ձևավորվել են քիմիական ընտրողական խաճատման մեթոդով կալիումի հիդրօքսիդի (KOH) լուծույթում: Անհարթությունների պարամետրերի միջինացված արժեքները հետևյալն են՝ $h=4,1$ մկմ, $d=5,3$ մկմ և $t=5,8$ մկմ:

Դիտարկված հակաանդրադարձնող մակերևույթների JEOL JSM-6700F մանրադիտակով ստացված լայնական կտրվածքների բնորոշ SEM (scanning electron microscope) միկրոֆոտոպատկերները բերված են նկ. 3-ում:



Նկ. 3. Սև սիլիցիումի (ա), ծակոտկեն սիլիցիումի (բ) և քիմիական ընտրողական խաճատմամբ ձևավորված (բ) հակաանդրադարձնող մակերևույթների լայնական կտրվածքների SEM միկրոֆոտոպատկերները

Օպտիկական չափումներն իրականացվել են լաբորատոր նշանակության T70 UV-VIS սպեկտրաֆոտոչափով ճառագայթման ալիքների երկարության $\lambda = 300...1100$ նմ տիրույթում՝ համագումարող գնդի (integrating sphere) կիրառմամբ: Ալիքի երկարության փոփոխման քայլը կազմում է $5...10$ նմ, իսկ չափման սխալն է $2...5\%$: Ստացվող սպեկտրային կախվածությունները գրանցվել, մշակվել և պահպանվել են ավտոմատ: Համեմատական վերլուծությունների համար գնահատվել են նշված սպեկտրային տիրույթում անդրադարձման գործակցի նվազագույն (R_{min}), առավելագույն (R_{max}) և միջին կշռված (R_{WAR}) արժեքները: Վերջին պարամետրը հաշվարկվել է հետևյալ արտահայտությամբ.

$$R_{WAR} = \frac{\int_{300nm}^{1100nm} R(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{300nm}^{1100nm} S(\lambda) d\lambda},$$

որտեղ $R(\lambda)$ -ն և $S(\lambda)$ -ն, ալիքի երկարությունից կախված, համապատասխանաբար անդրադարձումը և AM1.5 ստանդարտ թեստային պայմաններում լուսային ֆոտոնների հոսքն են:

Աղյուսակում խմբավորված են տարբեր տեսքերի անհարթություններով հակաանդրադարձնող մակերևույթների օպտիկական բնութագրերը:

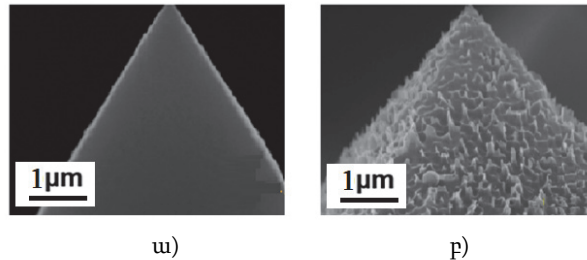
Հակաանդրադարձնող մակերևութների օպտիկական բնութագրերը

Հակաանդրադարձնող մակերևութ	$R_{min}, \%$	$R_{max}, \%$	$R_{WAR}, \%$
Հարթ	31,81 ($\lambda=990$ նմ)	64,83 ($\lambda=300$ նմ)	38,72
Միկրոկառուցվածքային բուրգ	10,43 ($\lambda=1000$ նմ)	32,52 ($\lambda=300$ նմ)	14,19
Նանոկառուցվածքային անցք	2,66 ($\lambda=580$ նմ)	23,8 ($\lambda=1100$ նմ)	6,33
Նանոկառուցվածքային կոն	1,05 ($\lambda=870$ նմ)	23,6 ($\lambda=1100$ նմ)	2,67

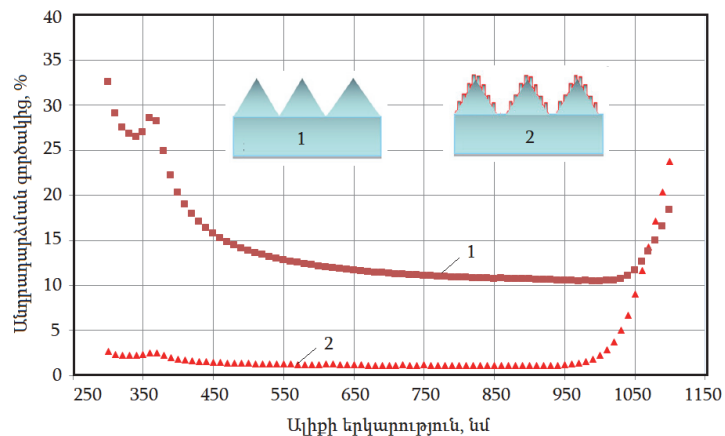
Ինչպես երևում է աղյուսակից, միկրոկառուցվածքային բրգաձև անհարթություններով մակերևութներն իրենց օպտիկական բնութագրերով ($R_{WAR} = 14,19\%$) զիջում են նանոկառուցվածքային հակաանդրադարձնող մակերևութներին ($R_{WAR} = 2,67 \dots 6,3\%$): Լավագույն օպտիկական բնութագրեր ունեն սև սիլիցիումից հակաանդրադարձնող մակերևութները ($R_{WAR} = 2,67\%$): Փորձնական արդյունքները որակապես համապատասխանում են մոդելավորման արդյունքներին: Քանակական որոշակի անհամապատասխանությունները պայմանավորված են փորձնական նմուշների և դրանց մոդելների բազային պարամետրերի տարբերություններով, ինչպես նաև չափման սխալանքով:

Տրամաբանական է ենթադրել, որ միկրո- և նանոկառուցվածքային անհարթությունների համատեղ (հիբրիդային, հիերարխիական) կիրառումը կհանգեցնի հակաանդրադարձնող մակերևութների արդյունավետության որոշակի մեծացմանը: Այդպիսի լուծում առաջարկվել և քննարկվել է [5, 27-30] աշխատանքներում: Մասնավորապես, սպեկտրի տեսանելի տիրույթում գրանցվել են գրեթե զրոյական անդրադարձումներ, որը բացատրվում է ճառագայթների իդեալական ծուղակավորմամբ և ներթափացմամբ՝ համապատասխանաբար միկրոկառուցվածքային և նանոկառուցվածքային անհարթությունների միջոցով:

Մեր կողմից պատրաստվել են հակաանդրադարձնող մակերևութներով նմուշներ, որոնցում հաջորդաբար կատարվել են քիմիական ընտրողական և ռեակտիվ իոնային խաճատումներ՝ ձևավորելով նանոկառուցվածքային կոնաձև ասեղիկներով պատված միկրոկառուցվածքային բրգաձև անհարթություններ: Անհարթությունների լայնական կտրվածքների բնորոշ SEM միկրոֆոտոպատկերները նշված խաճատումներից հետո ցույց են տրված նկ. 4-ում, իսկ նկ. 5-ում բերված են այդ նմուշների անդրադարձման փորձնական սպեկտրները:



Նկ. 4. Անհարթությունների լայնական կտրվածքների SEM միկրոֆոտոպատկերները քիմիական ընտրողական (ա) և հաջորդող ռեակտիվ իոնային (բ) խաճատումներից հետո



Նկ. 5. Նմուշների անդրադարձման սպեկտրները քիմիական ընտրողական (1) և հաջորդող ռեակտիվ իոնային (2) խաճատումներից հետո

Ստացված արդյունքների համեմատական վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ նանոկառուցվածքային հսկաանդրադարձնող մակերևույթների համեմատ հիբրիդային մակերևույթների անդրադարձման գործակցի միջին կշռված արժեքը նվազում է ընդամենը 0,23...0,41 %-ով: Դա պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ նանոկառուցվածքային մակերևույթների հսկաանդրադարձման արդյունավետությունը 2,2...5,3 անգամ մեծ է միկրոկառուցվածքային մակերևույթների արդյունավետությունից: Հետևապես՝ հիբրիդային հսկաանդրադարձնող մակերևույթների կիրառումն արդյունաբերական նշանակությամբ արևային էլեմենտներում նպատակահարմար չէ, քանի որ տեխնոլոգիական գործընթացի բարդացումը չի նպաստում այդ մակերևույթների օպտիկական բնութագրերի էական լավացմանը:

Եզրակացություն: Միլիցիումային արևային էլեմենտների հսկաանդրադարձնող մակերևույթների արդյունավետությունը կախված է ոչ միայն անհարթությունների չափսերից, այլև դրանց տեսքից: Լավագույն օպտիկական բնութագրերն ունեն նանոկառուցվածքային կոնաձև անհարթություններով սև սիլիցիումից հսկաանդ-

բաղադրվող մակերևույթները: Միկրո- և նանոկառուցվածքային անհարթությունների հիբրիդային կիրառումը հանգեցնում է հակաանդրադարձող մակերևույթների անդրադարձման գործակցի որոշակի փոքրացմանը, սակայն նպատակահարմար չէ կիրառել արդյունաբերական նշանակությամբ արևային էլեմենտներում՝ պայմանավորված տեխնոլոգիական գործընթացի բարդացմամբ:

Հետազոտությունն իրականացվել է ՀՀ գիտության կոմիտեի ֆինանսական աջակցությամբ՝ 21AG-2B011 ծածկագրով գիտական թեմայի շրջանակներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Photocurrent Enhancement in Thin Film Silicon Solar Cells by Combination of Anti-reflective Sub-wavelength Structures and Light-trapping Textures / **H. Sai, T. Matsui, K. Saito**, et al // Prog. Photovolt.- 2015.- V. 23.- P. 1572–1580. DOI: 10.1002/pip.2594.
2. Anti-reflective Surfaces: Cascading Nano/microstructuring /**Y. Nishijima, R. Komatsu, S. Ota**, et al // APL Photonics.- 2016.- V. 1 (7).- P. 076104 1-11. DOI: 10.1063/1.4964851.
3. **Soudi N., Nanayakkara S., Jahed N., Naahidi S.** Rise of Nature-inspired Solar Photovoltaic Energy Convertors // Solar Energy.- 2020.- V. 208 (15).- P. 31-45. DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.048.
4. **Boden S., Bagnall D.** Moth-eye Antireflective Structures. In Encyclopedia of Nanotechnology.-New York, Springer, 2012.- P. 1467-1477. DOI: 10.1007/978-90-481-9751-4_262.
5. Fabrication of Hierarchical Moth-eye Structures with Durable Superhydrophobic Property for Ultra-broadband Visual and Mid-infrared Applications / **Litong Dong, Ziang Zhang, Lu Wang**, et al // Applied Optics. – 2019.- V. 58 (24).- P. 6706-6715. DOI:10.1364/AO.58.006706.
6. **Deinega A., Valuev I., Potapkin B., Lozovik Y.** Minimizing Light Reflection from Dielectric Textured Surfaces // J. of the Optical Society of America A.- 2011.- V. 28 (5).- P. 770-777. DOI: 10.1364/JOSAA.28.000770.
7. **Raut H.K., Ganesh V.A. Nairb A.S., Ramakrishna S.** Anti-reflective Coatings: A Critical, In-depth Review // Energy Environ. Sci.- 2011. – V. 4.- P. 3779–3804. DOI: 10.1039/c1ee01297e.
8. **Saive S.** Light Trapping in Thin Silicon Solar Cells: A Review on Fundamentals and Technologies // Prog. Photovolt. – 2021. – V. 29 (10). – P. 1125-1137. DOI: 10.1002/pip.3440.
9. **Deinega A., Valuev I., Potapkin B., Lozovik Y.** Antireflective Properties of Pyramidally Textured Surfaces // Optics Letters .- 2010.- V. 35 (2).- P. 106-105. DOI: 10.1364/OL.35.000106.
10. **Baker-Finch S.C., McIntosh K.R., Terry M.L.** Isotextured Silicon Solar Cell Analysis and Modeling // IEEE J. of Photovol.- 2012.-V. 2 (4).- P. 457 - 464. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2012.2206569
11. **Ayvazyan G.Y.** Crystalline, Porous and Black Silicon: Research and Application.- Yerevan: Chartaraget, 2020.- 240 p.
12. Review Application of Nanostructured Black Silicon / **J. Lv, T. Zhang, P. Zhang**, et al // Nanoscale Res. Lett.- 2018.- V. 13.- P. 1-10. DOI: 10.1186/s11671-018-2523-4.
13. Optimization of the Optical Properties of Nanostructured Silicon Surfaces for Solar Cell Applications / **Di Zhou, Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani**, et al // J. of Appl. Phys. – 2014.- V. 115.- P. 134304 1- 10. DOI: 10.1063/1.4870236.
14. **Arias M, Briceño M., Marzo A., Zárate A.** Optical and Electrical Properties of Silicon Solar Cells by wet Chemical Etching // J. Chilean Chem. Soc.- 2019.- V. 64 (1).- P. 4268-4274. DOI: 10.4067/s0717-97072019000104268.

15. **Omar K., Salman K.** Porous Silicon Solar Cell with Anti-reflection Coating Layer for Efficiency Improved // *Pontr.* – 2016. -V. 72 (5).- P. 190-208. DOI: 0.21506/j.ponte.2016.5.32.
16. **Korotcenkov G.** Porous Silicon. From Formation to Application.- CRC Press, 2016.- 439 p. DOI: 10.1201/b19342.
17. Optical Properties of High Aspect Ratio Plasma Etched Silicon Nanowires: Fabrication-induced Variability Dramatically Reduces Reflectance / **A. Smyrnakis, E. Almpanis, V. Constantoudis**, et al // *Nanotechnology.* - 2015.- V. 26.- P. 085301 1-12. DOI: 10.1088/0957-4484/26/8/085301.
18. Application and Validity of the Effective Medium Approximation to the Optical Properties of Nano-textured Silicon Coated with a Dielectric Layer / **Tsun Hang Fung, T. Veeken, D. Payne**, et al // *Optics Express.* - 2019.- V. 27 (26).- P. 38645-38660. DOI: 10.1364/OE.27.038645
19. **Han K., Chih-Hung Chang.** Numerical Modeling of Sub-Wavelength Anti-Reflective Structures for Solar Module Applications // *Nanomaterials.*- 2014.- V. 4.- P. 87-128. DOI: 10.3390/nano4010087.
20. **Rahman T., Boden S.** Optical Modelling of Black Silicon for Solar Cells using Effective Index Techniques // *IEEE J. of Photovolt.*- 2017.- V. 7 (6).- P. 1556-1562. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2017.2748900.
21. Optical Modelling of Black Silicon using an Effective Medium/multi-layer Approach / **A.A. Elsayed, Y.M. Sabry, F. Marty**, et al // *Optics Express.*- 2018.- V. 26 (10).- P. 13443-13460. DOI: 10.1364/OE.26.013443.
22. **Deinega A., Belousov S., Valuev I.** Transfer-matrix Approach for Finite-Difference Time-Domain Simulation of Periodic Structures // *Phys. Rev. E.*- 2013.- V. 88.- P. 053305 1-10. DOI 10.1103/PhysRevE.88.053305
23. **Deinega A., Belousov S., Valuev I.** Hybrid Transfer-Matrix FDTD Method for Layered Periodic Structures // *Optics Letters.*- 2009.- V. 39 (6).- P. 13443-13460. DOI: 10.1364/OL.34.000860.
24. **Katkov M.V., Ayvazyan G.Y., Shayapov V.R., Lebedev M.S.** Modeling of the Optical Properties of Black Silicon Passivated by Thin Films of Metal Oxides // *J. of Contemp. Phys.*- 2020. – V. 55 (1). – P. 16-22. DOI: 10.3103/S106833722001003X.
25. Anti-Reflection Properties of Black Silicon Coated with Thin Films of Metal Oxides by Atomic Layer Deposition / **G.Y. Ayvazyan., M.V. Katkov., M.S. Lebedev**, et al // *J. of Contemp. Phys.*- 2021. – V. 56 (3). – P. 240-246. DOI: 10.3103/S1068337221030075.
26. The Design and Optimization of an Anti-Reflection Coating and an Intermediate Reflective Layer to Enhance Tandem Solar Cell Photons Capture / **H Sayed, Z.S Matar, M Al-Dossari**, et al // *Crystals.*- 2022.- V. 12 (1).- P. 57-79. DOI:10.3390/cryst12010057.
27. **Cho S.J., An T., Lim G.** Three-dimensionally Designed Anti-reflective Silicon Surfaces for Perfect Absorption of Light // *Chem. Commun.*- 2014.- V. 50.- P. 15710—15713. DOI: 10.1039/c4cc07341j.
28. **Dimitrov D.Z., Chen-Hsun Du.** Crystalline Silicon Solar Cells with Micro/nano Texture // *Appl. Surf. Sci.*- 2013.- V. 266 (1).- P. 1-4. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.10.081.
29. **Ingenito A., Isabella A., Zeman M.** Nano-cones on Micro-pyramids: Modulated Surface Textures for Maximal Spectral Response and High-efficiency Solar Cells // *Prog. Photovolt.*- 2015.- V. 23 (11).- P. 1649–1659. DOI: 10.1002/pip.2606.
30. **Putra I.R., Li J.-Y., Chen Ch.-Y.** 18.78% Hierarchical Black Silicon Solar Cells Achieved with the Balance of Light-trapping and Interfacial Contact // *Appl. Surf. Sci.*- 2019.- V. 478.- P. 725–732. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.02.001.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 02.02.2022:

Г.Е. АЙВАЗЯН

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЧАСТЬ 1. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Методом конечных разностей во временной области смоделированы и экспериментально исследованы оптические характеристики антиотражающих поверхностей кремниевых солнечных элементов с неровностями различных видов (микроструктурная пирамида, наноструктурные отверстие, столбец и конус). Показано, что наиболее эффективными являются поверхности с коническими неровностями, которые формируются методом реактивного ионного травления в режиме образования черного кремния. Обсуждена целесообразность гибридного применения микро- и наноструктурных антиотражающих поверхностей в солнечных элементах промышленного назначения.

Ключевые слова: солнечный элемент, антиотражающая поверхность, черный кремний, оптические характеристики.

G.Ye. AYVAZYAN

**EVALUATING THE EFFICIENCY OF ANTI-REFLECTIVE SURFACES OF
SILICON SOLAR CELLS
PART 1. OPTICAL CHARACTERISTICS**

Optical characteristics of anti-reflective surfaces of silicon solar cells with various types of irregularities (microstructured pyramid, nanostructured hole, column and cone) are modeled by the finite-difference time-domain method and experimentally studied. It is shown that surfaces with conical irregularities, which are formed by the method of reactive ion etching in the black silicon formation mode, are the most effective. The expediency of hybrid application of micro- and nanostructured antireflection surfaces in industrial solar cells is discussed.

Keywords: solar cell, anti-reflective surface, black silicon, optical characteristics.

Ն.Դ. ԵԶԱԿՅԱՆ, Ս.Գ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ԲԵՍԵԼԻ ԶՏԻՉԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՀԵՌԱՉԱՓԻ ՖՈՏՈՈՒԺՆԱԴԱՐԱՐԻ
ԲՆՈՒԹԱԳՐՆԵՐԻ ԼԱՎԱՑՈՒՄԸ

Ուսումնասիրվել են գոյություն ունեցող լազերային հեռաչափերը, և կատարվել է համեմատական վերլուծություն: Բնութագրերի հետագա բարելավման համար ընտրվել է Սոն-տ ընկերության լազերային հեռաչափի գործող հանգույցը: Դուրս են բերվել հիմնական հանգույցներում էլեկտրական ազդանշանի տեսքերը: Առաջարկվել է ընդունիչ հանգույցում ավելացնել Բեսելի 4-րդ կարգի գտիչ, որի արդյունքում մեծանում են հեռաչափի զգայնությունը, չափման հեռավորությունը և էներգախնայողությունը:

Առանցքային բառեր. հեռաչափ, ֆոտոդիոդ, ազդանշան, աղմուկ, ուժեղարար, հաճախություն, մոդուլյացիա, գտիչ:

Ներածություն: Հայտնի է, որ լազերային հեռաչափերում բարձր ճշգրտություն ապահովելու համար հիմնականում օգտագործվում է փուլային չափման եղանակը: Այս դեպքում լազերը ճառագայթում է որոշակի ֆունկցիայի տեսքով մոդուլացված լուսային ազդանշան, որի ալիքի երկարությունը գտնվում է ինֆրակարմիր ճառագայթների տիրույթում [1, 2]:

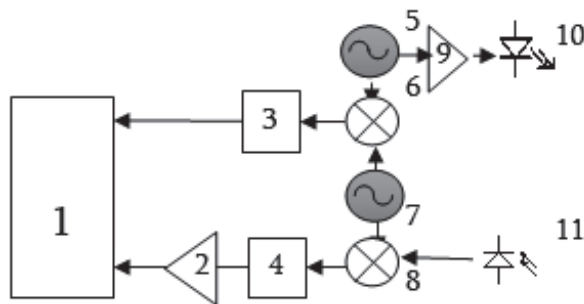
Օբյեկտից անդրադարձած ճառագայթն ընդունում է ֆոտոդետեկտորը, վերածում էլեկտրական ազդանշանի: Ընդունիչի ելքային և հիմնային ազդանշանների միջև առաջանում է փուլային շեղում, որն ուղիղ համեմատական է հեռավորությանը:

Հեռավորությունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով [3, 4].

$$D = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi},$$

որտեղ c -ն լույսի արագությունն է, f -ը՝ մոդուլյացիայի հաճախությունը, φ -ն՝ փուլային շեղումը: Բանաձևը ճիշտ է, երբ օբյեկտի հեռավորությունը փոքր է մոդուլացված ազդանշանի ալիքի երկարության կեսից: Բարձր հաճախությամբ ազդանշանների փուլի չափման ընթացքում առաջանում են փուլային շեղումներ, որոնք ազդում են հեռավորության չափման ճշտության վրա: Վերջինիս մեծացման համար օգտագործում են մի քանի հաճախությամբ մոդուլացնող իմպուլսներ, իսկ արդյունքները միջինացվում են: Հիմնականում օգտագործում են փուլի չափման հետերոդինային եղանակը:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Գոյություն ունեցող հեռաչափների հայտնի տեխնիկական բնութագրերից ելնելով՝ ընտրել մեծ ճշտությամբ հեռաչափ, կատարել նրա բնութագրերի ուսումնասիրում և լավացում, նաև հեռաչափի զգայնության և էներգախնայողության բարձրացման համար զտիչի մշակում: Աշխատանքում դիտարկված լազերային հեռաչափի կառուցվածքային սխեման բերված է Նկ. 1-ում:



Նկ. 1. Լազերային հեռաչափի կառուցվածքային սխեման:

1 - փուլաչափ, 2 - ֆոտոդիոդի ազդանշանի ուժեղարար, 3,4 - ցածր հաճախականային զտիչներ, 5,7 - մոդուլացնող ազդանշանի գեներատորներ, 6,8 - խառնիչներ, 9 - լազերի սնուցման մոդուլացվող ուժեղարար, 10 - լազեր, 11 - ֆոտոդիոդ

Հեռաչափն աշխատում է հետևյալ կերպ. 5 և 7 գեներատորների ելքերում ստացվում են մոդուլացնող լարումներ, որոնց հաճախություններն իրարից տարբերվում են 5 կՀց–ով և գտնվում են 150...200 ՄՀց տիրույթում: Հեռաչափի որակական պարամետրերը տվյալ եղանակի դեպքում կախված են հիմնականում ֆոտոընդունիչ հանգույցի էլեկտրական բնութագրերից (ուժեղացում, ներքին ազդանշան/աղմուկ հարաբերություն, թողարկման շերտ և այլն), իսկ հաղորդիչ մասում էականորեն կախված են միայն լազերի հզորությունից: Ճառագայթած լուսային ազդանշանը գրանցվում է 11 ֆոտոդիոդի միջոցով, առանձնացվում է ցածր հաճախային (5 կՀց) ազդանշանը և ուժեղացվում [5, 6]:

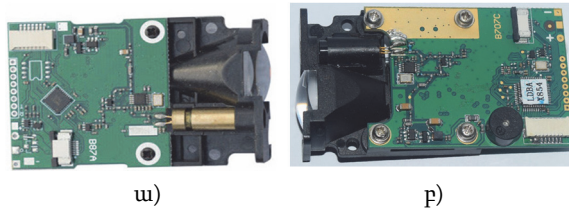
Հետազոտության արդյունքները: [7]–ում կատարված է մանրամասն համեմատական վերլուծություն առկա լազերային հեռաչափների վերաբերյալ: Դրանից և մի քանի այլ համեմատումներից ելնելով՝ ընտրվել է UNI-T ընկերության հեռաչափը, որի բնութագրերը բերված են Աղյուսակում [8]:

Աղյուսակ

UNI-T ընկերության լազերային հեռաչափի բնութագրերը

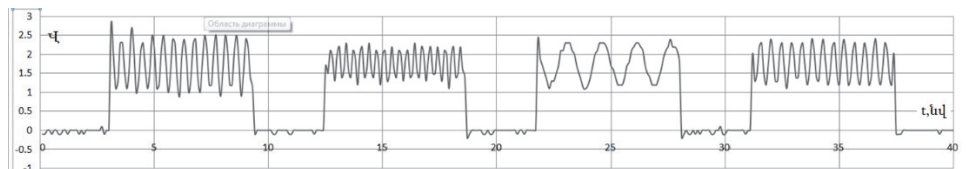
Սխալանք, 2 մմ	Հեռավորություն, 120 մ	Չափս, 123x50x28 մմ	Գինը, 115\$
---------------	-----------------------	--------------------	-------------

Վերջիններս ունեն սխալանքի նվազագույն արժեք և չափվող հեռավորության լայն տիրույթ (Աղյուսակ): Սարքը ղեկավարվում է հեռախոսի միջոցով: Չափումները կատարվել են նրա №B707C (Նկ. 2 ա), №B87A (Նկ. 2 բ) մոդելների համապատասխան կետերում:



Նկ. 2. Առկա տպաստիկների տեսքերը երկու կողմից.
ա - B707C տեսքը, բ - B87A տեսքը

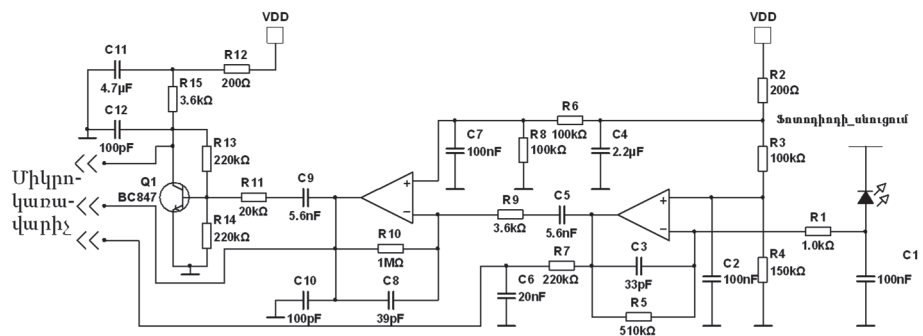
Նկ.3-ում բերված է գեներատորների էլքերի ազդանշաններից մեկի տեսքը:



Նկ. 3. Գեներատորի էլքային լարման տեսքը

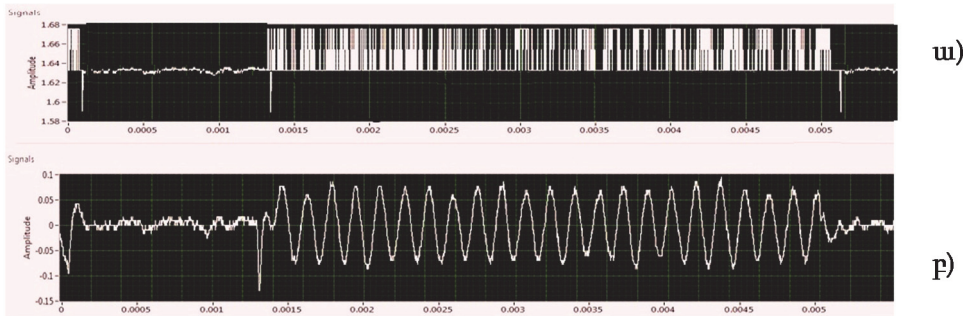
Ինչպես երևում է նկ. 3-ից, օբյեկտի հեռավորության չափման համար առկա են 4 տարբեր հաճախություններ: Լազերային փունջը ենթարկվում է մանիպուլյացիայի ոչ համաչափ իմպուլսներով, իսկ ինտենսիվությունը մոդուլացվում է 4 տարբեր հաճախություններով:

Առկա հեռաչափի ֆոտոուժեղարարի սկզբունքային սխեման բերված է Նկ. 4-ում: Ֆոտոդիոդից հետո ունենում ենք 1 մՎ-ը չգերազանցող օգտակար ազդանշան, որն ուժեղացվում է ֆոտոուժեղացուցչի միջոցով:



Նկ. 4. B707C-ի ֆոտոդիոդի ուժեղարարի էլեկտրական սխեման

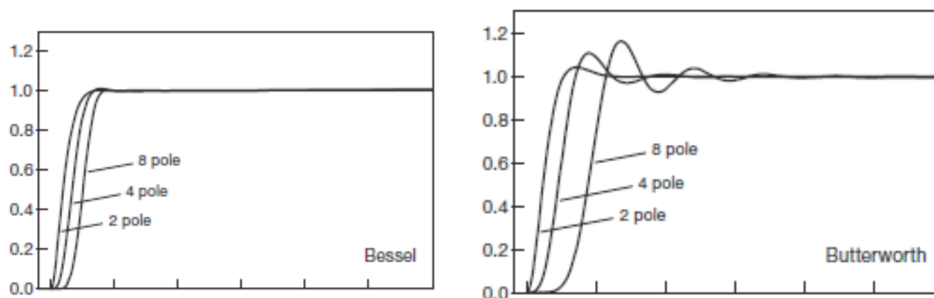
Միկրոկառավարչին է տրվում ֆոտոդիոդի ուժեղացված և գտված լարումը (նկ. 5): Նկ.5ա-ում բերված է ամբողջ ազդանշանը: Մեզ հետաքրքրող 5կՀց բաղադրիչը լավ երևում է հաստատուն բաղադրիչը հեռացնելուց հետո (Նկ. 5 բ):



Նկ. 5. Ֆոտոդիոդի ուժեղացված ազդանշանի տեսքերը.
ա - հաստատուն բաղադրիչով, բ - հաստատուն բաղադրիչը գտած

Չափվող ուժեղարարում գործում են արտաքին և ներքին աղմուկներ, որոնք վատացնում են ազդանշան/աղմուկ հարաբերությունը: Այդ խնդիրը լուծելու համար ֆոտոդիոդից անմիջապես հետո առաջարկվում է դնել գոծիչ, որը կլավացնի հեռաչափի տեխնիկական բնութագրերը (հեռավորություն, զգայնություն, էներգախնայողություն):

Հայտնի է, որ գոծիչներն ունեն անցողիկ պրոցեսներ, որոնք առաջացնում են հապաղում ազդանշանի մեջ, իսկ նույն կարգի գոծիչների դեպքում ամենակարճ անցողիկ պրոցես ունի Բեսելի գոծիչը (նկ. 6) ([9]-ի նկ. 6.26):

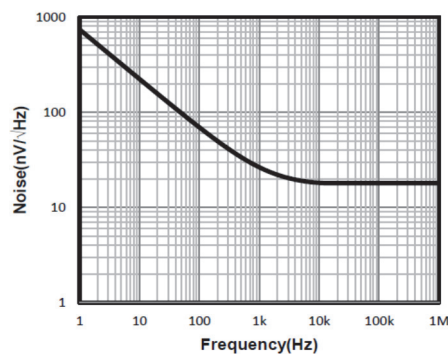


Նկ. 6. Բեսելի և Բատերվորդի գոծիչների նորմավորված արձագանքը

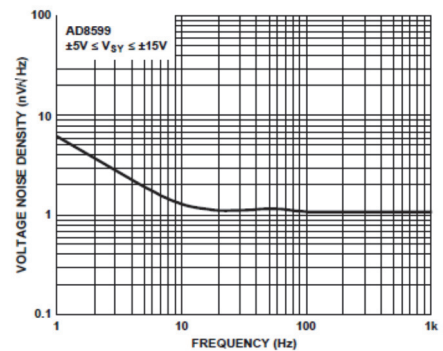
Բեսելի գոծիչի դեպքում հայտնի է, որ առաջին կարգի գոծիչի թողարկման շերտը 1,57 անգամ ավելի մեծ է ազդանշանի թողարկման շերտից ([9]-ի §8.13): Նույն աղբյուրից հետևում է, որ առնվազն պետք է աղմուկի համար ընտրել երկրորդ կարգի գոծիչ (10% ազդանշանի կորուստով):

Համեմատության համար բերված են առկա TP1561A (նկ. 7ա) և առաջարկվող գոտիչում օգտագործված AD8599 (նկ. 7բ) գործիքային ուժեղարարների (ԳՈԻ) ներքին աղմուկների սպեկտրային խտության գրաֆիկները [10, 11]: Բնութագրերից երևում է, որ սպիտակ աղմուկների տիրույթում՝ կորերի հորիզոնական մասերում, առկա ԳՈԻ-ն ունի մոտավորապես 20 անգամ մեծ աղմկային պարամետր 1 կՀց-ից բարձր հաճախությունների տիրույթում (27 նՎ/Հց):

Առաջարկվող 4-րդ կարգի Բեսելի գոտիչն անհրաժեշտ է դնել անմիջապես ֆոտոդիոդի և գոյություն ունեցող ուժեղարարի միջև (սովորական լարային միացումով): Նկ. 8-ում բերված են գոտիչի էլեկտրական սխեման (ա) և տպասալիկի տեսքը իրական չափերով՝ 24 մմ*20 մմ(բ):

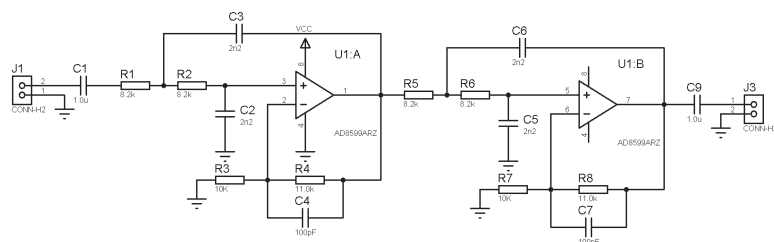


ա)

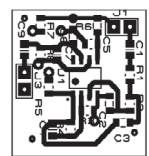


բ)

Նկ. 7. ԳՈԻ-ների աղմկային լարման և հաճախության միջև կապը
ա - TP1561A, բ - AD8599



ա)



բ)

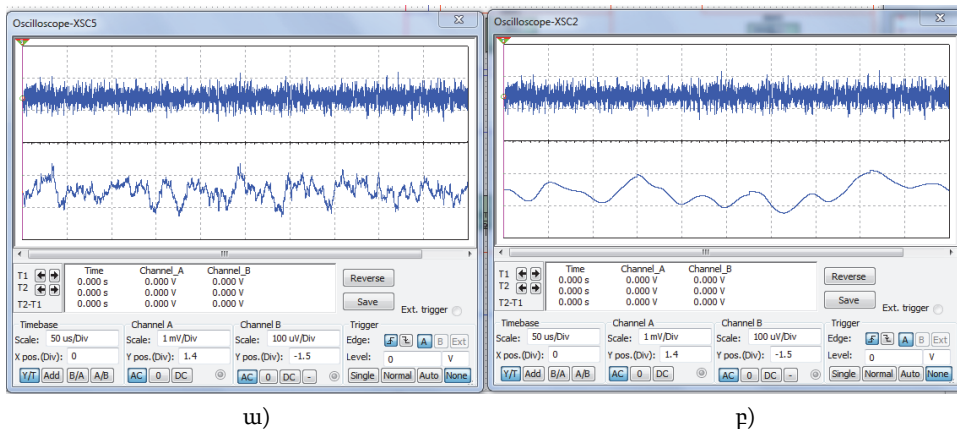
Նկ. 8. 4-րդ կարգի գոտիչի սխեման և արտաքին տեսքը.
ա - էլեկտրական սխեման, բ - արտաքին չափսը

Էլեկտրական մոդելավորման ժամանակ օգտագործել ենք Multisim-13 ծրագիրը [12], իսկ տարրերի հաշվարկները վերցվել են ըստ համապատասխան աղյուսակների ([9] –ի աղ. 6.2):

Զտիչի մուտքային դիմադրությունը մի քանի կարգով մեծ է, քան ֆոտոուժեղարարի ելքային դիմադրությունը, զտիչն ունի փոքր ելքային դիմադրություն (որպես հետադարձ կապով գործիքային ուժեղարար), իսկ սեփական ուժեղարարի մուտքային դիմադրությունը՝ հարյուրավոր կիլոհմեր:

Մեր առաջարկած միկրոսխեման ֆոտոդիոդից հետո օգտագործելու դեպքում ուժեղարարի մուտքում կունենանք սեփական աղմուկների մակարդակի իջեցում՝ $M=27$ մԿ/ 1 մԿ=27: Ֆոտոդիոդի ուժեղարարը RC առաջին կարգի զտիչ է (կտրման հաճախությունը 10 կՀց), որի մուտքում գործում է լայնաշերտ աղմուկի հետ խառնված օգտակար ազդանշան:

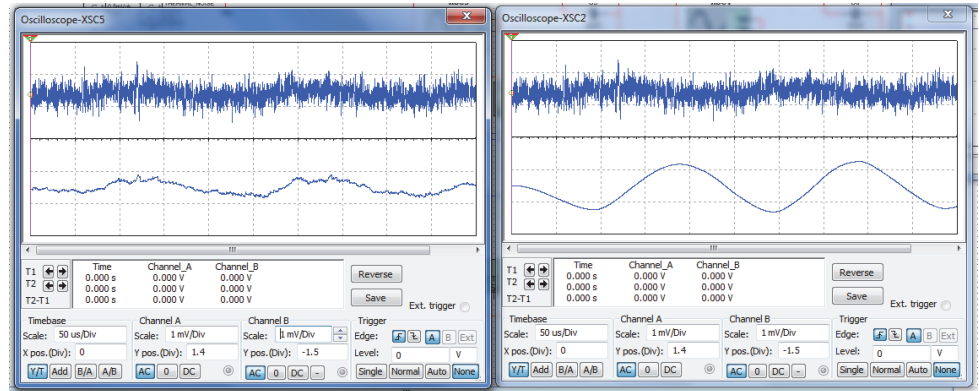
Որպես օրինակ բերված են սովորական RC զտիչի (նկ. 9ա) և 4-րդ կարգի զտիչի (10 կՀց կտրման հաճախությամբ) ազդանշանների տեսքերը (նկ. 9բ)՝ մուտքային միևնույն պայմանների դեպքում (գործում է միայն լայնաշերտ աղմուկ, Սք-ք = 1 մԿ): Սովորական ուժեղարարում ունենք 150 մԿՎ լայնաշերտ աղմուկ, իսկ միևնույն ժամանակ Բեսելի զտիչի ելքում՝ 120 մԿՎ նեղշերտ աղմուկ:



Նկ. 9. Զտիչների համեմատական գրաֆիկները.

ա - մոդելավորված RC զտիչի մուտքային և ելքային ազդանշանների տեսքերը, բ - մոդելավորված 4-րդ կարգի զտիչի մուտքային և ելքային ազդանշանների տեսքերը

Նկ. 10-ում մուտքում գործում են լայնաշերտ աղմուկ և 5 կՀց ազդանշան՝ Սք-ք=0,5 մԿ: RC զտիչի ելքում ազդանշան/աղմուկ հարաբերությունը 500 մԿՎ/ 150 մԿՎ=3,3 է կամ $10,5$ դԲ, իսկ Բեսելի զտիչի ելքում՝ $1,50$ մԿ/ 120 մԿՎ=12,5 կամ 22 դԲ, և ազդանշանի մեջ բարձր հարմոնիկները չեն երևում օսցիլոգրի մեջ: Արդյունքում ունենում ենք ազդանշան/աղմուկ հարաբերության լավացում $22-10,5=9,5$ դԲ-ով:



Նկ. 10. Չտիչների համեմատական գրաֆիկները

Եզրակացություն: Առաջարկն ունի հետևյալ առավելությունները.

- Եղած սարքի մեջ ոչինչ չփոխելով և ավելացնելով 4-րդ կարգի գոյիչ՝ ստացվում է ազդանշան/աղմուկ հարաբերության մեծացում:
- Արդյունքում հնարավոր է լինում գրանցել ավելի թույլ օգտակար ազդանշաններ:
- Միևնույն հեռավորության չափման դեպքում ստացվում է սխալանքի ավելի փոքր արժեք:
- Թույլատրելի նույն սխալանքի դեպքում կարելի է կա՛մ քչացնել լազերային ճառագայթի հզորությունը՝ ունենալով էներգախնայողություն, կա՛մ մեծացնել չափման հնարավորությունը:
- Մեթոդն, ըստ անհրաժեշտության, կիրառելի է նաև այլ հեռաչափներում:
- Արտադրության փուլում օգտագործելու դեպքում գնի վրա ազդեցություն չի ունենա:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Beam Position and Phase Measurement System for the Proton Accelerator in ADS / **L. Zhao, X. Gao, X. Hu, et al** // IEEE Trans. Nucl. Sci.- 2014.- 61.- P. 538-545, doi: 10.1109/TNS.2013.2291779, 2014, p. -1640.
2. **Webster J.G., & Eren H. (Eds.)**. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement (2nd ed.).- CRC Press, 2014. <https://doi.org/10.1201/b15664>
3. Analysis of Transient Currents in Organic Field Effect Transistor: The Time-of-Flight Method/ **M. Weis, J. Lin, D. Taguchi**, et al // J. Phys. Chem. C. -2009. -113 (43): 18459, doi:10.1021/jp908381b.
4. **Cotter, Robert J.** Time-of-flight mass spectrometry.- Columbus, OH: American Chemical Society, 1994. ISBN 0-8412-3474-4.
5. **Белов И.Ю.** Физические основы оптической дальнометрии: Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета, обучающихся по направлению “Геодезия”.- Казань: КГУ, 2009. -72 с.

6. Лебедько Е.Г. Системы оптической локации.- Учебное пособие для вузов. Часть 3.-СПб.: НИУИТМО, 2013. –110 с.
7. Comparison of laser distance measuring instruments: Final report on supplementary comparison EURAMET.L-S20/ **Mariusz Wisniewski**, et al // Metrologia.- Warsaw, April 2014.-Vol. 51, issue 1A, article id. 04002.
8. https://www.uni-trend.com/html/product/Layout/Laser_Distance/
9. **Horowitz Paul and Winfield Hill**. The Art of Electronics.- 3rd ed.- Cambridge University Press, 2015.- 1220 p.
10. https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/3PEAK-TP1564A-SR_C97336.pdf
11. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8597_8599.pdf
12. <https://www.multisim.com/>

ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 18.02.2022:

Н.Д. ЕЗАКЯН, С.Г. МАРТИРОСЯН

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОУСИЛИТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЛЬТРА БЕССЕЛЯ

Исследованы существующие лазерные дальномеры и проведен их сравнительный анализ. Для дальнейшего улучшения параметров был выбран действующий узел лазерного дальномера фирмы UNI-T. Выделены виды электрических сигналов в основных узлах. Предлагается добавлять в приемных узлах фильтр 4-й степени Бесселя, в результате чего увеличиваются чувствительность, дальность измерения и энергосбережение дальномера.

Ключевые слова: дальномер, фотодиод, сигнал, помеха, усилитель, частота, модуляция, фильтр.

N.D. YEZAKYAN, S.G. MARTIROSYAN

IMPROVING THE PARAMETERS OF A PHOTOAMPLIFIER OF LASER DISTANCE METER BY APPLYING THE BESSEL FILTER

The existing laser distance meters are studied, and a comparative analysis is carried out. For improving the parameters, UNI-T laser distance meter was chosen. Electrical signal types are distinguished in the main nodes. It is recommended to add the Bessel 4-th order filter in the receiving nodes, which increases sensitivity, distance measurement and energy saving of the laser distance meter.

Keywords: distance meter, photodiode, signal, noise, amplifier, frequency, modulation, filter.

**O.H. PETROSYAN, A.M. MOMJYAN, D.S. SHALJYAN,
D.V. MANUCHARYAN**

**A NOVEL METHOD OF POWER REDUCTION FOR A SRAM SENSE
AMPLIFIER WITH A SELF-CALIBRATION MECHANISM**

A latch sense amplifier with a biasing technique is designed and a new self-calibration unit (SCU) of power is presented for static random access memory (SRAM). Calibration of current which is the same as power consumption is calibrated for various frequencies in the range 0.5Ghz to 2.3Ghz. The advantage of such a sense amplifier is to control the current due to the bias-connected, saturated NMOS transistor. The simulation of the SCU scheme is applied in the presented sense amplifier. The results of simulation show that using the proposed SCU, the power consumption can reduce from 19% to 73% depending on frequency. The disadvantage of the proposed amplifier with a biasing technique increases the propagation delay from 8% to 17% depending on frequency.

Keywords: static random-access memory, FinFET, self-calibration, sense amplifier, power reduction, FSM.

Introduction. Shrinking of the device sizes and the increase in the performance requires the solution of a new problem: optimized power dissipation of the system. Nowadays, integrated circuits, including SRAMs can have several operation modes in terms of performance. Besides, due to technological processes and external influences, such as temperature, the operating frequency of the system may change. Therefore, it is necessary to optimize the power consumption of the system for different operation modes and different frequencies.

An important requirement of the SRAM design is the reduction of the power during the data reading process. For that purpose, reduction of power consumption of sense amplifier is required. One of the common types of the used sense amplifier is latch-sense amplifier due to its small area and performance [1]. In this work, as a reference amplifier, basic latch type sense amplifier is selected and a biasing technique to control the current flows during the read operation is applied to it.

A sense amplifier with a biasing technique. For the power consumption and noise resistance, a differential pair can be used as a sense amplifier, in which the current of the differential pairs is regulated by the saturated biased transistor [2]. However, due to the low gain, it is more effective to use latch-type sense amplifier. Obviously the reading frequency and the consumed power are directly

comparable [1,3]. The purpose of the proposed sense amplifier with a biasing technique (Fig. 1) is to calibrate the current for various frequencies.

The MN0 transistor is responsible for enabling the sense amplifier before reading the data from BL and BLB. While recharge is taking place in BL and BLB, EN is equal to logic 0. In this condition, the amplifier is in the operational state and can detect the minor voltage difference (ΔV) between the BL and BLB nodes.

The purpose of additional MN3 biasing transistor is to control the current flowing to the MP6-MN1 and MP5-MN2 branches. During the reading process the MN3 transistor is in the saturation region and it decides the amount of the current that flows.

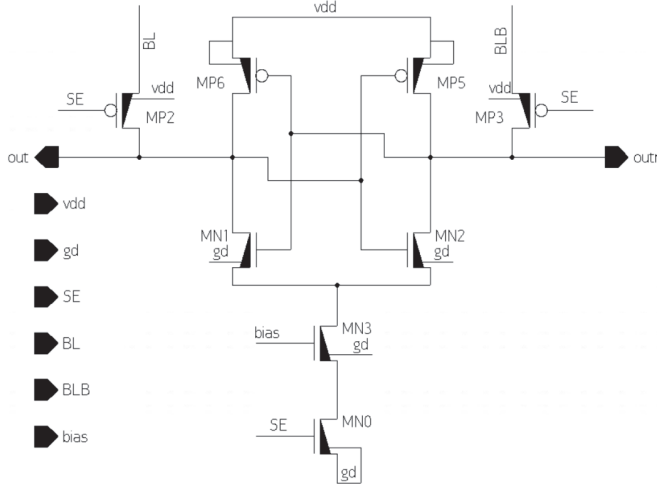


Fig. 1. A latch-type sense amplifier with a biasing technique

Depending on the reading frequency and the sensitivity threshold, $V_{gs} = V_b$ of MN3 could be different. For the certain f_{SE} frequency appropriate V_b voltage would be selected. The purpose of the latch - type sense amplifier with biasing technique is to restrict or enlarge the current depending on the data reading frequency.

The main problem is that modern IC and SRAMs can operate with various frequencies and the goal is to calibrate the current during the reading process for SRAM sense amplifier [4]. The article proposes a mechanism for self-calibration of power of the sense amplifier in SRAM depending on the established reading frequency.

Architectural overview. The architecture of the SCU mechanism is proposed. The sense amplifier for applying this method is presented in Fig. 1. The main idea of the proposed SCU is to calibrate the V_b bias voltage of the MN3 transistor. The

high level block diagram of the proposed SCU is shown in Fig. 2. In SRAM, the reading block is an array of sensitive amplifiers. Those amplifiers must have the same sizes, the same operation voltages and the same topology, to avoid the timing issues during the reading process. For that reason, SCU is made as a replica of sense amplifiers, which is the same as in the SRAM sense amplifier array.

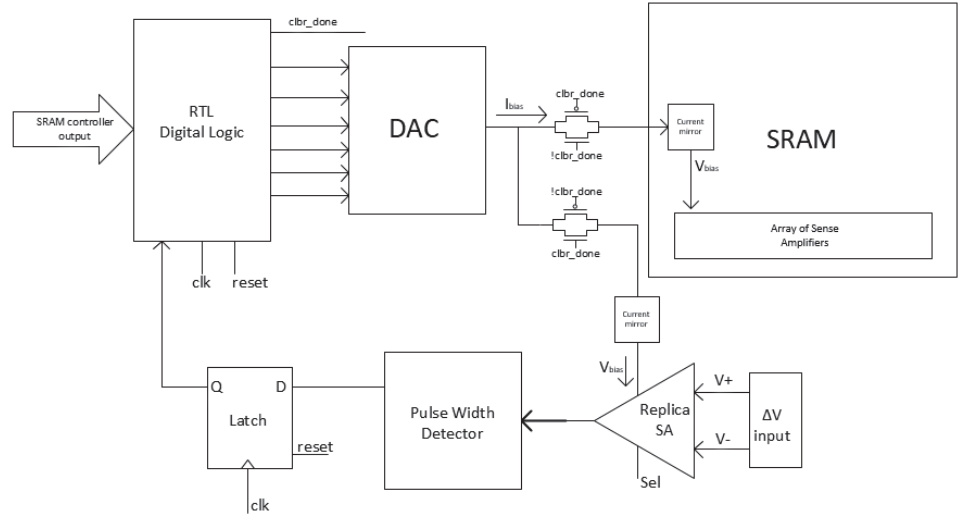


Fig. 2. The block diagram of SCU for SRAM

The SCU consists of five blocks, a digital calibration block, the current digital analog comparator (DAC), the voltage difference source (ΔV), the sense amplifier and pulse width detector. The proposed calibration is meant to be for post-production process. The principle of operation of the proposed SCU is as follows: first, we have defined the operating frequencies and the ΔV voltage sensitivity threshold. The digital calibration logic is a finite state machine (FSM) which generates a digital 8-bit signal as an input of current DAC. As an input of a replica sense amplifier, ΔV voltage is given. Depending on the output of digital logic, the output current of the DAC will increase until the output of replica SA will be a full swing signal (logical 1). Finally, the founded current will generate the V_b voltage through the current mirror. The digital code for every defined frequency will be saved.

FSM which describes the calibration logic of the proposed method is shown in Fig. 3. There are 5 states which are:

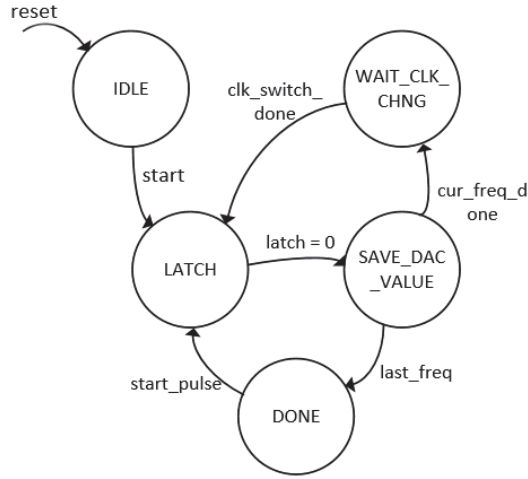


Fig. 3. FSM of the digital calibration logic

IDLE. FSM is waiting for START pulse to start operation.

LATCH. In this state bit lines of SRAM will be precharged. Depending on the previous state, the current 8-bit digital code is given to the DAC input. To clarify, if the previous state is *Idle*, the digital code will increase until the corresponding I_{b1} current is found. In case of the *LATCH* state, the code will be I_{b2} and so on. The input value from the latch is read if SA is able to read with that bias voltage (formed from I_{b1} current). In that case logical 0 will be at the output of the latch and FSM will move to the *SAVE_DAC_VALUE* state. In case of logical 1, the FSM will stay in the *LATCH* state.

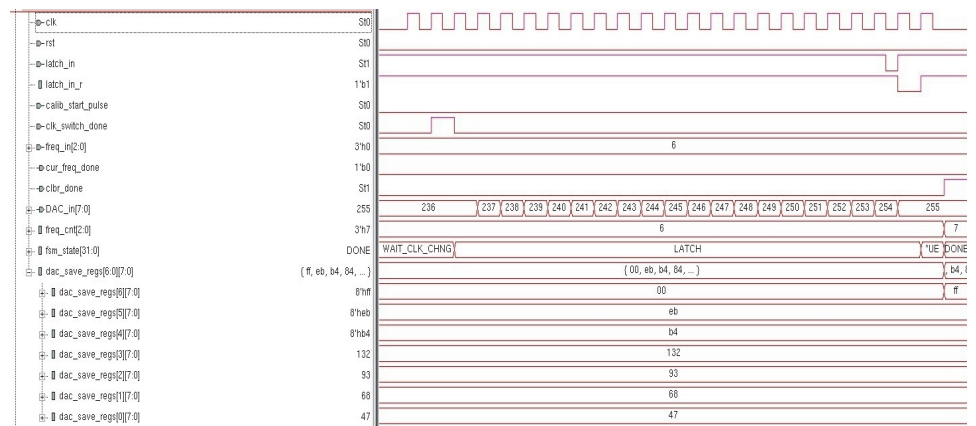
SAVE_DAC_VALUE. In this state FSM saves the digital value corresponding to the calibrated I_b current. Those values are saved in the registers. If all frequencies are done, FSM moves to the *DONE* state, where it is asserting the “clbr_done” signal to indicate to the SRAM controller that calibration is completed, and bias current values are saved in the registers. In case the whole calibration is not completed, FSM moves its state to the *WAIT_CLK_CHNG*.

WAIT_CLK_CHNG. In this state, FSM waits for the SRAM controller to indicate that the clock switching is completed. Once received, it moves to the *LATCH* state.

DONE. In this state, DAC inputs are set based on frequency values provided by the SRAM controller.

In case of receiving the “start” pulse, FSM performs the calibration again.

Simulation results. Analog and digital parts are designed using the SAED 14 nm FinFET libraries [5]. The digital component of the calibration process is shown in Fig. 4.



For designing the proposed SCU, the HSPICE simulator is used. Fig. 5 shows the output current of the DAC. This scenario happens in the case when current I_b and then V_b is not enough for the driving SA in SRAM. Calibration is done for defined frequencies, which starts from 0.5 GHz to 2.3 GHz with the 0.3 GHz step. Fig. 5 presents only calibration of the current for the 2.3 GHz frequency. Until the marked red part is reached, the pulse with the detector will not be able to assert its output. That output reaches the digital logic through the latch. Digital logic will save the discovered current.

Fig.5. The calibration flow for detecting I_b for 2.3 GHz

Simulations were done for TT FF SS technological processes with $0.75V \pm 10\%$ power supply. For the above-mentioned frequencies, calibrated currents and bias voltages are shown in the Table below.

Table

Results of the calibrated power consumption and propagation delay for the defined frequencies

Frequency, GHz	Current, μW		
	tt	ff	ss
0.5	5.61	9.61	3.61
0.8	8.97	12.97	6.98
1.1	9.97	15.37	7.32
1.4	11.81	18.91	9.81
1.7	15.22	22.22	13.22
2	16.8	27.8	14.8
2.3	20.89	35.89	19.8

The dependency of frequency and power consumption, calibrated power consumption is shown in Fig. 6. The design is done for the maximum frequency of 2.3 GHz. The table above shows, that the proposed SCU allows to reduce the power consumption by minimum 19% for minimum frequency of 0.5 GHz and up to 73% for the 2.3 GHz frequency.

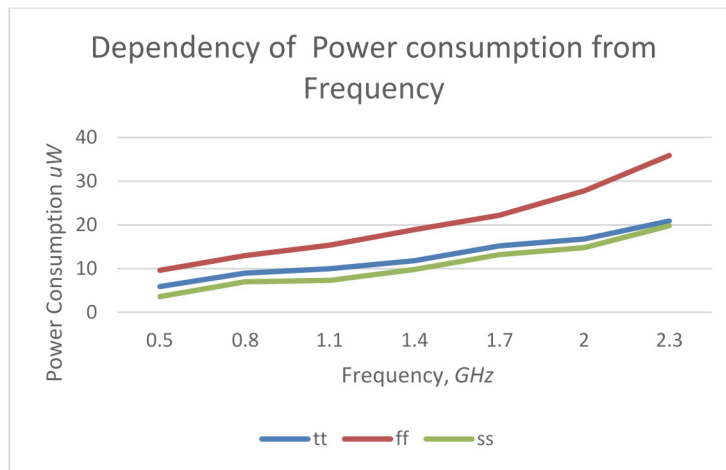


Fig.6. The dependency of calibrated power consumption on frequency

Since the calibration process results in a sense amplifier current change, it causes a delay in the reading process. The comparison of the propagation delay-frequency for biased SA and simple SA is shown in Fig. 7.

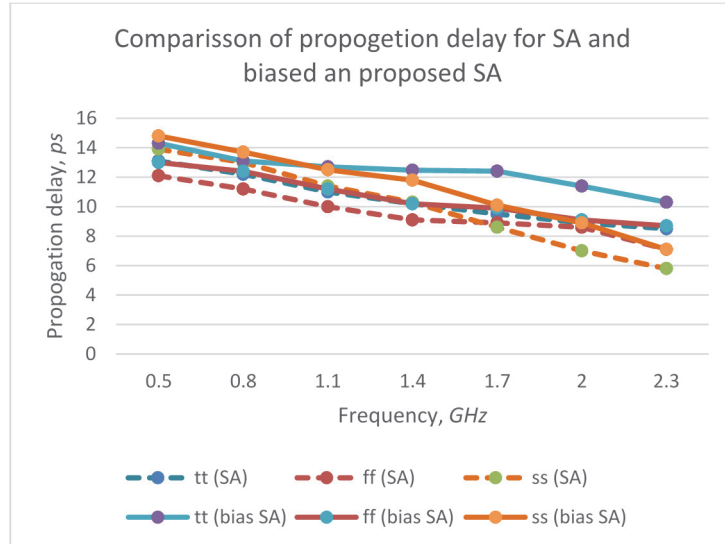


Fig.7. The comparison of the delay for the biased and proposed sense amplifier

Conclusion. The sense amplifier with a biasing technique is designed. The purpose of sense amplifier is to limit the current and hence power consumption for different frequencies. The SCU for the current is proposed. The SCU has analog and digital parts. The principal of its work is to find and save the digital value for every calibrated current for the defined frequency. The design has been done for slow, fast, and typical technological processes. The frequencies for calibration are picked starting from 0.5 GHz to 2.3 GHz with the 0.3 GHz step. From the simulation results, it can be seen that power consumption of sense amplifier during the reading process for different operating frequencies is reduced from 19% to 73%. The tradeoff here is the increased propagation delay. Again, for different frequencies, the propagation delay increased from 8% to 17% up to the frequency for the typical case.

REFERENCES

1. **Saini A., Gupta K. and Vivek K.** Analysis of Low SRAM Sense Amplifier // 2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). – 2019. -P. 1-6.
2. **Elaakhdar M., Adly I. and Ragai H.** High Performance Time-Continuous Differential Sense Amplifier in Time Domain Sensing with 28 nm Technology for Automotive Applications // 2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (ICCECE). – 2018. -P. 256-265.
3. **Arora D., Gundu K. and Hashmi M.G.** A high speed low voltage latch type sense amplifier for non-volatile memory // 2016 20th International Symposium on VLSI Design and Test (VDAT). – 2016. -P. 1-5.

4. **Chotten P. and Richa A.J.** Performance Comparison of Body Biasing and Coupling Capacitor Sense Amplifier for SRAM // 2019 Devices for Integrated Circuit (DevIC). – 2019. -P. 75-78.
5. 14 nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future / **V. Melikyan, M. Martirosyan, A. Melikyan, et al** // Proceedings of the 7th Small Systems Simulation Symposium, 12th-14th 2018.- Niš, Serbia, 2018.-P. 37-41.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 09.02.2022.

Օ.Հ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ա.Մ. ՄՈՄԺՅԱՆ, Դ.Ս. ՇԱԼԺՅԱՆ, Դ.Վ. ՄԱՆՈՒՉԱՐՅԱՆ

ՍՕՀՄ-ՈՒՄ ԶԳԱՅՈՒՆ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐԻ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ՆՈՐ ՄԵԹՈՂ՝ ԻՆՔՆԱԿԱՐԳԱՔԵՐՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ

Նախագծվել է շեղման տեխնիկայով զգայուն ուժեղարար, և ներկայացվել է նոր հզորության ինքնակարգաբերման մեթոդ ստատիկ օպերատիվ հիշող սարքի համար: Հոսանքի կամ, որ նույնն է, սպառման հզորության կարգաբերումը կատարվել է տարբեր հաճախությունների դեպքում 0,5 ԳՀց-ից 2,3 ԳՀց միջակայքում: Այդպիսի զգայուն ուժեղարարի առավելությունը հոսանքի ղեկավարումն է՝ հենակային լարումով N տիպի մետաղ - օքսիդ - կիսահաղորդիչ տրանզիստորի միջոցով: Ինքնակարգաբերման սխեմայի նմանակումը կատարվել է ներկայացված զգայուն ուժեղարարի կիրառմամբ: Նմանակման արդյունքները ցույց են տալիս, որ կիրառելով առաջարկված ինքնակարգաբերման հանգույցը՝ սպառման հզորությունը կարող է նվազել 19%-ից 73%, կախված հաճախությունից: Առաջարկված շեղման տեխնիկայով ուժեղարարի թերությունը հապաղման աճն է 8%-ից 17%, կախված հաճախությունից:

Առանցքային բաներ. ստատիկ օպերատիվ հիշող սարք, FinFET, ինքնակարգաբերում, զգայուն ուժեղարար, հզորության ծախս, վերջավոր վիճակների ավտոմատ:

Օ.А. ПЕТРОСЯН, А.М. МОМДЖЯН, Д.С. ШАЛДЖЯН, Д.В. МАНУЧАРЯН

НОВЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ МОЩНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ СТАТИЧЕСКОГО ОПЕРАТИВНОГО ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНИЗМА САМОКАЛИБРОВКИ

Разработан чувствительный усилитель с техникой смещения и представлен новый метод самокалибровки мощности для статического оперативного запоминающего устройства. Калибровка тока, совпадающего с потребляемой мощностью, проведена для различных частот в диапазоне от 0,5 до 2,3 ГГц. Преимущество такого чувствительного усилителя состоит в том, что он позволяет управлять током благодаря подключенному со смещением насыщенному NMOS-транзистору. Моделирование схемы самокалибровки применено с представленным чувствительным усилителем. Результаты моделирования показывают, что при использовании предлагаемой схемы самокалибровки можно снизить энергопотребление от 19 до 73%, в зависимости от частоты. Недостатком предложенного усилителя со смещающим приемом является увеличение задержки распространения от 8 до 17%, в зависимости от частоты.

Ключевые слова: статическое оперативное запоминающее устройство (СОЗУ), FinFET, самокалибровка, чувствительный усилитель, рассеиваемая мощность, конечный автомат.

С.А. МХИТАРЯН, А.П. АНТОНЯН, А.Р. МНАЦАКАНЯН

**ОБ ИССЛЕДОВАНИИ И СОЗДАНИИ СПОСОБОВ ЭЛЕКТРОННОЙ
РАЗВЕРТКИ НЕПРЕРЫВНОЙ АНАЛОГОВОЙ ВИДИМОЙ ЗАПИСИ**

Механические способы развертки непрерывной аналоговой видимой записи усложняют конструкции аналоговых регистраторов с непрерывной видимой записью низкочастотных процессов и периодической выдачей кадров записей, снижают их надежность и точность, затрудняют регулировку шагов развертки, увеличивают мощность и габариты, а также приводят к дополнительным оптическим погрешностям в светолучевых осциллографах. Для устранения этих недостатков предложены, проанализированы и проверены электронные способы развертки непрерывной аналоговой видимой записи.

Ключевые слова: аналоговая непрерывная регистрация, видимая запись, кадры записи, развертка записи, сейсмограмма, светолучевой осциллограф, оптический рычаг.

Введение. Несмотря на развитие и широкое применение цифровых методов и приборов регистрации, до настоящего времени разнообразные аналоговые регистраторы с видимой записью, в том числе и светолучевые фото- и электрографические осциллографы, продолжают иметь важное место в непрерывной регистрации сейсмических и других низкочастотных процессов [1-9]. Как известно [1-4,10,11], непрерывная аналоговая видимая регистрация низкочастотных сигналов, в том числе и сейсмических процессов, осуществляется накоплением сигнала на носителе с помощью развертки записи по винтовой линии и периодической выдачей информации в виде отдельных кадров. При этом винтовая развертка аналоговой записи осуществляется равномерным перемещением вращающегося цилиндра с носителем записи вдоль своей оси [6,7], равномерным перемещением блока измерительных гальванометров вдоль оси вращающегося цилиндра с носителем записи [6,7,10,11] или равномерным поворотом дополнительного зеркала, установленного на пути отраженных от гальванометров лучей [7].

Однако механические способы развертки записи усложняют конструкции регистраторов и осциллографов с непрерывной записью, снижают их надежность, уменьшают качество и точность записи, увеличивают мощность и габариты, а также ограничивают возможность плавной регулировки шагов развертки записи. Кроме того, светолучевым осциллографам с записью на плоском

носителе присущи и дополнительные статические оптические погрешности, что требует их устранения или учета при обработке записи сигналов [12-14].

Для устранения этих недостатков авторами предложены, теоретически исследованы и экспериментально проверены электронные, в том числе и цифровые способы и соответствующие устройства для винтовой и строчной развертки записи, а также учета и компенсации оптических статических погрешностей светолучевых осциллографов [15,16].

Электронная винтовая развертка непрерывной видимой записи. Сущность предложенного способа электронной винтовой развертки записи [15] заключается в том, что на измерительные гальванометры аналоговых регистраторов, в том числе и на светолучевые гальванометры светолучевых осциллографов, вместе с регистрируемыми низкочастотными сигналами $u_c(t)$ предлагается подавать также дополнительное пилообразное напряжение $u_p(t)$. Причем период напряжения $u_p(t)$ - T_p должен быть равным длительности записи одного кадра записи T_k , а приращение Δu_p в течение одного оборота цилиндра с носителем записи или длительности записи одной линии кадра - $t_{ц}$ - пропорциональным отношению необходимого шага развертки d_p к чувствительности гальванометра по напряжению S_{gu} [15]:

$$u_p(t) = U_{pm} \left(\frac{2t}{T_p} - 1 \right), \text{ где } 0 < t < T_p, \quad (1)$$

$$U_{pm} = \frac{H_k}{2S S_{gu}}, \quad T_p = T_c = t_{ц} N_{ц}, \quad (2)$$

где U_{pm} – амплитуда пилообразного напряжения с периодом $T_p = T_c = t_{ц} N_{ц}$ в конце записи каждого кадра, $мВ$, а S' - длина оптического или механического рычага измерительного гальванометра, $мм$.

Сигналы от источника пилообразного напряжения $u_p(t)$ и датчика регистрируемых низкочастотных сигналов $u_c(t)$ вызывают суммарный поворот рамки гальванометра: $\alpha_{\Sigma}(t) = \alpha_p(t) \pm \alpha_c(t)$. Этот суммарный поворот рамки измерительного гальванометра приводит к суммарному отклонению $x_{\Sigma}(t)$ на поверхности носителя записи кончика механического гальванометра или светового пятна от отраженного от зеркальца светолучевого гальванометра светового луча:

$$x_{\Sigma}(t) = x_p(t) \pm x_c(t) = S'[\delta_p(t) \pm \delta_c(t)] = S' S_{gu}[u_p(t) \pm u_c(t)] = S' S_{gu} u_{\Sigma}(t), \quad (3)$$

где применительно к светолучевым осциллографам $x_p(t)$ и $x_c(t)$ – отклонения светового пятна на поверхности носителя записи от напряжения развертки $u_p(t)$ и напряжения регистрируемого сигнала $u_c(t)$, $мм$; $\delta_p(t)$ и $\delta_c(t)$ – соответ-

ствующие углы поворота светового луча, $рад$; S' - длина оптического рычага, $мм$; $u_{\Sigma}(t)$ – суммарное напряжение на входе гальванометра, $мВ$.

Причем из-за изменения длины оптического рычага при отклонении светового луча от нулевого вертикального положения к поверхности носителя действительные отклонения светового пятна на поверхности носителя, установленного касательно к дуге с центром у вертикального положения оптического луча (рис. 1), будут отличаться от расчетных $x_{\Sigma}(t)$, $x_p(t)$ и $x_c(t)$, что приводит к дополнительным статическим тангенциальным оптическим погрешностям [12-14]. Таким образом, в светолучевых осциллографах с плоской поверхностью носителя записи имеют место оптические тангенциальные статические погрешности [13,14], которые в данном случае будут равны

$$\sigma_{ptg} = \frac{tg\delta - \delta_p}{\delta_p} \approx \frac{4}{3} \alpha_p^2 = \frac{1}{3} \delta_p^2. \quad (4)$$

Кроме того, угол поворота рамки и зеркала α некоторых светолучевых гальванометров (например, типа ГБ-IV и др.) связан с поданным напряжением по косинусоидальному закону $\alpha(t) \sim u(t) \cos \alpha$, что приводит также к дополнительным косинусоидальным погрешностям записи, в отличие от гальванометров типа ГБ-III и др., у которых угол поворота рамки пропорционален напряжению [13]:

$$\sigma_{pcos} = \frac{\alpha_p \cos \alpha_p - \alpha_p}{\alpha_p} \approx -\frac{\alpha_p^2}{2} = -\frac{\delta_p^2}{8}. \quad (5)$$

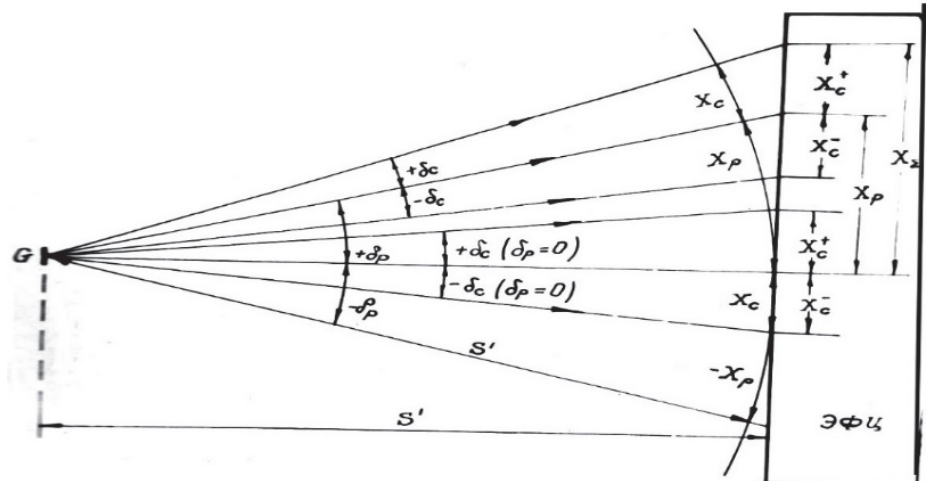


Рис. 1. Оптическая схема отраженных от светолучевого измерительного гальванометра лучей при электронной развертке непрерывной аналоговой записи

Таким образом, как видно из формулы (6) и рис. 2, общие погрешности записи с гальванометрами типа ГБ-III равны тангенциальным погрешностям (кривая 1), а при записи с гальванометрами типа ГБ-IV – разнице тангенциальных и косинусоидальных погрешностей (кривая 3):

$$\sigma_{p\Sigma} = \frac{tg(S_{gu}u_p \cos \alpha_p) - 2\alpha_p}{2\alpha_p} \approx \frac{5}{6} \alpha_p^2 = \frac{5}{24} \delta_p^2. \quad (6)$$

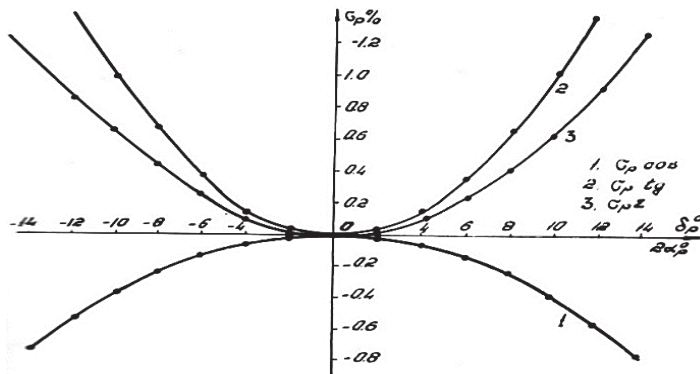


Рис. 2. Зависимости статических оптических погрешностей σ_p от угла поворота светового луча $\delta_p = 2\alpha_p$. Кривые 1, 2 - зависимости косинусоидальных и тангенциальных погрешностей, кривая 3 - общие оптические статические погрешности (при записи с гальванометрами типа ГБ-III и др.)

Для упрощения дальнейшего анализа и оценки максимально возможных статических оптических погрешностей были рассчитаны статические погрешности при записи с гальванометрами типа ГБ-III, при которых общие оптические статические погрешности больше, чем при записи с гальванометрами типа ГБ-IV. В частности, как видно также из рис. 2 (кривая 1), при $x_{pm} = \pm 0,5H_k = \pm 22$ мм (ширина зоны записи одного канала), $S' = 150$ мм и $\delta_{pm} = \arctg \frac{H_k}{2S'} = \pm 8^\circ$, имеющих место при трехканальной записи в автоматических сейсмических электрографических осциллографах типа АСЭО¹ [10,11] и многих других светолучевых осциллографах, максимальные оптические погрешности шага электронной винтовой развертки не превышают 0,65%. При этом предполагается, что гальванометры установлены равномерно по ширине носителя и отраженные от них лучи при отсутствии сигналов падают перпендикулярно к поверхности носителя. Таким образом, погрешности шагов

¹ Осциллографы АСЭО, АСЭО-1 и АСЭО-1М разработаны и изготовлены в Специальном опытно-конструкторском технологическом институте АН Арм. ССР по техническому заданию и в сотрудничестве с ИФЗ АН СССР.

механической развертки, достигающие 1...1,5% из-за многочисленных допусков и люфтов в механизмах перемещения и возврата каретки или носителя, почти вдвое больше, чем при электронной развертке.

Если при отсутствии сигнала ($u_c(t)=0$) угол наклона светового луча под действием напряжения развертки $u_p(t)$ равен δ_p , то дополнительное отклонение линии записи от напряжения $u_c(t) \neq 0$ (см. рис. 3) определится уравнением

$$x_c^{\pm'} = S'[\pm \operatorname{tg}(\delta_p \pm \delta_c) \mp \operatorname{tg} \delta_p]. \quad (7)$$

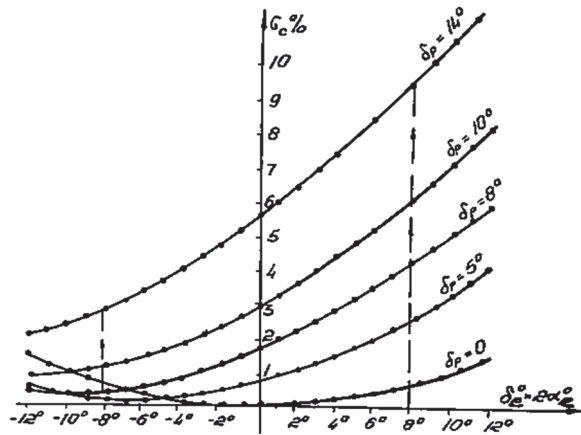


Рис. 3. Зависимости тангенциальных оптических погрешностей записи σ_c от угла поворота светового луча δ_c при разных значениях δ_p

Тангенциальные оптические погрешности [17] видимой записи сигнала $u_c(t)$ при разных u_p определяются выражением

$$\sigma_c = \frac{\pm \operatorname{tg}(\delta_p \pm \delta_c) \mp \operatorname{tg} \delta_p}{\delta_c} \approx \delta_p^2 \pm \delta_p \delta_c + \frac{1}{3} \delta_c^2. \quad (8)$$

Тангенциальные оптические погрешности записи сигнала при механической развертке перемещением каретки или носителя записи, если луч гальванометра падает перпендикулярно к поверхности носителя ($\delta_p=0$) при $u_c(t)=0$, равны

$$\sigma_c' \approx \frac{1}{3} \delta_c^2 = \frac{4}{3} \alpha_c^2. \quad (9)$$

Следовательно, дополнительные статические оптические погрешности записи сигнала из-за электронной винтовой развертки записи равны

$$\Delta \sigma_c = \sigma_c - \sigma_c' \approx \delta_p^2 \pm \delta_p \delta_c. \quad (10)$$

Из зависимостей σ_c от δ_c при разных δ_p (см. рис. 3) видно, что общие и дополнительные максимальные статические оптические погрешности записи сигнала $u_c(t)$ при электронной винтовой развертке не превышают соответственно 4,5% и 3,5% при $\delta_{pm}=\pm 8^\circ$ и $\delta_{cm}=\pm 8^\circ$ ($x_{cm}=\pm 22$ мм и $x_{pm}=\pm 22$ мм, имеющие место при трехканальной записи сигналов в осциллографах типа АСЭО и других осциллографах с оптическим рычагом 150 мм и ширине носителя записи 150 мм).

Во многих светолучевых осциллографах, в том числе и в осциллографах типа АСЭО, при многоканальной регистрации (в основном 3 - с гальванометрами типа ГБ-3 или 6 - с гальванометрами типа ГБ-4) светолучевые гальванометры сгруппированы в едином магнитном блоке и установлены вместе с осветителем на подвижной каретке для обеспечения возможности его перемещения и развертки записи. С этой целью, для равномерного распределения каналов записи по ширине носителя, при $u_c(t)=0$ световой луч от среднего гальванометра (при трехканальной записи) направляется перпендикулярно к носителю ($\delta_{p2}=0$), а лучи от крайних гальванометров - под углом $\delta_{p1,3}$ (см. рис. 4), причем при этом

$$\delta_{p1,3} = \arctg \frac{H_k + \Delta - h_r}{s'} \approx \pm 14^\circ, \quad (11)$$

где h_r - расстояние между гальванометрами ГБ-III в магнитном блоке, $h_r=12$ мм; Δ - свободные промежутки на носителе между отдельными каналами, $\Delta=5$ мм.

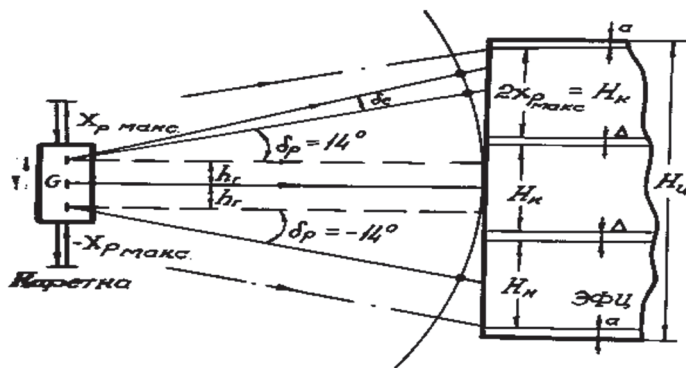


Рис. 4. Горизонтальная проекция оптической схемы трехканального светолучевого осциллографа при среднем положении каретки относительно носителя записи

Следовательно, при $u_c(t)=0$ максимальный дополнительный угол отклонения световых лучей из-за электронной развертки ($\delta_{pm}=\pm 8^\circ$) почти вдвое меньше угла статического механического отклонения лучей от крайних гальванометров в осциллографах типа АСЭО ($\delta_{p1,3}=\pm 14^\circ$). Это обеспечивается тем, что электронная развертка позволяет устранить поперечное перемещение гальваномет-

ров или носителя, а также не сгруппировать гальванометры на едином блоке, а установить их равномерно по ширине носителя и обеспечить условие $\delta_p=0$ при $u_p=0$ и $u_c=0$.

Следовательно, в трехканальных светолучевых осциллографах с оптическим рычагом 150 мм и шириной носителя записи 150 мм статические оптические погрешности записи сигналов при электронной развертке записи всего на 3,5% больше для среднего канала записи, а для крайних каналов – почти вдвое меньше по сравнению со статическими оптическими погрешностями при механической развертке и сгруппированными гальванометрами на едином магнитном блоке.

Аналогичные расчеты и сравнения статических оптических погрешностей аналоговой видимой записи с известными механическими способами и предложенным электронным способом винтовой развертки можно произвести и для других аналоговых регистраторов и светолучевых осциллографов с разными ширинами носителя, количествами каналов, длиной оптического рычага и т.д.

Электронная строчная развертка непрерывной видимой записи.

Одним из общих недостатков предложенного выше электронного и известных механических способов винтовой развертки непрерывной аналоговой видимой записи является то, нулевые линии записи сигналов наклоняются относительно направления движения носителя на некоторый угол φ_n , который равен

$$\varphi_n = \arctg \frac{V_p}{V_{\text{ц}}} = \arctg \frac{d}{t_{\text{ц}} V_{\text{ц}}} = \arctg \frac{d}{A_{\text{ц}}}, \quad (12)$$

где V_p – скорость поперечного перемещения светового луча для обеспечения винтовой развертки записи, мм/с, независимо от способа винтовой развертки.

Из-за этого реальная скорость луча записи сигнала $V'_{\text{ц}}$ отличается от $V_{\text{ц}}$ и равна

$$V'_{\text{ц}} = \sqrt{V_{\text{ц}}^2 + V_p^2} = V_{\text{ц}} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{A_{\text{ц}}}\right)^2}, \quad (13)$$

что приводит к дополнительным амплитудным и спектральным погрешностям видимой записи сигнала, пропорциональным соотношениям $V_p/V_{\text{ц}}$ и $\Delta V_{\text{ц}}/V_{\text{ц}}$.

С целью исключения указанного и некоторых других недостатков винтовой развертки, предложен также электронный способ строчной развертки непрерывной видимой записи [16]. При этом одновременно с регистрируемым сигналом на измерительный гальванометр подается и дополнительное ступенчатое напряжение, длительность ступенек которого равна длительности одного оборота вращающегося носителя или одной линии записи, а мгновенное

приращение ступеньки после каждого оборота носителя равно отношению необходимого шага развертки записи к чувствительности гальванометра.

Кроме того, если при строчной развертке дискретные углы отклонения светового луча и величины соответствующих ступенек напряжения определить с учетом статических оптических погрешностей, то электронную строчную развертку можно осуществить с равномерным шагом развертки с компенсацией и исключением статических оптических погрешностей винтовой развертки.

В целом, для устранения тангенциальных оптических погрешностей развертки при строчной развертке записи полный угол отклонения светового луча δ_{pn} , угол отклонения светового луча между соседними линиями записи $\Delta\delta_{pn}$, общая амплитуда ступенчатого напряжения U_{pn} и величины ступенек Δu_{pn} определяются по следующим формулам:

$$\delta_{pn} = \pm \arctg \frac{(n-1)d}{s'} = (n-1) \frac{d}{s'} \mp \frac{1}{3} \left[(n-1) \frac{d}{s'} \right]^3, \quad (14)$$

$$\Delta\delta_{pn} = \arctg \frac{(n-1)d}{s'} - \arctg \frac{(n-2)d}{s'} = \frac{1}{3} \left(\frac{d}{s'} \right)^3 [(n-1)^3 - (n-2)^3], \quad (15)$$

$$U_{pn} = \pm \frac{\delta_{pn}}{s_{gu}} = \pm \frac{1}{s_{gu}} \arctg \frac{(n-1)d}{s'}, \quad (16)$$

$$\Delta u_{pn} = \frac{1}{s_{gu}} \left[\arctg \frac{(n-1)d}{s'} - \arctg \frac{(n-2)d}{s'} \right], \quad (17)$$

где $n=1,2,3, \dots, N_{\text{ш}}/2$ – порядковый номер строки, причем $n=1$, $u_p=0$ и $\delta_p=0$ соответствуют записи средней строки.

Аналогичным образом можно определить амплитуду ступенчатого напряжения U_{pn} и величины ступенек Δu_{pn} для устранения косинусоидальных погрешностей, имеющих место при записи с гальванометрами типа ГБ-IV и др.

Общей специфической особенностью строчной развертки является теоретическая опасность искажения записи динамическими погрешностями в моментах скачкообразного изменения ступеньки напряжения развертки, т.к. отклонение рамки гальванометра при прямоугольных импульсах сопровождается переходными процессами, которые зависят от степени успокоения рамки гальванометра D_g и описываются следующими уравнениями [6,8,12,14]:

а) при $D_g < 1$ (периодическое успокоение рамки гальванометра):

$$\alpha_p = \alpha_{pn} + \frac{e^{-D_g \tau}}{\nu} (\alpha_{pn-1} - \alpha_{pn}) \sin(\nu \tau + \gamma); \quad (18)$$

б) при $D_g > 1$ (аперриодическое успокоение рамки гальванометра):

$$\alpha_p = \alpha_{pn} + \frac{e^{-D_g \tau}}{N'} (\alpha_{pn-1} - \alpha_{pn}) \text{sh}(N' \tau + \gamma'); \quad (19)$$

в) при $D_g = 1$ (критическое успокоение рамки гальванометра:

$$\alpha_p = \alpha_{pn} + (\alpha_{pn-1} - \alpha_{pn})e^{-\tau(1+\tau)}, \quad (20)$$

где $\alpha_{pn} = \frac{1}{2}S_{gu}u_{pn}$ – угол отклонения рамки гальванометра после окончания переходных процессов; $\tau = 2\pi \frac{t}{T_g} = 2\pi f_g t$ – относительное время; $\alpha_{pn-1} = 0.5S_{gu}u_{p-1}$ – угол отклонения рамки в момент времени $\tau=0$, при котором $d\alpha/d\tau=0$, $u_p(t)=U_{pn}$;

$$v = \sqrt{1 - D_g^2}, \quad (21)$$

$$\gamma = \arctg \frac{v}{D_g}, \quad (22)$$

$$\aleph = \sqrt{D_g^2 - 1}, \quad (23)$$

$$\gamma' = \text{Arth} \frac{\aleph}{D_g}. \quad (24)$$

Так как длительность этих переходных процессов определяется временем успокоения T_y [12,14], то после него переходные погрешности σ_n становятся меньше заданной величины $\sigma_{доп}$, и рамка гальванометра устанавливается на конечное значение. С помощью формул и графиков для определения T_y при разных $\sigma_{доп}$, T_g и D_g [12,14] было определено, что, в частности, при заданном $\sigma_{доп} \leq 1\%$, если $0,5 \leq D_g \leq 1,5$, то $T_y \leq 1,8T_g$, если $0,6 \leq D_g \leq 0,75$, то $T_y \leq 1,15T_g$, а если $0,8 \leq D_g \leq 0,85$, то $T_y \leq 0,7T_g$. Сравнение же этих переходных погрешностей с погрешностями фотогальванометрической регистрации ($\sigma_{г.р} \leq 10\%$) [6-9, 12-14, 17] показывает, что после времени $t > T_y$ с момента скачка напряжения Δu_{pn} переходные погрешности $\sigma_n \leq 1\%$ и не могут повлиять на точность записи.

Вместе с тем в промежутке времени $t < T_y$ переходные погрешности $\sigma_n \geq 1\%$ теоретически могут привести к искажению записи и нарушению непрерывности регистрации сигналов. Однако участок кадра непрерывной записи сигналов, в частности сейсмограммы, с переходными погрешностями $\sigma_n \geq \sigma_{доп} = 1\%$ при $0,5 \leq D_g \leq 1,5$ имеет незначительную длину участка на кадре записи - всего $\Delta l_n \leq T_y V_{ц} = (0,7 \div 1,8)T_g V_{ц}$ (например, в осциллографах типа АСЭО при $V_{ц} = 1 \text{ мм/с}$ и $T_g = 0,2 \text{ с}$, $\Delta l_n \leq 0,14 - 0,36 \text{ мм}$). Кроме того, этот участок находится на конце кадра записи, который в аналоговых сейсмических осциллографах и регистраторах с непрерывной записью и периодической выдачей кадров записи может испортиться и без наличия возможных переходных погрешностей.

Предложенные электронные способы винтовой и строчной развертки записи и проведенные расчеты были апробированы и проверены на осциллографе АСЭО 1, снимки которого и образца кадров записей показаны на рис. 5 и 6.

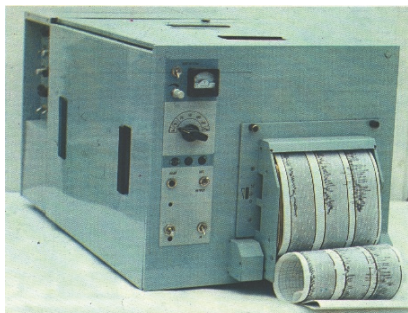


Рис. 5. Образец автономного светолучевого осциллографа АСЭО-1

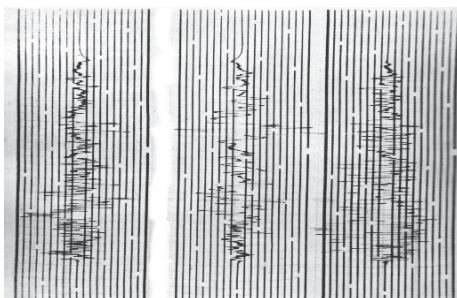


Рис 6. Образец кадра непрерывной видимой записи с электронной разверткой

Заклучение. Предложен, обоснован и проверен способ электронной винтовой развертки непрерывной аналоговой видимой записи, который позволяет существенно упростить конструкцию, увеличить надежность, уменьшить потребляемую мощность, габариты, погрешности записи и шага развертки, а также обеспечить возможность плавной регулировки шага развертки аналоговых регистраторов и светолучевых осциллографов с непрерывной аналоговой регистрацией и периодической выдачей видимых кадров записей.

Предложен, обоснован и проверен также способ электронной строчной развертки непрерывной аналоговой записи, который, кроме вышеуказанных преимуществ электронной развертки, позволяет также устранить дополнительные погрешности записи с винтовой разверткой, связанные с наклоном нулевых линий, а также компенсировать статические оптические погрешности записи с их учетом при расчете амплитуд ступенчатого напряжения строчной развертки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шнирман Г.Л.** Аппаратурные наблюдения. - М.: ОИФЗ РАН РФ, 2003. - 304с., http://elib.biblioatom.ru/text/shnirman_apparaturnye-nablyudeniya_2003/go,0/.
2. **Grant M.S.** Data Acquisition History: From Strip Chart Recorders to Digital DAQ. – 2021, <https://dewesoft.com/daq/data-acquisition-history>.
3. **Havskov J., Alguacil G.** Instrumentation in Earthquake Seismology. – Springer, 2002(16). - 313p., <https://cdn.hackaday.io/files/1635086995526272/Instrumentation-Seismology.pdf>.
4. **Prakash V.** Analog and Digital Instruments for Earthquake Analysis // IJ of Advanced Trends in Engineering & Technology.-2018.-Vol.3, issue 1.-P.92-99, www.dvpublication.com.

5. Dam Safety: Use of Seismic Monitoring Instrumentation in Dams/ **N. Adamo, N. Al-Ansari, V. Sissakian, et al** // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. – 2021. - Vol.11, N.1. - P. 203-247, <https://doi.org/10.47260/jesge/1116>.
6. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Под ред. **З.И. Арановича, Д.П. Кироса, В.М. Фреда**. - М.: Наука, 1974. - 243 с.
7. Каталог геофизической аппаратуры (Информационный справочник). - Вып. IV / Под ред. **Е.С. Борисевича**. - М.: Наука, 1981. - 235 с.
8. **Саваренский Е.Ф., Кинос Д.П.** Элементы сейсмологии и сейсмометрии. - М.: Гостехиздат, 1955. – 544с.
9. **Фред В.М.** Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. - М.: Наука, 1978. - 178 с.
10. А.с. СССР N 410349. Сейсмический электрографический светолучевой осциллограф / **Е.С. Борисевич, Г.К. Бегушин**. - Оpubл. в Б.И. - 1961. - N 1.
11. А.с. СССР N 962831. Электрографическое регистрирующее устройство / **Г.Е. Галстян, С.А. Мхитарян, С.В. Манукян**. – Оpubл. в Б.И. - 1982. - N 36.
12. **Мейер Э., Мердер К.** Зеркальные гальванометры и приборы со световым указателем / Пер. с нем.; Под ред. **Б.А. Селибера**. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. - 558 с.
13. Систематическая статическая погрешность показаний светолучевых осциллографов / **Б.Н. Фроймович, Х.Г. Лейбович, С.Е. Разин и др.** - В кн.: Светолучевая осциллография. – Кишинев, 1972. – С. 59-66.
14. Светолучевые осциллографы / **В. Хертель, И. Дегенхарт, А. Кюблер и др.**; Пер. с нем.; Под ред. **Е.С. Борисевича**. - М.-Л.: Энергия, 1965. - 456 с.
15. А.с. СССР N 1056106. Способ регистрации сейсмической информации и устройство для его осуществления/ **С.А. Мхитарян**. – Оpubл. в Б.И. - 1983. - N 43.
16. А.с. СССР N 1078381. Способ непрерывной регистрации сейсмической информации и устройство для его осуществления/ **С.А. Мхитарян**. – Оpubл. в Б.И. - 1984. - N9.
17. О метрологическом обеспечении инженерно-сейсмологических измерений / **Д.П. Кинос, А.Е. Манохион, В.А. Токмаков и др.** - В кн.: Проблемы и методы сейсмометрии (Сейсмические приборы. Вып.14). - М.: Наука, 1981. – С. 81-83.

Институт прикладных проблем физики (ИППФ) НАН РА. Материал поступил в редакцию 09.12.2021.

Ս.Ա. ՄԽԻԹԱՐՅԱՆ, Ա.Պ. ԱՆՏՈՆՅԱՆ, Ա.Ռ. ՄՆԱՏԱԿԱՆՅԱՆ

**ՆՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԱՆԸՆԴՀԱՏ ՏԵՄԱՆԵԼԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ
ՓՈՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԵՎ ԻՐԱԿԱՆԱՑՄԱՆ ՄԱՍԻՆ**

Անընդհատ նմանակային տեսանելի գրանցման փոման մեխանիկական մեթոդները բարդացնում են ցածրհաճախականային ազդանշանների անընդհատ տեսանելի գրանցմամբ և կադրերի պարբերական ելքով նմանակային գրանցիչների կառուցվածքը, նվազեցնում դրանց հուսալիությունը, ճշգրտությունը, ծախսվող հզորությունը և չափսերը, բարդացնում փոման քայլերի կարգավորումը, ինչպես նաև հանգեցնում լուսաճառագայթային օսցիլոգրաֆների լրացուցիչ օպտիկական սխալների, որոնց վերացման համար առաջարկվել, ուսումնասիրվել և ստուգվել են էլեկտրոնային փոման մեթոդներ:

Առանցքային բառեր. նմանակային անընդհատ տեսանելի գրանցում, գրանցման պատկեր, գրանցման փոմ, սեյսմագիր, լուսաճառագայթային օսցիլոգրաֆ, օպտիկական լծակ:

S.A. MKHITARYANH, A.P. ANTONYAN, A.R. MNATSAKANYAN

**ON RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF METHODS FOR ELECTRONIC
EXTENDING OF CONTINUOUS ANALOG VISIBLE RECORDING**

Mechanical methods for extending the continuous analog visible recording complicate the designs of analog recorders with continuous visible recording of low frequency signals and issuing periodic frames, reduce their reliability, the accuracy, the used power and sizes, complicate the adjustment of the extending steps, and also lead to additional optical errors in light-beam oscilloscopes, for the elimination of which electronic extending methods have been proposed, analyzed and tested.

Keywords: analog continuous visible registration, recording frames, recording extension, seismogram, light beam oscilloscope, optical arm.

H.T. KOSTANYAN

**THE MINIMIZATION METHOD OF THE THERMAL DRIFT
INFLUENCE ON ANALOG INTEGRATED CIRCUITS**

The existing offset cancellation methods are based on digital-to-converters (DAC) and the calibration paths. During thermal drift the parameters of transistors in calibration path change, which increase the offset of the system. The proposed offset cancellation method includes current DAC which is directly connected to the output of the system. The absence of the calibration path makes the circuit more stable during temperature drifts without voltage-current-voltage conversion. The offset variation of the circuit during thermal drift is reduced 19 times (1.42 mV). The circuit occupies 43.2 % less area as in the current DAC, only transistors have been used instead of the resistor-transistor structure of voltage DAC. Power consumption increases 7 % as the branch of the current DAC is always on.

Keywords: analog, integrated circuits, offset, digital to analog converter.

Introduction. In modern integrated circuits (IC), operating frequencies have been raised to hundred Gbps, resulting signal degradation after the channel to a very high level of concern [1]. In modern high-speed serial-links, transmitter-channel-receiver structures are used to transfer the data. A channel is the line which connects the transmitter and the receiver. It acts like a low pass filter, which means that higher frequencies will be more affected in the input of the receiver [2]. To overcome the channel effect, a continuous time linear equalizer (CTLE), and a decision feedback equalizer (DFE) circuits are proposed [3]. DFE is a more complicated circuit which has nonlinear equalization and is used to cancel the inter symbol interference (ISI).

CTLE (Fig 1) is a differential-pair-based circuit which has a different behavior in low and high frequencies. It acts like common source amplifier in high frequencies and common source amplifier with source degeneration in low frequencies. It gives a chance to have a circuit with an inverse channel behavior and compensate high frequency rejection by the channel [4].

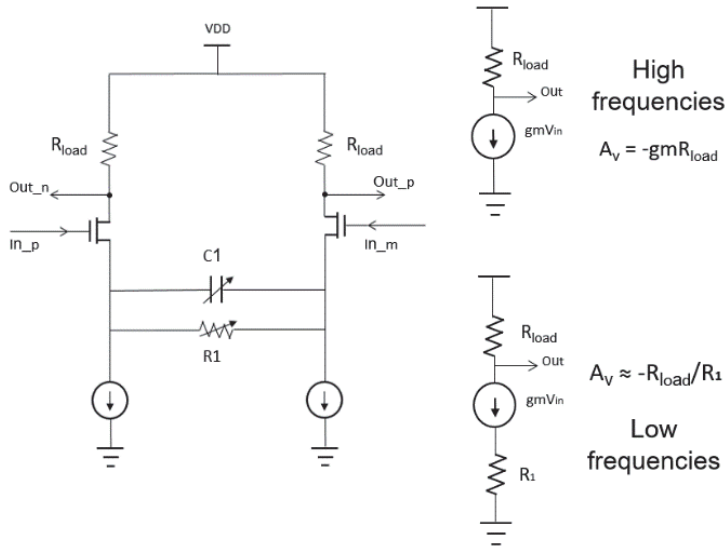
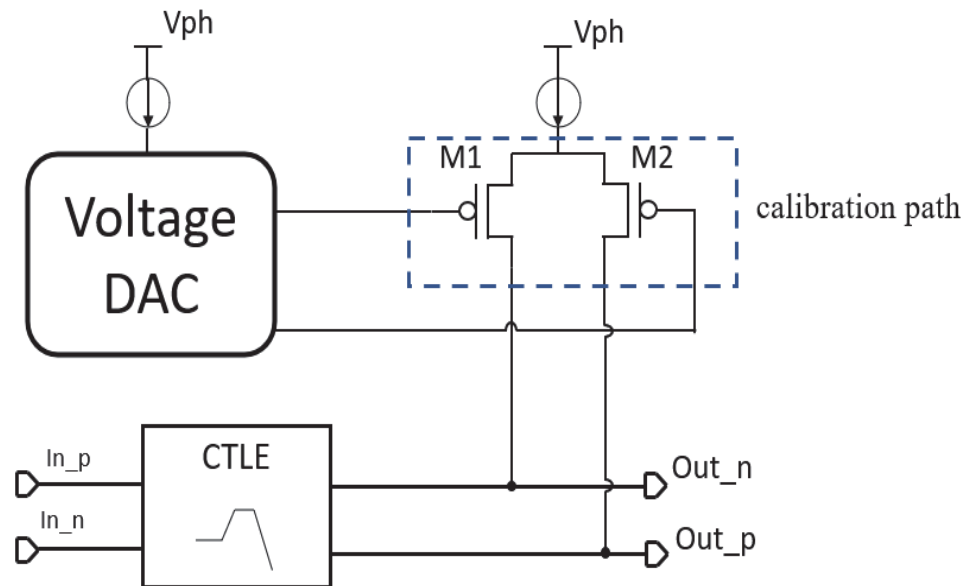


Fig. 1. CTLE circuit and gain values in low/high frequencies

To minimize the offset of such circuits, digitally assisted offset cancellation techniques are used [5-7]. The structure of such circuits is based on R-string digital- to-analog converters (DAC) connected with calibration path which minimize the offset by inserting additional current to the output of the system (Fig. 2). Such a method reduces the offset till millivolts, but considering the fact that modern circuits are operating in nonstandard environments where external conditions could be changed even after calibration, it has some disadvantages. During the temperature drift, the threshold of transistors in the calibration path changes. It can affect the transistors operation leading them to triode or cut off states.

The CTLE offset cancellation circuit has been designed by the SAED 14 nm FinFet technology (Fig. 2) [8], and HSpice simulations have been performed. The thermal drift effect has been checked for the CTLE circuit (-40°C to 150°C drift). The idea is that the circuit can startup in one temperature condition with defined codes during the calibration process and continue working in another conditions. In ICs bandgap reference is widely used, which provides temperature independent constant voltage [9], but in case of CMOS structured operational amplifiers and equalizers the temperature variation may affect the circuit functionality.



The circuit has been verified with constant g_m circuit-biased current [10] and temperature independent bias current to understand the thermal drift effect for both cases.

In case of temperature-independent bias current (Fig. 3 b), for low code thermal drift impact on the offset is higher as the calibration path works as DA whose gain depends on temperature while bias current does not depend on temperature. At high code thermal drift impact on the offset is smaller as the cancelation current flow through one branch and bias current does not depend on temperature.

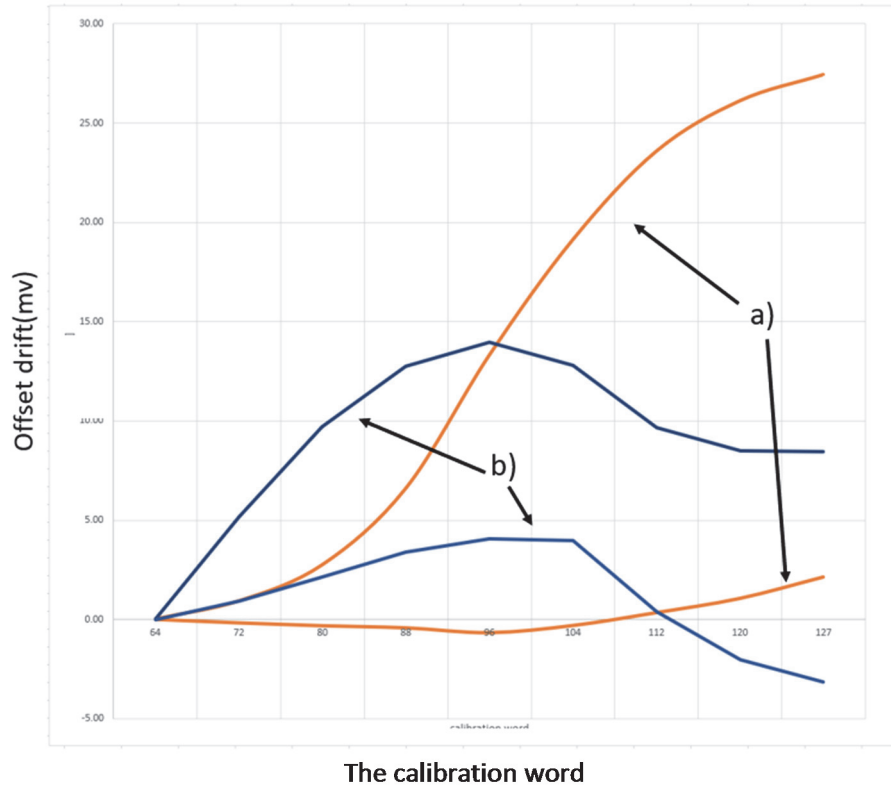


Fig. 3. The offset variation dependence on the calibration word during the thermal drift

The results in Table 1 show that even in case when the biasing current is a temperature-independent offset variation, $\sim 10 \text{ mV}$ exists. The issue comes from calibration branches (M1, M2 transistors), as the temperature effect on transistors (V_{th} change, I_{ds} change) causing offset variation for a fixed code. Taking into account the problems described above new offset cancellation methods are needed to overcome the thermal drift effect.

Table 1

The worst-case PVT results with thermal drift implementation

The CTLE offset variation due to the thermal drift		
	Temperature independent current	constant g_m circuit current
Max offset	10 mV	27 mV

The proposed solution. Instead of the voltage DAC usage, during which operation voltage-current-voltage conversion exists, current DAC has been implemented. To keep the logic the same, an always-on current DAC has been added, for the case when both M1, M2 transistors have the same code and an equal current

from each branch. As it could bring additional offset because of parasitic resistances and capacitances of routing nets, always-off DAC has been added to keep the layout symmetry for both branches (Fig. 4).

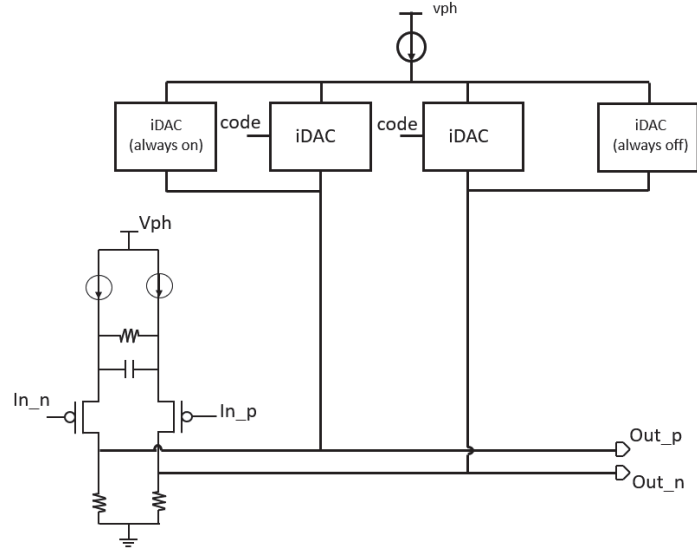


Fig.4. The proposed circuit

To test the proposed circuit a 50 mV offset has been added to one of the CTLE branches and the cancellation mechanism has been enabled, As shown in Fig. 5. Before calibration, the offset value is 50 mV and after calibration it is less than 1 mV . Offset variation during the thermal drift from -40°C to 150°C is 1.42 mV .

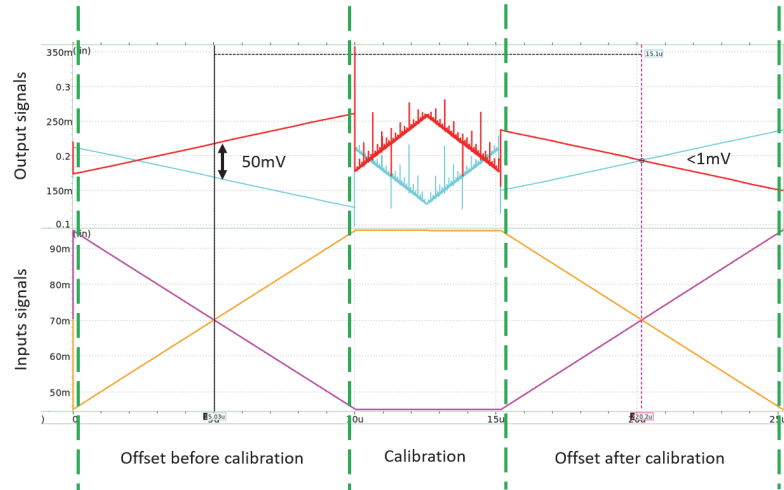


Fig.5. The simulation results with the proposed method

As the voltage obtained directly on resistors, the offset cancellation range is more linear (Fig. 6).

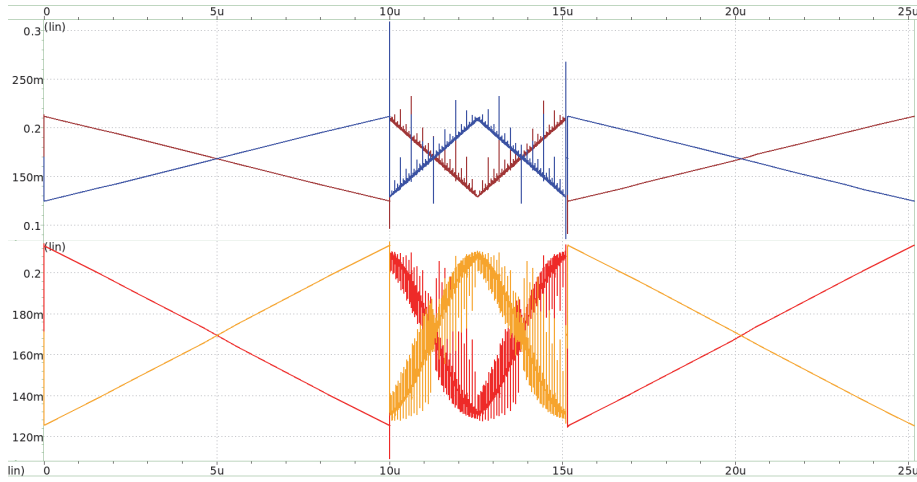


Fig.6. The simulation results for the proposed method before its implementation

Spice Monte Carlo (MC)[11] simulations have been performed for the proposed circuit to consider the deviations of the technological process. MC variation is more linear compared to voltage DAC case (Fig. 7,8).

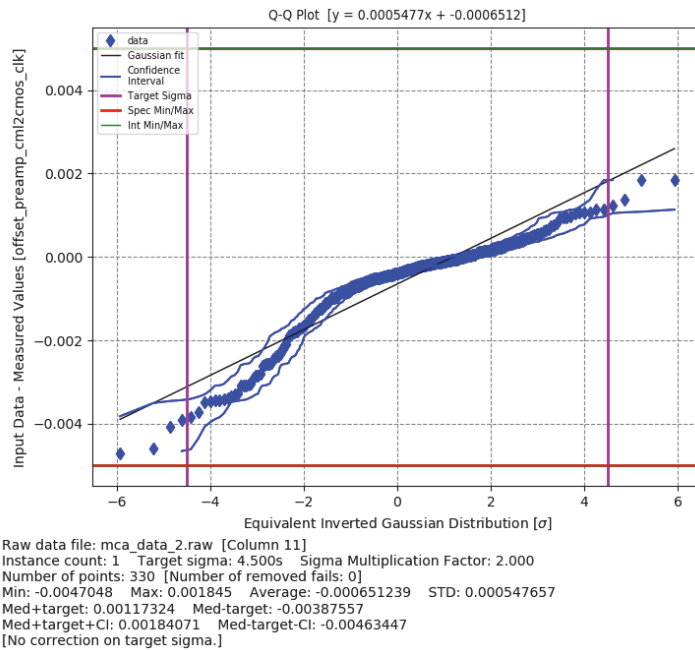


Fig.7. MC simulation results for the offset before the circuit modification (4.5 sigma)

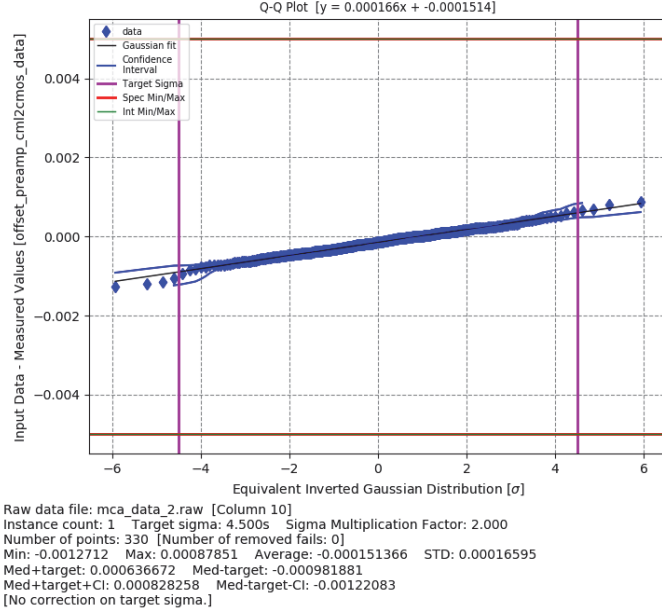


Fig.8. MC simulation results for the offset for the proposed method (4.5 sigma)

According to the Table 2, after the proposed changes, the total area of the circuit decreases about by about 43.2%, as the resistors in voltage DAC have been removed. The disadvantage of the proposed method is always on the current DAC branch which increases power consumption by 7%.

Table 2

Comparison with the existing methods

	[5]	[6]	The proposed method
Max offset variation due to thermal drift (mV)	26.98	15.12	1.42
Area (μm^2)	2361.31	1631.529	1341.2
Power consumption (μW)	8341.25	8074.1	8924.87

Conclusion. The proposed offset minimization method includes current DAC which is directly connected to the output of the system. The absence of the calibration path makes the circuit more stable during temperature drifts without voltage-current-voltage conversion which was the main problem of the existing methods. The offset variation of the circuit during the thermal drift is reduced 19 times (1.42 mV). The circuit occupies 43.2% (1341.2 μm^2) less area as in current DAC only transistors have been used instead of the resistor-transistor structure of voltage DAC. Power consumption increases by 7% (8924.87 μW) as current DAC is always on branch.

REFERENCES

1. 11.1 A 1.7pJ/b 112Gb/s XSR Transceiver for Intra-Package Communication in 7nm FinFET Technology / **R. Yousry, E. Chen, Y.-M. Ying, et al** // 2021 IEEE International Solid- State Circuits Conference (ISSCC). – 2021. - P. 180-182.
2. High accuracy equalization method for receiver active equalizer / **V.S. Melikyan, A.S. Sahakyan, K.H. Safaryan, et al** // East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2013). – 2013. - P. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS.2013.6673119.
3. **Kim M., Bae J., Ha U. and Yoo H. -J.** A 24-mW 28-Gb/s wireline receiver with low-frequency equalizing CTLE and 2-tap speculative DFE // 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – 2015. - P. 1610-1613, doi: 10.1109/ISCAS.2015.7168957.
4. CTLE Adaptation Using Deep Learning in High- speed SerDes Link / **B. Li, B. Jiao, C. -H. Chou, et al** // 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). – 2020. - P. 952-955, doi: 10.1109/ECTC32862.2020.00155.
5. **Ahrar A. and Yavari M.** A Digital Method for Offset Cancellation of Fully Dynamic Latched Comparators // 2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). – 2021. - P. 143-148, doi: 10.1109/ICEE52715.2021.9544133.
6. Sense amplifier offset cancellation and replica timing calibration for high-speed SRAMs / **R. Fragasse, B. Dupaix, R. Tantawy, et al** // 2018 IEEE 9th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS). – 2018. - P. 1-5, doi: 10.1109/LASCAS.2018.8399941.
7. **Petrosyan G.A.** The reliability improvement method of comparators in modern analog vlsi circuits // Proceedings of the RA NAS and NPUA. Series of Technical Sciences. ISSN:0002-306X. – 2020. - Vol. 73, no. 4. - P. 424-433.
8. **Melikyan V., Martirosyan M., Piliposyan G.** 14 nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future // Small Systems Simulation Symposium. – 2018. – P. 37-41.
9. A 0.82 V Supply and 23.4 ppm/° C Current Mirror Assisted Bandgap Reference / **Nagulapalli, Rajasekhar, et al** // 2021 32nd Irish Signals and Systems Conference (ISSC): IEEE. – 2021. - P. 1-4.
10. A 9-nW on-chip constant subthreshold CMOS transconductance bias with fine-tuning / **Antao, Uldric A.; Hsieh, John Choma Ming, et al** // 2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS): IEEE. – 2017. -P. 1-4.
11. HSPICE Reference Manual Synopsys Inc.- 2018. -968p.

National Polytechnical university of Armenia: The material is received on 27.01.2022.

Հ.Տ. ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ

ԱՆԱԼՈԳԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՎՐԱ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՇԵՂՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Շեղման լարման նվազեցման գոյություն ունեցող մեթոդները հիմնված են թվաանալոգային ձևափոխիչների (ԹԱՁ) և կարգաբերման ուղու վրա: Ջերմային դրեյֆի ժամանակ կարգաբերման ուղու տրանզիստորների պարամետրերը փոխվում են, ինչը մեծացնում է համակարգի շեղման լարումը: Շեղման լարման նվազեցման առաջարկված մեթոդը ներառում է հոսանքի ԹԱՁ, որն ուղղակիորեն միացված է համակարգի ելքին: Կարգաբերման ուղու բացակայությունը շղթան ավելի կայուն է դարձնում ջերմաստիճանի շեղումների նկատմամբ՝ առանց լարում-հոսանք-լարում փոխակերպման: Ջերմային դրեյֆի ժամանակ շեղման լարման փոփոխությունը կրճատվել է 19 անգամ (1,42 մՎ): Մխեման զբաղեցնում է 43,2%-ով ավելի քիչ մակերես, քանի որ հոսանքի ԹԱՁ-ն օգտագործում է միայն տրանզիստորներ՝ լարման ԹԱՁ-ի ռեզիստոր-տրանզիստորային կառուցվածքի փոխարեն: Հզորության սպառումն ավելացել է 7%-ով՝ հոսանքի ԹԱՁ-ի միշտ միացված ճյուղի պատճառով:

Առանցքային բառեր. անալոգային, ինտեգրալ սխեմաներ, շեղման լարում, թվաանալոգային ձևափոխիչ:

А.Т. КОСТАНЫН

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛООВОГО ДРЕЙФА НА АНАЛОГОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Существующие методы минимизации смещения напряжения основаны на цифроаналоговых преобразователях (ЦАП) и пути калибровки. При тепловом дрейфе параметры транзисторов на пути калибровки изменяются, что увеличивает смещение системы. Предлагаемый метод компенсации смещения включает ЦАП тока, который напрямую подключен к выходу системы. Отсутствие калибровочного тракта делает схему более устойчивой при температурных дрейфах без преобразования напряжение-ток-напряжение. Изменение смещения схемы при тепловом дрейфе уменьшено в 19 раз (1,42 мВ). Схема занимает на 43,2% меньше площади, так как в ЦАП тока использованы только транзисторы вместо резисторно-транзисторной структуры ЦАП напряжения. Энергопотребление увеличивается на 7% из-за всегда включенной ветки ЦАП тока.

Ключевые слова: аналоговый, интегральные схемы, смещение напряжения, цифроаналоговый преобразователь.

Մ.Տ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

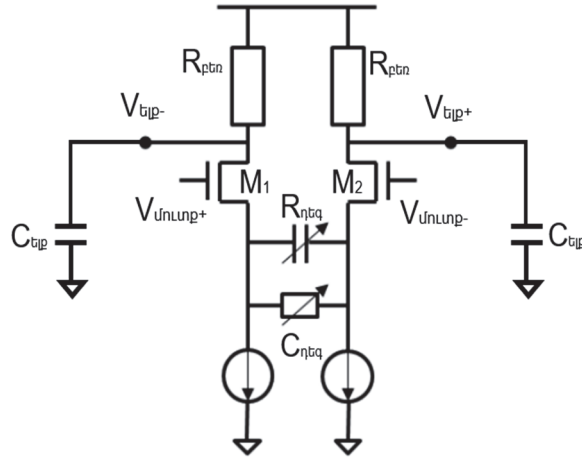
ԸՆԴՈՒՆԻՉ ՀԱՆԳՈՒՅՑՈՒՄ ՀԱՄԱՀԱՐԹԵՑՄԱՆ ՄԽԵՄԱՅԻ ԳԾԱՅԼՈՒԹՅԱՆ ԿԱՐԳԱԲԵՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ

Ներկայացված է տեղեկատվության հաջորդական փոխանցման մուտք-ելք հանգույցների ընդունիչ բաղադրիչում տեղակայված երկկասկադ ասինքրոն գծային համահարթեցման սխեմայի գծայնության կարգաբերման համակարգի կառուցման մեթոդ: Ներդրվել է մուտքային լարման ընդհանուր բաղադրիչով կառավարվող համակարգ, որը լուծելով դիֆերենցիալ ճյուղերի հոսանքների հավասարաչափ փոփոխման հարցը՝ թույլ է տալիս էապես մեծացնել համակարգի գծայնությունը, ինչը հանգեցնում է սխեմայի ելքային աշխատանքային տիրույթի մեծացմանը: Փորձնական արդյունքները վկայում են, որ առաջարկված մեթոդի կիրառման դեպքում ուժեղացման գործակցի շուրջ 6% փոքրացման հաշվին համակարգի գծայնությունը մեծանում է ~35%-ով:

Առանցքային բառեր. ընդունիչ հանգույց, ասինքրոն գծային համահարթեցման սխեմա, բացասական ունակություն, համակարգի գծայնություն, 1 *HP* սեղմման կետ, դրական հետադարձ կապ:

Ներածություն: Ժամանակակից հաջորդական փոխանցման և ընդունման գերարագ համակարգերում արդիական է դառնում հոսքուղու պատճառով աղավաղված տեղեկույթի վերականգման խնդիրը [1]: Հայտնի է, որ հոսքուղին ունի ցածր հաճախականային գոտիի բնութագիծ, և փոխանցվող տեղեկատվության արագության մեծացմանը զուգընթաց աճում է նաև ազդանշանի ճնշման չափը: Հետևաբար՝ աղավաղված ազդանշանի վերականգնումը պահանջում է ընդունիչ հանգույցում համահարթեցման բարդ համակարգի ներառում:

Հայտնի մոտեցումներից մեկում ազդանշանը կարելի է վերականգնել՝ օգտագործելով ասինքրոն գծային համահարթեցման սխեման (ԱԳՀՄ) և միակարգ որոշող հետադարձ կապով թվային գոտի [2]: ԱԳՀՄ-ն բաղկացած է դիֆերենցիալ ուժեղարարից և ցածր հաճախությունները ճնշող ունակային ու ռեզիստիվ տարրերից (նկ. 1):



Նկ. 1. Ասինքրոն զծային համահարթեցման սխեման

Սխեմայի փոխանցման ֆունկցիան է՝

$$H(s) = \frac{g_m}{C_{տլք}} * \frac{s + \frac{1}{R_{\etaեզ} C_{\etaեզ}}}{\left(s + \frac{1 + g_m R_{\etaեզ}/2}{R_{\etaեզ} C_{\etaեզ}}\right) \left(s + \frac{1}{R_{բեռ} C_{տլք}}\right)}, \quad (1)$$

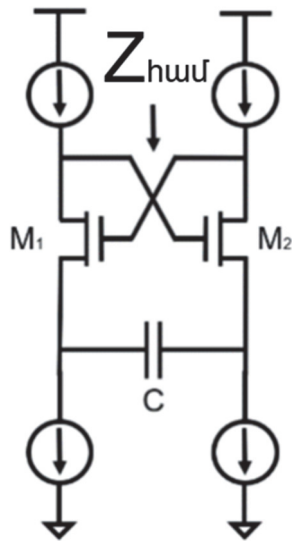
որտեղ g_m -ը մուտքային տրանզիստորի հաղորդականությունն է, $R_{բեռ}$ -ը՝ ուժեղարարի բեռը, իսկ $R_{\etaեզ}$ -ը և $C_{\etaեզ}$ -ը՝ համապատասխանաբար հետադարձ կապի դիմադրությունն ու ունակությունը:

Փոխանցման ֆունկցիայի զրոն և բևեռները որոշվում են հետևյալ կերպ՝

$$\omega_{զրո} = \frac{1}{R_{\etaեզ} C_{\etaեզ}}, \quad \omega_{բևեռ1} = \frac{1 + g_m R_{\etaեզ}/2}{R_{\etaեզ} C_{\etaեզ}}, \quad \omega_{բևեռ2} = \frac{1}{R_{բեռ} C_{տլք}}: \quad (2)$$

Ցածր ուժեղացման գործակից ունենալու պատճառով նման կառուցվածքը հնարավորություն չի տալիս՝ ամբողջությամբ վերականգնելու աղավաղված ազդանշանը: Ռեգիստիվ բեռի փոխարեն օգտագործելով ինդուկտիվ տարր՝ կարելի է մեծացնել ԱԳՀՄ-ի ուժեղացման գործակիցը [3]: Սակայն ինդուկտիվ տարրի ներդրումը հանգեցնում է մեծ մակերեսի կորստին, ինչպես նաև ինդուկտիվության արժեքի մեծ փոփոխությանը՝ կախված տեխնոլոգիական գործընթացից, սնման լարումից ու ջերմաստիճանից:

ԱԳՀՄ-ի ուժեղացման գործակիցը կարելի է մեծացնել՝ օգտագործելով բացասական ունակության սխեմայի (ԲՈԻՄ) առավելությունները [4]: ԲՈԻՄ-ը կազմված է ունակությունից և երկու միանման տրանզիստորներից, որոնք միացված են դրական հետադարձ կապով (նկ. 2):



Նկ. 2. Բացասական ունակության սխեման

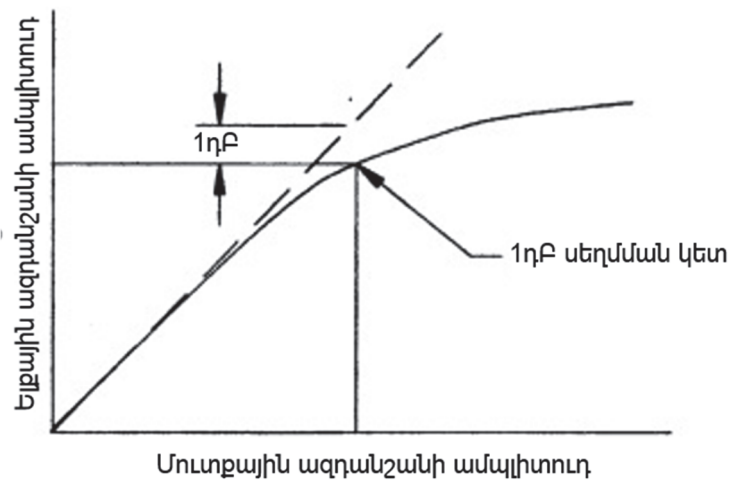
Նման կառուցվածքով ձևավորված դրական հետադարձ կապը հնարավորություն է տալիս՝ ստանալու բացասական արժեքով կոմպլեքս դիմադրություն: Միսեմայի կոմպլեքս դիմադրությունն է՝

$$Z_{\text{համ}} = - \frac{1}{sC} \frac{g_m + s(C_{\text{փական-աղբյուր}} + 2C)}{g_m - sC_{\text{փական-աղբյուր}}}, \quad (3)$$

որտեղ g_m -ը հետադարձ կապի տրանզիստորի հաղորդականությունն է, իսկ $C_{\text{փական-աղբյուր}}$ -ը՝ այդ տրանզիստորի փական-աղբյուր պարագիտային ունակությունը:

Տեղադրելով ԲՈՒՄ-ը ասինքրոն գծային ուժեղարարից հետո և կառավարելով դրա հենակային հոսանքը հոսանքի թվաանալոգային ձևափոխիչով (ԹԱՁ)՝ կարելի է ստանալ թվային կոդով դեկավարվող և առավել մեծ աշխատանքային հաճախությամբ ու ուժեղացման գործակցով ուժեղարար [5]: Կախված տեխնոլոգիական գործընթացից՝ ԲՈՒՄ-ում դրական հետադարձ կապով միացված տրանզիստորները կաշիատեն միայն կոնկրետ լարումների տիրույթում, ինչը կհանգեցնի համակարգի ոչ գծայնության մեծացմանը:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Ուժեղարարների հիմնական պարամետրերից է գծայնությունը [6]: Այն չափվում է 1 μV սեղմման կետով (նկ. 3):

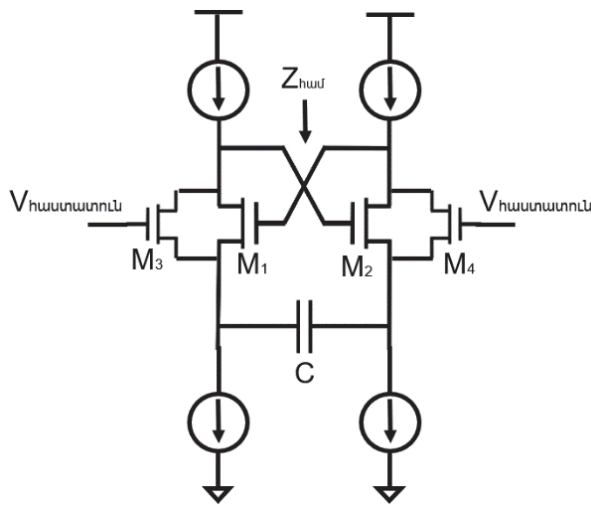


Նկ. 3. 1 ηԲ սեղմման կետը

1 ηԲ սեղմման կետը մուտքային ազդանշանի ամպլիտուդի այն մակարդակն է, որի հետևանքով ուժեղացման գործակիցը 1 ηԲ-ով պակաս է նոմինալ արժեքից: Սակայն կարևոր է նաև այդ կետում ելքային ազդանշանի մակարդակը: Այն պետք է լինի բավարար բարձր՝ հաջորդ հանգույցի մուտքային աշխատանքային տիրույթը ներառելու համար: Քանի որ ԱԳՀՄ-ին հաջորդում է որոշող հետադարձ կապով համահարթեցման սխեման, և այն աշխատում է մինչև 150 մՎ մուտքային ազդանշանի ամպլիտուդով, ուստի 1 ηԲ սեղմման կետի դեպքում ելքային ազդանշանի ամպլիտուդը պետք է լինի ոչ պակաս, քան 150 մՎ [2]:

ԲՈՒՄ-ի աշխատանքի հիմքը դրական հետադարձ կապ ապահովող երկու տրանզիստորների հաղորդականությունն է: Հոսանքի աղբյուրները նախատեսված են նախորդ հանգույցից հաստատուն հոսանք չվերցնելու համար, ինչն ապահովում է սխեմայի անկախ աշխատանքը: «M₁» և «M₂» տրանզիստորներն ունեն նույն չափերը և միևնույն լարման անկման դեպքում ապահովում են դիֆերենցիալ ճյուղերում միանման հոսանք: Սակայն մուտքային լարման փոփոխական բաղադրիչի առկայության դեպքում փոխվում են դրանք կառավարող լարումները, ինչը դրական հետադարձ կապի հաշվին թույլ է տալիս ապահովել ավելի արագ փոխանջատում: Սակայն լարման ցածր արժեքների դեպքում «M₁» և «M₂» տրանզիստորները հայտնվում են փակ ռեժիմում, և դիֆերենցիալ ճյուղերի միջև խախտվում է հաստատուն բաղադրիչի նկատմամբ շեղվածության չափը:

Առաջարկվում է «M₁» և «M₂» տրանզիստորներին զուգահեռ միացնել «M₃» և «M₄» տրանզիստորները, որոնք կկառավարվեն մուտքային ազդանշանի միայն հաստատուն բաղադրիչով (նկ. 4):

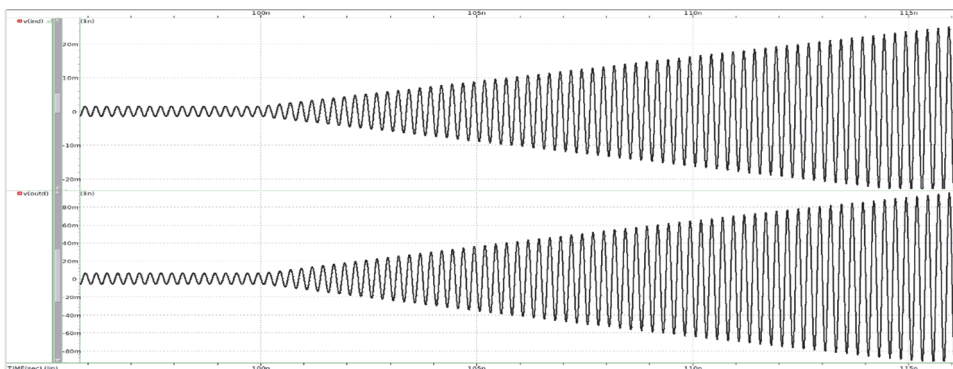


Նկ.4. Բացասական ունակության առաջարկվող սխեման

«M3» և «M4» տրանզիստորների առկայությունը թուլացնում է բացասական հետադարձ կապի ազդեցությունը, բայց ապահովում է դիֆերենցիալ ճյուղերի հոսանքի կայունությունը: Արդյունքում դիֆերենցիալ ճյուղերի հոսանքներն աճում և նվազում են նույն համամասնությամբ, ինչով էլ ապահովում են ամբողջ համակարգի գծայնությունը:

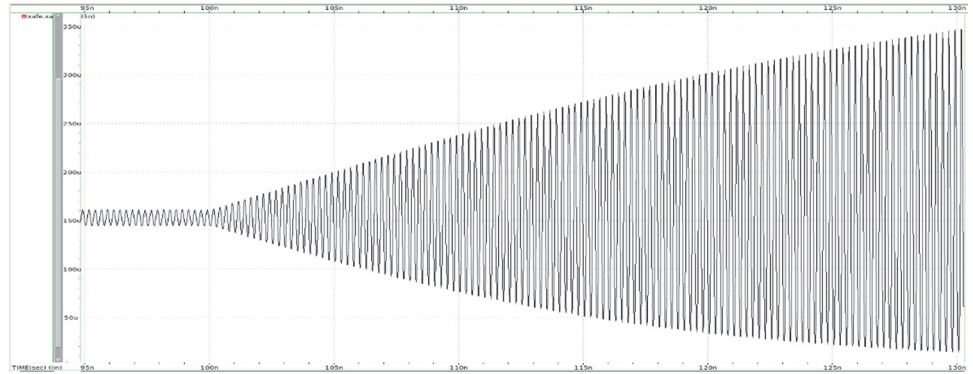
Հետազոտության արդյունքները: Առաջարկվող սխեման նախագծվել է «ՄԱՌԻԴ 14 նւ» տեխնոլոգիայով [7] և «Custom compiler» ծրագրային գործիքի միջոցով [8]: Մոդելավորումը կատարվել է «HSPICE» ծրագրային գործիքի միջոցով [9]:

Նախագծվել են ԱԳՀՄ և ԲՈԻՄ հանգույցները: 1 η սեղմման կետի չափման նպատակով կատարվել է սխեմայի ժամանակային մոդելավորում: Մոդելավորման ընթացքում ԱԳՀՄ-ի մուտքին տրվել է սինուսային ազդանշան, որի ամպլիտուդը ժամանակի ընթացքում սկսում է աճել (նկ. 5):



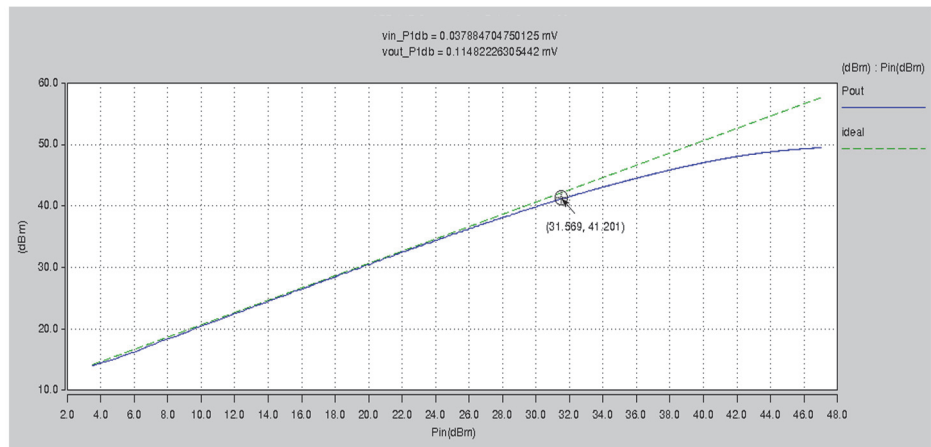
Նկ. 5. Մուտքային և ելքային ազդանշանները

Ինչպես երևում է «M1» և «M2» տրանզիստորների հոսանքների գրաֆիկից, դրանք աճում և նվազում են ոչ հավասարաչափ (նկ. 6):



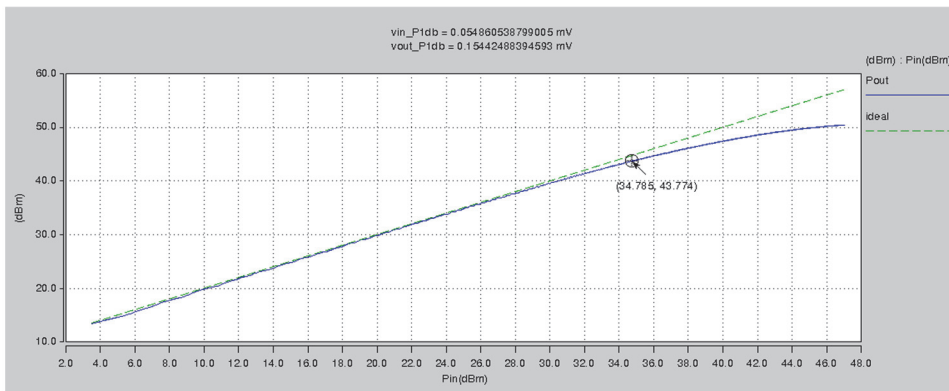
Նկ. 6. «M1» և «M2» տրանզիստորների հոսանքները

Համակարգի գծայնության գնահատման նպատակով մոդելավորման ընթացքում չափվել է համակարգի 1 դԲ սեղմման կետը անկյունային վատագույն դեպքում՝ առանց ներդրված «M3» և «M4» տրանզիստորների (նկ. 7):



Նկ. 7. Առանց ներդրված «M3» և «M4» տրանզիստորների 1դԲ սեղմման կետը

Այնուհետև ներդրվել են «M3» և «M4» տրանզիստորները այնպիսի համամասնությամբ, որ 1 դԲ սեղմման կետի ժամանակ ելքային ազդանշանի ամպլիտուդը լինի ոչ պակաս, քան 150 մՎ (նկ. 8):



Նկ. 8. Ներդրված «M3» և «M4» տրանզիստորներով 1ԴԲ սեղմման կետը

Համակարգի ուժեղացման գործակցի փոփոխության գնահատման նպատակով կատարվել է նաև հաճախականային մոդելավորում: Արդյունքներն ամփոփված են հետևյալ աղյուսակում:

Աղյուսակ

Համակարգի ամփոփ արդյունքները

	Առանց ներդրված «M3» և «M4» տրանզիստորների	Ներդրված «M3» և «M4» տրանզիստորներով	Տարբերություն
Ուժեղացման գործակիցը (ԴԲ) 5 ԳՀԶ-ում	9,88	9,25	-0,63 (-6,3%)
Ուժեղացման գործակիցը (ԴԲ) 4 ԳՀԶ-ում	10,36	9,8	-0,56 (-5,4%)
1 ԴԲ սեղմման կետում ելքային ազդանշանի մակարդակը (ՄՎ)	114,8	154,4	39,6 (+34,5%)

Աղյուսակում բերված արժեքները վկայում են, որ համակարգի գծայնությունը բարձրացել է մոտավորապես 35%-ով, իսկ ուժեղացման գործակիցը աշխատանքային հաճախություններում փոքրացել է շուրջ 6%-ով:

Եզրակացություն: Առաջարկվող «M3» և «M4» տրանզիստորների ներդրմամբ լուծվում է բացասական ունակության սխեմայի դիֆերենցիալ ճյուղերի համաչափ փոփոխության խնդիրը, որը հանգեցնում է ընդհանուր համակարգի գծայնության մեծացմանը: Մեթոդի կիրառմամբ հնարավոր է եղել 1 ԴԲ սեղմման կետում ելքային ազդանշանի ամպլիտուդը բարձրացնել ~35%-ով՝ համակարգի ուժեղացման գործակցի շուրջ 6% փոքրացման հաշվին:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. High PSRR and accuracy receiver active equalizer / **V.S. Melikyan, A.S. Sahakyan, H.H. Dingchyan, et al** // In 2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2014. – P. 194-197.
2. **Choi Y., Kim Y.B.** A 10-Gb/s receiver with a continuous-time linear equalizer and 1-tap decision-feedback equalizer // 2015 IEEE 58th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). – 2015. – P. 1-4.
3. A 56 Gb/s 6 mW 300 um² inverter-based CTLE for short-reach PAM2 applications in 16 nm CMOS / **K. Zheng, Y. Frans, K. Chang, et al** // 2018 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). – 2018. – P. 1-4.
4. **Mrković B., Ašenbrener M.** The simple CMOS negative capacitance with improved frequency response // 2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO). – 2012. – P. 87-90.
5. Two Stage CTLE For High Speed Data Receiving / **M.T. Grigoryan, A.A. Atanesyan, G.H. Hakobyan, et al** // In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2020. – P. 374-377.
6. Automatization of compression point 1dB (CP1dB) and input 3rd order intercept point (IIP3) measurements using lab VIEW platform / **E.V. Balashov, D. Pasquet, A.S. Korotkov, et al** // International Symposium on Signals, Circuits and Systems. – 2005. – P. 195-198.
7. **Melikyan V., Martirosyan M., Piliposyan G.** 14nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future // Small Systems Simulation Symposium. - 2018. - P. 37-41.
8. Galaxy Custom Designer Schematic Editor User Guide, Synopsys Inc. - 2014. -236p.
9. HSPICE Reference Manual, Synopsys Inc.- 2018. -968p.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 25.01.2022:

М.Т. ГРИГОРЯН

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОСТИ ЭКВАЛАЙЗЕРА В ПРИЕМНИКЕ

Представлена система улучшения линейности двухкаскадной схемы асинхронного линейного эквалайзера, расположенной в приемнике высокоскоростной системы передачи данных. Это позволяет значительно повысить линейность системы, что приводит к увеличению выходного рабочего диапазона схемы. Введена система, управляемая синфазным напряжением входного сигнала, которая решает проблему равномерного изменения токов в дифференциальных парах. Результаты моделирования показывают, что в худшем случае предложенный метод увеличивает линейность системы на 35% за счет снижения коэффициента усиления на 6%.

Ключевые слова: приемник, асинхронный линейный эквалайзер, отрицательный конденсатор, линейность системы, точка сжатия 1 дБ, положительная обратная связь.

M.T. GRIGORYAN

**A SYSTEM FOR REGULATING THE LINEARITY EQUALIZER IN A
RECEIVER**

The improvement of linearity of the two-stage continuous time linear equalizer circuit located in the receiver of the high speed SER-DES data transmission system is presented. It allows to significantly increase the linearity of the system, which leads to an increase in the output working range of the circuit. A system controlled by a common mode of the input voltage has been introduced, which solves the problem of evenly changing currents in differential pairs. Simulation results show that in the worst case the proposed method increases the linearity of the system by 35% due to the reduction of the amplification coefficient by 6%.

Keywords: receiver (RX), continuous time linear equalizer (CTLE), negative capacitance (neg-C), the linearity of system, 1 dB compression point, positive feedback.

УДК 621.52+511.52

АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ

DOI: 10.53297/0002306X-2022.v75.1-138

С.О. СИМОНЯН

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ
ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ ПАЛИНДРОМНЫХ
ЗАДАЧ ТИПА $A(t) \cdot X(t) + X^T(t) \cdot A(t) = 0$

Предложены аналитические декомпозиционные методы решения однопараметрических матричных палиндромных задач отмеченного класса с комплексными матрицами. Используя разложения этих матриц, представлены три разновидности эквивалентных гиперматричных однородных систем. В соответствии с этими разновидностями предложены аналитические вычислительные схемы с точными и наилучшими приближенными решениями при каждой гиперматричной однородной системе.

Рассмотрен модельный пример, который решен всеми тремя предложенными аналитическими декомпозиционными методами с использованием математического аппарата соответствующих кронекеровских матриц. Показано, что задача обладает бесчисленным множеством решений. Получены необходимые и достаточные условия существования ненулевых решений рассматриваемых однопараметрических матричных палиндромных задач.

Ключевые слова: однопараметрические матричные палиндромные задачи, аналитические декомпозиционные методы решения, аналитические декомпозиционные вычислительные схемы, модельный пример.

Введение. В работе [1] предложены методы решения однопараметрических матричных палиндромных задач типа

$$A(t)_{mxm} \cdot X(t)_{mxm} + X(t)_{mxm} \cdot A(t)_{mxm} = 0_{mxm}, \quad (1)$$

а в [2] - некоторые дополнения к этим методам.

В работе [3] предложены декомпозиционные методы решения однопараметрических матричных палиндромных задач типа (1), а в [4] - методы решения однопараметрических транспонированных аналогов матричных палиндромных задач типа

$$A(t) \cdot X^T(t) + X(t) \cdot A(t) = 0, \quad (2)$$

основанных на дифференциальных преобразованиях [5].

В настоящей работе рассматриваются аналитические декомпозиционные методы решения задач типа

$$A(t) \cdot X(t) + X^T(t) \cdot A(t) = 0, \quad (3)$$

предполагая, что имеют место разложения

$$A(t) = A_1(t) + j \cdot A_2(t), \quad (4)$$

$$X(t) = X_1(t) + j \cdot X_2(t). \quad (5)$$

Математический аппарат

I. Редукция задачи

Предполагая, что $\exists A^{-1}(t)$, из (3) получим

$$X(t) = -A^{-1}(t) \cdot X^T(t) \cdot A(t),$$

откуда

$$X^T(t) = -A^T(t) \cdot X(t) \cdot A^{-T}(t). \quad (6)$$

С другой стороны, из уравнения (3) следует, что

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

Сопоставление соотношений (6) и (7), очевидно, приводит к следующему выражению:

$$-A(t) \cdot X(t) \cdot A^{-1}(t) = -A^T(t) \cdot X(t) \cdot A^{-T}(t), \quad (8)$$

содержащему лишь только неизвестную матрицу $X(t)$. Теперь, умножив (8) слева на матрицу $A^{-T}(t)$ и справа на матрицу $A(t)$, получим

$$A^{-T}(t) \cdot A(t) \cdot X(t) \cdot \underbrace{A^{-1}(t) \cdot A(t)}_E = \underbrace{A^{-T}(t) \cdot A^T(t)}_E \cdot X(t) \cdot A^{-T}(t) \cdot A(t),$$

где E – единичная матрица.

Теперь, обозначив

$$A^{-T}(t) \cdot A(t) = B(t) \quad (9)$$

или

$$A(t) = A^T(t) \cdot B(t), \quad (10)$$

будем иметь эквивалентное (3) редуцированное матричное уравнение

$$B(t)_{mxm} \cdot X(t)_{mxm} - X(t)_{mxm} \cdot B(t)_{mxm} = 0_{mxm}. \quad (11)$$

II. Декомпозиционные методы решения уравнения (11)

1. В соответствии с (11) и с учетом (5) имеем

$$B(t) \cdot [X_1(t) + j \cdot X_2(t)] - [X_1(t) + j \cdot X_2(t)] \cdot B(t) = 0, \quad (12)$$

откуда получим матричную систему

$$\begin{cases} B(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B(t) = 0, \\ B(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B(t) = 0 \end{cases} \quad (13a)$$

$$(13b)$$

или однородное гиперматричное уравнение

$$\begin{bmatrix} B(t) & 0 \\ 0 & B(t) \end{bmatrix}_{2mx2m} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{2mxm} - \begin{bmatrix} X_1(t) & 0 \\ 0 & X_2(t) \end{bmatrix}_{2mx2m} \cdot \begin{bmatrix} B(t) \\ B(t) \end{bmatrix}_{2mxm} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2mxm}. \quad (14)$$

2. Далее, в соответствии с (11) и с учетом разложения

$$B(t) = B_1(t) + j \cdot B_2(t) \quad (15)$$

имеем

$$[B_1(t) + j \cdot B_2(t)] \cdot [X_1(t) + j \cdot X_2(t)] - [X_1(t) + j \cdot X_2(t)] \cdot [B_1(t) + j \cdot B_2(t)] = 0, \quad (16)$$

откуда получим матричную систему

$$\begin{cases} B_1(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_1(t) - B_2(t) \cdot X_2(t) + X_2(t) \cdot B_2(t) = 0, \\ B_2(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_2(t) + B_1(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B_1(t) = 0 \end{cases} \quad (17a)$$

$$(17b)$$

или однородное гиперматричное уравнение

$$\begin{bmatrix} B_1(t) & -B_2(t) \\ B_2(t) & B_1(t) \end{bmatrix}_{2mx2m} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{2mxm} - \begin{bmatrix} X_1(t) & -X_2(t) \\ X_2(t) & X_1(t) \end{bmatrix}_{2mx2m} \cdot \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \end{bmatrix}_{2mxm} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{2mxm}. \quad (18)$$

3. Аналогично, в соответствии с (13a), (13b) и с учетом (15) имеем матричную систему

$$\begin{cases} [B_1(t) + j \cdot B_2(t)] \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot [B_1(t) + j \cdot B_2(t)] = 0, \\ [B_1(t) + j \cdot B_2(t)] \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot [B_1(t) + j \cdot B_2(t)] = 0 \end{cases} \quad (19)$$

или полностью расщепленную эквивалентную систему

$$\begin{cases} B_1(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_1(t) = 0, \\ B_2(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_2(t) = 0, \\ B_1(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B_1(t) = 0, \\ B_2(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B_2(t) = 0. \end{cases} \quad (20a)$$

$$(20b)$$

$$(20в)$$

$$(20г)$$

Последнюю можно представить также в виде следующего однородного гиперматричного уравнения:

$$\left[\begin{array}{cc|cc} B_1(t) & 0 & & \\ 0 & B_2(t) & & \\ \hline & & B_1(t) & 0 \\ 0 & & 0 & B_2(t) \end{array} \right]_{4mx4m} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{4mxm} - \left[\begin{array}{cc|cc} X_1(t) & 0 & & \\ 0 & X_1(t) & & \\ \hline & & X_2(t) & 0 \\ 0 & & 0 & X_2(t) \end{array} \right]_{4mx4m} \cdot \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \\ B_1(t) \\ B_2(t) \end{bmatrix}_{4mxm} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4mxm}. \quad (21)$$

III. Аналитические вычислительные схемы

1. В соответствии с (14) можно организовать следующие вычислительные схемы:

$$\begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{(q+1)} = \begin{bmatrix} B(t) & 0 \\ 0 & B(t) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) & 0 \\ 0 & X_2(t) \end{bmatrix}_{(q)} \cdot \begin{bmatrix} B(t) \\ B(t) \end{bmatrix} \quad (22)$$

или

$$\begin{bmatrix} X_1(t) & 0 \\ 0 & X_2(t) \end{bmatrix}_{(q+1)} = \begin{bmatrix} B(t) & 0 \\ 0 & B(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{(q)} \cdot \begin{bmatrix} B(t) \\ B(t) \end{bmatrix}^+, \quad (23)$$

где “+” - знак псевдообратной матрицы, а q – номер итерации.

2. В соответствии с (18) можно организовать следующие вычислительные схемы:

$$\begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{(q+1)} = \begin{bmatrix} B_1(t) & -B_2(t) \\ B_2(t) & B_1(t) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) & -X_2(t) \\ X_2(t) & X_1(t) \end{bmatrix}_{(q)} \cdot \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

или

$$\begin{bmatrix} X_1(t) & -X_2(t) \\ X_2(t) & X_1(t) \end{bmatrix}_{(q+1)} = \begin{bmatrix} B_1(t) & -B_2(t) \\ B_2(t) & B_1(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{(q)} \cdot \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \end{bmatrix}^+. \quad (25)$$

3. В соответствии с (21) можно организовать следующие вычислительные схемы:

$$\begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{(q+1)} = \left[\begin{array}{cc|cc} B_1(t) & 0 & & \\ 0 & B_2(t) & & \\ \hline & & 0 & \\ & & B_1(t) & 0 \\ \hline & & 0 & B_2(t) \end{array} \right]^{-1} \cdot \left[\begin{array}{cc|cc} X_1(t) & 0 & & \\ 0 & X_1(t) & & \\ \hline & & X_2(t) & 0 \\ & & 0 & X_2(t) \end{array} \right]_q \cdot \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \\ B_1(t) \\ B_2(t) \end{bmatrix} \quad (26)$$

или

$$\left[\begin{array}{cc|cc} X_1(t) & 0 & & \\ 0 & X_1(t) & & \\ \hline & & X_2(t) & 0 \\ & & 0 & X_2(t) \end{array} \right]_{(q+1)} = \left[\begin{array}{cc|cc} B_1(t) & 0 & & \\ 0 & B_2(t) & & \\ \hline & & B_1(t) & 0 \\ & & 0 & B_2(t) \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix}_{(q)} \cdot \begin{bmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \\ B_1(t) \\ B_2(t) \end{bmatrix}^+ \quad (27)$$

Замечание 1. Для вычисления однопараметрических обратных и обобщенных обратных матриц в вычислительных схемах (22) – (27) можно использовать методы, предложенные в монографии [6].

Замечание 2. При реализации предложенных вычислительных схем можно использовать известный метод замороженных коэффициентов [5] или модели быстрого непрерывного градиентного дифференциального спуска [7].

Модельный пример. Пусть задано матричное уравнение

$$\begin{bmatrix} t & (1+jt) \\ (1-jt) & t \end{bmatrix} \cdot X(t) + X^T(t) \cdot \begin{bmatrix} t & (1+jt) \\ (1-jt) & t \end{bmatrix} = [0].$$

Тогда очевидно, что

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

и, следовательно, в соответствии с (9) имеем

$$B(t) = \begin{bmatrix} (1-2t^2-2jt) & -2jt^2 \\ 2jt^2 & (1-2t^2+2jt) \end{bmatrix}.$$

Продолжим вычисления. В соответствии с результатами работ [1-4] и с учетом редуцирующей матрицы $B(t)$ получим следующую кронекеровскую матрицу:

$$G(t) = B(t) \otimes E^T - E \otimes B^T(t) = \dots = \left[\begin{array}{cc|cc} 0 & -2jt^2 & -2jt^2 & 0 \\ 2jt^2 & 0 & 0 & -2jt^2 \\ \hline 2jt^2 & 0 & 0 & -2jt^2 \\ 0 & 2jt^2 & 2jt^2 & 0 \end{array} \right],$$

для которой, очевидно, $\text{rang} G(t) = 2$. Далее, если обозначим

$$X(t) = \begin{bmatrix} X_{11}(t) & X_{12}(t) \\ X_{21}(t) & X_{22}(t) \end{bmatrix}, X^\wedge(t) = (X_{11}(t)X_{12}(t)X_{21}(t)X_{22}(t))^T,$$

то для ненулевых решений однородного гиперматричного уравнения

$$G(t) \cdot X^\wedge(t) = \hat{0}$$

необходимо, чтобы

$$\det G(t) = 0,$$

что имеет место и, в частности, при маклореновском центре аппроксимации $t_\gamma = 0$. Следовательно, при выборе двух компонентов вектора $X^\wedge(t)$ остальные два компонента можно определить с точностью до выбранных компонентов. Таким образом, с учетом гиперматрицы $G(t)$ имеем недоопределенную систему

$$\begin{cases} -2jt^2 \cdot X_{12}(t) - 2jt^2 \cdot X_{21}(t) = 0, \\ 2jt^2 \cdot X_{11}(t) - 2jt^2 \cdot X_{22}(t) = 0. \end{cases}$$

1. Отсюда, при выборе $X_{12}(t) = 1$ получим $X_{21}(t) = -1$, а при выборе $X_{11}(t) = 1 - X_{22}(t) = 1$. Следовательно, будем иметь следующее стационарное решение задачи:

$$X(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} = X_1(t), X_2(t) = [0],$$

при котором редуцированное матричное уравнение (11) или уравнение (13а) приобретает вид

$$B(t) \cdot X(t) - X(t) \cdot B(t) = B(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B(t) = \begin{bmatrix} 0 & -4jt \\ -4jt & 0 \end{bmatrix} = 4jt \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}_{/t_Y=0} = [0].$$

Следовательно, матрицы $X(t) \equiv X_1(t)$, действительно, являются решением задачи. Что касается матрицы $X_2(t)$, то при ней, очевидно, выполняется и матричное уравнение (13б).

Далее, с учетом того, что

$$B_1(t) = \begin{bmatrix} (1 - 2t^2) & 0 \\ 0 & (1 - 2t^2) \end{bmatrix}, B_2(t) = \begin{bmatrix} -2jt & -2jt^2 \\ 2jt^2 & 2jt \end{bmatrix},$$

в соответствии с (20а) и (20б) имеем

$$B_1(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_1(t) = \dots = (1 - 2t^2) \cdot [0]_{/t_Y=0} = [0],$$

$$B_2(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_2(t) = \dots = 4jt \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}_{/t_Y=0} = [0].$$

Кроме того, очевидно, что условия (20в) и (20г) при $X_2(t)$ также имеют место.

2. Теперь рассмотрим вариант выбираемых нестационарных компонентов решения $X(t)$. Допустим, что $X_{12}(t) = 1 + jt$, а $X_{11}(t) = 1 - jt$. Тогда из вышеприведенной недоопределенной системы получим $X_{21}(t) = -(1 + jt)$, а $X_{22}(t) = 1 - jt$, иными словами - нестационарное решение

$$X(t) = \begin{bmatrix} (1 - jt) & (1 + jt) \\ -(1 + jt) & (1 - jt) \end{bmatrix},$$

откуда очевидно, что

$$X_1(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, X_2(t) = \begin{bmatrix} -jt & jt \\ -jt & -jt \end{bmatrix}.$$

При этом редуцированное матричное уравнение (11) будет

$$B(t) \cdot X(t) - X(t) \cdot B(t) = \dots = 4t \cdot (t - j) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = 4t \cdot (t - j) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}_{/a) t_Y=0}^{b) t_Y=j} = [0],$$

а матричные уравнения (13а), (13б) и (20а) – (20г) – примут следующий вид:

а) при $t_\gamma = 0$:

$$\begin{aligned} B(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B(t) &= B(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B(t) = B_1(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_1(t) = \\ &= B_2(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_2(t) = B_1(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B_1(t) = \\ &= B_2(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B_2(t) = [0]; \end{aligned}$$

б) при $t_\gamma = j$:

$$\begin{aligned} B(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B(t) &= \dots = 4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \neq [0], \\ B(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B(t) &= \dots = 4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \neq [0], \\ B_1(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_1(t) &= \dots = [0], \\ B_2(t) \cdot X_1(t) - X_1(t) \cdot B_2(t) &= \dots = 4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \neq [0], \\ B_1(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B_1(t) &= \dots = [0], \\ B_2(t) \cdot X_2(t) - X_2(t) \cdot B_2(t) &= \dots = 4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \neq [0]. \end{aligned}$$

Очевидно, при $t_\gamma = 0$ имеем истинное решение задачи, а при $t_\gamma = j$ – ложное “решение”. Такая картина может иметь место и при других центрах аппроксимации t_γ в соответствии с вырожденностью кронекеровской матрицы $G(t)$. Поэтому для выделения истинных ненулевых решений задач необходимо проверить выполнение всех условий (13а), (13б) и (20а) – (20г). Лишь только при одновременном выполнении этих условий будут найдены ненулевые решения задачи среди бесконечного множества претендентов-решений.

Итак:

Утверждение 1. Вырожденность кронекеровской матрицы $G(t)$ является лишь только необходимым условием для существования ненулевых решений задачи (3).

Утверждение 2. Одновременное выполнение условий (13а), (13б), (20а) – (20г) в одном и том же центре аппроксимации t_γ является достаточным условием для существования ненулевых решений задачи (3).

Заключение. Таким образом, для решения однопараметрической матричной палиндромной задачи (3) предложены три разновидности аналитических декомпозиционных методов, вычислительная эффективность которых проиллюстрирована решением и всесторонним исследованием одного модельного примера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Симонян С.О.** К решению однопараметрических матричных палиндромных задач типа $A(t) \cdot X(t) + X(t) \cdot A(t) = 0$ // Известия НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2019. – Т. LXXII, N3. – С. 418-426.
2. **Симонян С.О., Меликян А.В.** Дополнение к методу решения однопараметрических матричных палиндромных задач // Вестник НПУА: Информационные технологии, Электроника, Радиотехника. – 2020. – N1. – С. 9-25.
3. **Симонян С.О.** Декомпозиционные методы решения однопараметрических матричных палиндромных задач типа $A(t) \cdot X(t) + X(t) \cdot A(t) = 0$ // Вестник НПУА: Информационные технологии, Электроника, Радиотехника. – 2021. – N2. – С. 9-22.
4. **Симонян С.О.** К решению однопараметрических матричных палиндромных задач типа $A(t) \cdot X^T(t) + X(t) \cdot A(t) = 0$ // Вестник НПУА: Информационные технологии, Электроника, Радиотехника. – 2019. – N2. – С. 28-34.
5. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Прикладная теория дифференциальных преобразований. – Ереван: Изд-во ГИУА “Чартарагет”, 2010. – 364с.
6. **Симонян С.О.** Методы определения однопараметрических обобщенных обратных матриц. – Saarbrücken, LAMBERT, Academic Publishing, 2017. – 222с.
7. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Субградиентные модели. – Ереван: Авторское издание, 2005. – 208 с. (на арм. языке).

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 15.12.2021.

Մ.Հ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ

$A(t) \cdot X(t) + X^T(t) \cdot A(t) = 0$ ՏԻՊԻ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԱՅԻՆ ՊԱԼԻՆԴՐՈՄԱՅԻՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ԱՆԱԼԻՏԻԿ ԴԵԿՈՄՊԶԻՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ

Առաջարկվել են կոմպլեքս մատրիցներով միապարամետրական մատրիցային պալինդրոմային խնդիրների լուծման անալիտիկ դեկոմպոզիցիոն մեթոդներ: Օգտագործելով այդ մատրիցների վերլուծությունները՝ ներկայացվել են համարժեք հիպերմատրիցային համասեռ համակարգերի երեք տարատեսակներ: Այդ տարատեսակներին համապատասխան առաջարկվել են ճշգրիտ և լավագույն մոտավոր լուծումներով անալիտիկ հաշվողական սխեմաներ՝ յուրաքանչյուր համասեռ հիպերհամակարգի դեպքում:

Դիտարկվել է մոդելային օրինակ, որը լուծվել է առաջարկված բոլոր երեք անալիտիկ դեկոմպոզիցիոն մեթոդներով՝ օգտագործելով կրոնեկերյան մատրիցների մաթեմատիկական ապարատը: Ցույց է տրվել, որը խնդիրն օժտված է անվերջ բազմությամբ լուծումներով: Ստացվել են դիտարկվող միապարամետրական մատրիցային պալինդրոմային խնդիրների ոչ զրոյական լուծումների գոյության անհրաժեշտ և բավարար պայմանները:

Առանցքային բառեր. միապարամետրական մատրիցային պալինդրոմային խնդիրներ, լուծման անալիտիկ դեկոմպոզիցիոն մեթոդներ, անալիտիկ դեկոմպոզիցիոն հաշվողական սխեմաներ, մոդելային օրինակ:

S.H. SIMONYAN

**ANALYTICAL DECOMPOSITION METHODS FOR SOLVING ONE-
PARAMETRIC MATRIX PALINDROMIC PROBLEMS OF THE TYPE**

$$A(t) \cdot X(t) + X^T(t) \cdot A(t) = 0$$

Analytical decomposition methods for solving one-parametric matrix palindromic problems of the noted class with complex matrices are proposed. Using the decomposition of these matrices, three varieties of equivalent hypermatrix homogeneous systems are presented. In accordance with these varieties, the corresponding analytical computational schemes are proposed with exact and best approximate solutions for each hypermatrix homogeneous system.

A model example is considered, which is solved by all the three proposed analytical decomposition methods using the mathematical apparatus of the corresponding Kronecker matrices. It is shown that the problem has an infinite variety of solutions. Necessary and sufficient conditions for the existence of nonzero solutions of the considered one-parameter matrix problems are obtained.

Keywords: one-parameter matrix palindromic problems, analytical decomposition methods for solving, analytical decomposition computational schemes, model example.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Գ.Լ., ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Հ.Ս., ՄԱՐԳԱՐՅԱՆ Մ.Ա., ԲԱԲԱՅԱՆ Ա.Ա. ԵՌԱԿԱԼՎԱԾ ԱՍՏԻՃԱՆԱԶԵՎ ԿԼՈՐ ԶՈՂԻ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՎԻՃԱԿԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԶԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ.....	5
ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՕՐԴՅԱՆ Ն.Ա., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ա.Մ., ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ա.Ս., ՊՈՂՈՍՅԱՆ Խ.Վ. ՄԵՏԱՂԱՊԱՏՎԱԾ ԱԼՄԱՍՏԱՅԻՆ ՀԱՏԻԿՆԵՐՈՎ ԿՈՄՊԼԵՔՏԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ՏԱՔ ՄԱՄԼՄԱՄԲ	16
ՄԱՀԱԿՅԱՆ Ն.Գ. ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԻՆՔԼԱՏԱՐԱԾՎՈՂ ՄԻՆԹԵԶԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ԵՐԿԱԹ ԵՎ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ MAX-ՖԱԶԻ ՍՏԱՅՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ.....	27
ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Լ.Ա., ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ Վ.Վ. ՄՈԴԵԼԱՅԻՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՒՄ ՀԱՄԱՐԺԵՔ ՆՅՈՒԹԻ ՖԻԶԻԿԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ.....	37
ԱՀԱՐՈՆՅԱՆ Գ.Ա. ԲԱՅԱՀԱՆՔԵՐՈՒՄ ՀՈՐԱՏԱՊԱՅԹԵՅՄԱՆ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆԵՐԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՆՈՐ ՄԵԹՈԴԻԿԱ.....	43
ԿԱՆԵՅԱՆ Գ.Ռ., ԽԱԶՍՏՐՅԱՆ Ա.Գ., ԱՄԻՐՋԱՆՅԱՆ Ա.Մ., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ա. ՀԱԷԿ-Ի ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄՆԵՐԻ ԾՐԱԳՐԻ ՍՏՈՒԳՈՒՄ ՌԻՍԿ-ՏԵՂԵԿԱՑՎԱԾ ՄՈՏԵՑՄԱՄԲ	55
ԴՈՆՈՅԱՆ Ա.Ա., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Գ.Պ., ԱՎՈՅԱՆ Ռ.Հ. ԱՐԵՎԻ ՇԱՐԺՄԱՆԸ ԵՐԿՈՒ ԱՌԱՆՑՔՈՎ ՀԵՏԵՎՈՂ ՀԻԲՐԻԴԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ.....	65
ԽԱԶՍՏՐՅԱՆ Տ.Բ., ԴԱՎԹՅԱՆ Դ.Ֆ. ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ԲԱՆԱԿԱՆՈՒԹԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ ՊԱՏԿԵՐԻ ԽՈՐՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՀԱՄԱՐ JETSON XAVIER NX-Ի ԵՎ CORAL DEV BOARD ՏՐԱՄԱԲԱՆԱԿԱՆ ԵԶՐԱԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ՄԱՐՔԵՐԻ ՀԱՄԵՄԱՏՈՒԹՅՈՒՆԸ.....	72
ԱՅՎԱԶՅԱՆ Գ.Ե. ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԻ ՀԱԿԱԱՆԴՐԱԴԱՐՁՆՈՂ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՑԹՆԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ. ՄԱՍ 1. ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐ	81
ԵԶԱԿՅԱՆ Ն.Դ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ս.Գ. ԲԵՍԵԼԻ ԶՏԻՉԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՀԵՌԱԶՍԹԻ ՖՈՏՈՈՒԺԵՂԱՐԱՐԻ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԼԱՎԱՅՈՒՄԸ.....	92
ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ Օ.Հ., ՍՈՍՁՅԱՆ Ա.Մ., ՇԱԼՁՅԱՆ Դ.Ս., ՄԱՆՈՒԶԱՐՅԱՆ Դ.Վ. ՍՕՀՍ-ՈՒՄ ԶԳԱՅՈՒՆ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐԻ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՅՄԱՆ ՆՈՐ ՄԵԹՈԴ՝ ԻՆՔԼԱԿԱՐԳԱԲԵՐՄԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ.....	100

ՄԽԻԹԱՐՅԱՆ Ս.Ա., ԱՆՏՈՆՅԱՆ Ա.Պ., ՄՆԱՑԱԿԱՆՅԱՆ Ա.Ո.	
ՆՄԱՆԱԿԱՅԻՆ ԱՆԸՆԴՀԱՏ ՏԵՄԱՆԵԼԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ՓՈՒՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԵՎ ԻՐԱԿԱՆԱՅՄԱՆ ՄԱՍԻՆ.....	108
ԿՈՍՏԱՆՅԱՆ Հ.Տ.	
ԱՆԱԼՈԳԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐԻ ՎՐԱ ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՇԵՂՄԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ.....	120
ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ Մ.Տ.	
ԸՆԴՈՒՆԻՉ ՀԱՆԳՈՒՅՑՈՒՄ ՀԱՄԱՀԱՐԹԵՑՄԱՆ ՄԽԵՄԱՅԻ ԳԾԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ԿԱՐԳԱԲԵՐՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ	129
ՄԻՄՈՆՅԱՆ Ս.Հ.	
$A(t) \cdot X(t) + X^T(t) \cdot A(t) = 0$ ՏԻՊԻ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ՄԱՏՐԻՑԱՅԻՆ ՊԱԼԵՆԴՐՈՄԱՅԻՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ԱՆԱԼԻՏԻԿ ԴԵԿՈՄՊՈԶԻՑԻՈՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐ	138

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕТРОСЯН Г.Л., ПЕТРОСЯН А.С., МАРГАРЯН М.А., БАБАЯН А.А. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ СТУПЕНЧАТОГО СПЕЧЕННОГО КРУГЛОГО СТЕРЖНЯ.....	5
АГБАЛЯН С.Г., ОРДЯН Н.А., МАРТИРОСЯН А.М., АГБ АЛЯН А.С., ПОГОСЯН Х.В. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГОРЯЧИМ ПРЕССОВАНИЕМ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ АЛМАЗНЫМИ ЗЕРНАМИ	16
СААКЯН Н.Г. ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗО- И КРЕМНИЙСОДЕРЖАЩИХ МАХ-ФАЗ МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА	27
МАНУКЯН Л.А., ОВАКИМЯН В.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО МАТЕРИАЛА В МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	37
АГАРОНЯН Г.А. НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРАХ	43
КАНЕЦЯН Г.Р., ХАЧАТРЯН А.Г., АМИРДЖАНИЯН А.М., ГЕВОРГЯН А.А. ПРОВЕРКА ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ААЭС РИСК-ИНФОРМИРОВАННЫМ ПОДХОДОМ.....	55
ДРНОЯН А.А., ВАРДАНИЯН Г.П., АВОЯН Р.О. РАЗРАБОТКА ДВУХСЛОЙНОЙ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ДВИЖЕНИЕМ СОЛНЦА	65
ХАЧАТРЯН Т.Б., ДАВТЯН Д.Ф. СРАВНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА JETSON XAVIER NX И CORAL DEV BOARD ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЛУБИНЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	72
АЙВАЗЯН Г.Е. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТИОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЧАСТЬ 1. ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	81
ЕЗАКЯН Н.Д., МАРТИРОСЯН С.Г. УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОУСИЛИТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИЛЬТРА БЕССЕЛЯ	92

ПЕТРОСЯН О.А., МОМДЖЯН А.М., ШАЛДЖЯН Д.С., МАНУЧАРЯН Д.В. НОВЫЙ МЕТОД СНИЖЕНИЯ МОЩНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ СТАТИЧЕСКОГО ОПЕРАТИВНОГО ЗАПОМИНАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНИЗМА САМОКАЛИБРОВКИ.....	100
МХИТАРЯН С.А., АНТОНЯН А.П., МНАЦАКАНЯН А.Р. ОБ ИССЛЕДОВАНИИ И СОЗДАНИИ СПОСОБОВ ЭЛЕКТРОННОЙ РАЗВЕРТКИ НЕПРЕРЫВНОЙ АНАЛОГОВОЙ ВИДИМОЙ ЗАПИСИ	108
КОСТАНЯН А.Т. МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА НА АНАЛОГОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ	120
ГРИГОРЯН М.Т. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНОСТИ ЭКВАЛАЙЗЕРА В ПРИЕМНИКЕ	129
СИМОНЯН С.О. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ ПАЛИНДРОМНЫХ ЗАДАЧ ТИПА $A(t) \cdot X(t) + X^T(t) \cdot A(t) = 0$	138

CONTENTS

PETROSYAN G.L., PETROSYAN H.S., MARGARYAN M.A., BABAYAN A.A. COMPUTER MODELING OF THE DEFORMED STATE OF THE STEPPED SINTERED BAR EXTRUSION.....	5
AGHBALYAN S.G., ORDYAN N.A., MARTIROSYAN A.M., AGHBALYAN A.S., POGHOSSYAN KH.V. DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING COMPOSITE MATERIALS BY HOT PRESSING WITH METALLIZED DIAMOND GRAINS	16
SAHAKYAN N.G. OBTAINING AND STUDYING THE PROPERTIES OF IRON AND SILICON- CONTAINING MAX-PHASES BY THE METHOD OF SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS.....	27
MANUKYAN L.A., HOVAKIMYAN V.V. DETERMINING THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF THE EQUIVALENT MATERIAL IN MODEL INVESTIGATIONS	37
AHARONYAN G.A. A NEW METHOD FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS AT OPEN PITS.....	43
KANETSYAN G.R., KHACHATRYAN A.G., AMIRJANYAN A.M., GEVORGYAN A.A. INSPECTION OF THE ANPP SYSTEMS TEST PROGRAM USING THE RISK-INFORMED APPROACH	55
DRNOYAN A.A., VARDANYAN G.P., AVOYAN R.H. DEVELOPING A TWO-AXIS HYBRID SYSTEM FOR TRACKING THE MOVEMENT OF THE SUN.....	65
KHACHATRYAN T.B., DAVTYAN D.F. DEPTH ESTIMATION AI INFERENCEING COMPARISON OF JETSON XAVIER NX AND CORAL DEV BOARD	72
AYVAZYAN G.Ye. EVALUATING THE EFFICIENCY OF ANTI-REFLECTIVE SURFACES OF SILICON SOLAR CELLS PART 1. OPTICAL CHARACTERISTICS	81
YEZAKYAN N.D., MARTIROSYAN S.G. IMPROVING THE PARAMETERS OF A PHOTOAMPLIFIER OF LASER DISTANCE METER BY APPLYING THE BESSEL FILTER	92
PETROSYAN O.H., MOMJYAN A.M., SHALJYAN D.S., MANUCHARYAN D.V. A NOVEL METHOD OF POWER REDUCTION FOR A SRAM SENSE AMPLIFIER WITH A SELF-CALIBRATION MECHANISM	100

MKHITARYANH S.A., ANTONYAN A.P., MNATSAKANYAN A.R. ON RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF METHODS FOR ELECTRONIC EXTENDING OF CONTINUOUS ANALOG VISIBLE RECORDING	108
KOSTANYAN H.T. THE MINIMIZATION METHOD OF THE THERMAL DRIFT INFLUENCE ON ANALOG INTEGRATED CIRCUITS	120
GRIGORYAN M.T. A SYSTEM FOR REGULATING THE LINEARITY EQUALIZER IN A RECEIVER	129
SIMONYAN S.H. ANALYTICAL DECOMPOSITION METHODS FOR SOLVING ONE- PARAMETRIC MATRIX PALINDROMIC PROBLEMS OF THE TYPE $A(t) \cdot X(t) + X^T(t) \cdot A(t) = 0$	138

ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

- 1 Աղբալյան Արտակ Սուրենի տ.գ.թ., դոցենտ, ավագ գիտ. աշխատող, ՀԱՊՀ,
էլ. հասցե- aghbalyan.edu@gmail.com
- 2 Աղբալյան Սուրեն Գևորգի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ,
էլ. հասցե- metalsur@polytechnic.am
- 3 Ահարոնյան Գագիկ
Անուշավանի տ.գ.թ., հորատապայթեցման աշխատանքների
ղեկավար, «Ա.Ա.Բ. ՊՐՈՑԵՎՏ», ՓԲԸ
էլ. հասցե-
- 4 Ամիրջանյան Արմեն Մարատի տնօրեն, «Միջուկային և ռադիացիոն անվտան-
գության գիտատեխնիկական կենտրոն» ՓԲԸ,
էլ. հասցե- a.amirjanyan@nrsc.am
- 5 Այվազյան Գագիկ Երջանիկի տ.գ.թ., դոց., «Կապի միջոցներ» ամբիոն, ՀԱՊՀ,
էլ. հասցե- agagarm@gmail.com
- 6 Անտոնյան Աննա Պետիկի գիտաշխատող, ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական
պրոբլեմների ինստիտուտ (ՖԿՊԻ),
էլ. հասցե- anna_iapp@yahoo.com
- 7 Ավոյան Ռոմիկ Հովհաննեսի մագիստրանտ, ՀԱՊՀ,
էլ. հասցե- avoyan.rom@gmail.com
- 8 Բաբայան Արման Արտակի ասպիրանտ, «Մեխանիկա և մեքենագիտություն»
ամբիոն, ՀԱՊՀ,
էլ. հասցե- babayan.arman.1997@mail.ru
- 9 Գրիգորյան Մանվել Տիգրանի ասպիրանտ, ՀԱՊՀ, ինժիներ 2, «Մինոփսիս
Արմենիա» ՓԲԸ,
էլ. հասցե- manvelg@synopsys.com
- 10 Գևորգյան Արամ Աշիկի տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ,
էլ. հասցե- a.gevorgyan@polytechnic.am
- 11 Դավթյան Դավիթ Ֆրունզիկի տ.գ.թ. ՀԱՊՀ, հետազոտող-մշակող ավագ մենեջեր,
«Synopsys Armenia» ՓԲԸ,
էլ. հասցե- davidd@synopsys.com
- 12 Դոնոյան Ալեքսանդր Արտաշեսի ասպիրանտ, ՀԱՊՀ,
էլ. հասցե- a.donoyan@polytechnic.am
- 13 Եզակյան Նարեկ Դավիթի տ.գ.թ., դասախոս, «Ռադիոսարքավորումներ»
ամբիոն, ՀԱՊՀ, կրտսեր գիտաշխատող, «Կիրա-
ռական ռադիոֆիզիկայի» լաբորատորիա, ՀՀ ԳԱԱ
Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ
էլ. հասցե- yezakinarek@gmail.com
- 14 Խաչատրյան Արամ Գևորգի ասպիրանտ, ՀԱՊՀ, ռիսկերի գնահատման գծով
որակավորում անցնող մասնագետ, «Միջուկային
և ռադիացիոն անվտանգության գիտատեխնիկա-
կան կենտրոն» ՓԲԸ,
էլ. հասցե- ar.khachatryan@nrsc.am
- 15 Խաչատրյան Տիգրան Բազրատի մագիստրանտ, ՀԱՊՀ, Ծրագրային ապահովման
ճարտարագետ, «Synopsys Armenia» ՓԲԸ,
էլ. հասցե- khacha@synopsys.com

- 16 Կանեցյան Գուրգեն Ռուբենի
մ.գ.թ., ռիսկերի գնահատման գծով գլխավոր մասնագետ, «Միջուկային և ռադիացիոն անվտանգության գիտատեխնիկական կենտրոն» ՓԲԸ
Էլ. հասցե- g.kanetsyan@nrsc.am
- 17 Կոստանյան Հակոբ Տիգրանի
ասպիրանտ, ՀԱՊՀ, անալոգային և խառը ազդանշանային համակարգերի II կարգի ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ,
Էլ. հասցե- hakobk@synopsys.com
- 18 Հովակիմյան Վրեժ Վարուժանի
ասպիրանտ, ՀԱՊՀ, երկրամեխանիկայի և լեռնային աշխատանքների լաբորատորիայի գիտաշխատող, «Լեռնամետալուրգիայի ինստիտուտ» ՓԲԸ,
Էլ. հասցե- vrezh_hovakimyan@mmi.am
- 19 Մանուկյան Լևոն Անդրանիկի
տ.գ.դ., դոցենտ ՀԱՊՀ, «Գեոինժինիրինգ» ՍՊԸ տնօրեն,
Էլ. հասցե- manukyanlevon-a@rambler.ru
- 20 Մանուչարյան Դոնարա Վլադիմիրի
դասախոս, ՀԱԱՀ,
Էլ. հասցե- donaramanucharyan@gmail.com
- 21 Մարգարյան Միհրան Առնակի
ասպիրանտ, «Մեխանիկա և մեքենագիտություն» ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե- marg.mihran@gmail.com
- 22 Մարտիրոսյան Արթուր Մարտունի
տ.գ.թ., ավագ գիտ. աշխատող, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե- artmart08@mail.ru
- 23 Մարտիրոսյան Ստեփան Գեղամի
ավագ գիտաշխատող, ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ
Էլ. հասցե- stepanmartirosyan1953@gmail.com
- 24 Մխիթարյան Սամվել Աղասու
դոցենտ, գլխավոր ճարտարագետ, ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտ (ՖԿՊԻ), ավագ գիտաշխատող, ՀՌՀ բիզնեսի ու տնտեսագիտության ինստիտուտ,
Էլ. հասցե- sammkhitar@yahoo.com
- 25 Մնացականյան Արմինե Ռուբենի
ավագ ճարտարագետ, ՀՀ ԳԱԱ Ֆիզիկայի կիրառական պրոբլեմների ինստիտուտ (ՖԿՊԻ),
Էլ. հասցե- sirushrub06@yahoo.com
- 26 Մոմջյան Արսեն Մելքոնի
ասպիրանտ, «Էլեկտրոնիկա, միկրո և նանոէլեկտրոնիկա» ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե- momjyanarsen@gmail.com
- 27 Շալջյան Դավիթ Սամվելի
ասպիրանտ, «Էլեկտրոնիկա, միկրո և նանոէլեկտրոնիկա» ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե- shaljian.davit@gmail.com
- 28 Պետրոսյան Գևորգ Լյուդվիկի
տ.գ.դ., պրոֆեսոր, «Մեխանիկա և մեքենագիտություն» ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե- gevorglp@seua.am

- 29 Պետրոսյան Հասմիկ Սամսոնի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, «Մետալուրգիա և նյութագիտություն» ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե-univ70@mail.ru
- 30 Պետրոսյան Օլեգ Հարությունի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե-polonc.ru@mail.ru
- 31 Պողոսյան Խոսրով Վլադիմիրի ասպիրանտ, «Մետալուրգիա և նյութագիտություն» ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե-xosrov92@mail.ru
- 32 Սահակյան Նինա Գագիկի հայցորդ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե-Nina.sahakyan@mail.ru
- 33 Սիմոնյան Սարգիս Հովհաննեսի տ.գ.դ., պրոֆ., «Տեղեկատվական տեխնոլոգիաներ և ավտոմատացում» ամբիոնի վարիչ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե-ssimonyan@seua.am
- 34 Վարդանյան Գոռ Պատվականի տ.գ.թ., ՀԱՊՀ ռեկտոր,
Էլ. հասցե-Gor.vardanyan@polytechnic.am
- 35 Օրդյան Նունե Ալբերտի տ.գ.թ., դոցենտ, Տեխնոլոգիական կրթության ամբիոն, Խ.Աբովյանի անվան ՀՊՄՀ,
Էլ. հասցե-nordris@gmail.com

СПИСОК АВТОРОВ

- 1 Авоян Ромик Оганесович
магистрант, НПУА
Эл. почта - avoyan.rom@gmail.com
- 2 Агаронян Гагик Анушаванович
к.т.н., НПУА; начальник буровзрывных работ, ЗАО
“А.А.Б. ПРОЕКТ”
- 3 Агбальян Артак Суренович
к.т.н., доцент, с.н.с., НПУА,
Эл. почта - aghbalyan.edu@gmail.com
- 4 Агбальян Сурен Геворкович
д.т.н., профессор, НПУА,
Эл. почта - metalsur@polytechnic.am
- 5 Айвазян Гагик Ерджаникович
к.т.н., доцент, кафедра Средств связи, НПУА,
Эл. почта - agagarm@gmail.com
- 6 Амирджанян Армен Маратович
директор ЗАО “Научно-технический центр ядерной
и радиационной безопасности”,
Эл. почта - a.amirjanyan@nrsc.am
- 7 Антонян Анна Петиковна
н.с. ИППФ НАН РА,
Эл. почта - anna_iapp@yahoo.com
- 8 Бабаян Арман Артакович
аспирант, кафедра Механики и машиноведения, НПУА,
Эл. почта - babayan.arman.1997@mail.ru
- 9 Варданын Гор Патваканович
к.т.н., ректор НПУА,
Эл. почта - Gor.vardanyan@polytechnic.am
- 10 Геворгян Арам Ашикович
к.т.н., доцент, НПУА,
Эл. почта - a.gevorgyan@polytechnic.am
- 11 Григорян Манвел Тигранович
аспирант, НПУА; инженер 2, ЗАО “Синописис
Армения”,
Эл. почта - manvelg@synopsys.com
- 12 Давтян Давид Фрунзикович
к.т.н., НПУА; старший менеджер по исследованиям
и разработкам, ЗАО “Синописис Армения”,
Эл. почта - davidd@synopsys.com
- 13 Дрноюн Александр Арташесович
аспирант, НПУА,
Эл. почта - a.drnoyan@polytechnic.am
- 14 Езакян Нарек Давидович
к.т.н., кафедра Радиоустройств, НПУА; м.н.с.
Лаборатории прикладной радиофизики, Институт
радиофизики и электроники НАН РА,
Эл. почта - yezakinarek@gmail.com
- 15 Канесян Гурген Рубенович
к.п.н., главный специалист по оценке рисков, ЗАО
“Научно-технический центр ядерной и радиацион-
ной безопасности”,
Эл. почта - g.kanetsyan@nrsc.am
- 16 Костанян Акоп Тигранович
аспирант, НПУА; инженер-конструктор аналоговых
и смешанных сигналов, ЗАО “Синописис Армения”,
Эл. почта - hakobk@synopsys.com
- 17 Манукян Левон Андраникович
д.т.н., доцент, НПУА; директор ООО
“Геоинжиниринг”,
Эл. почта - manukyanlevon-a@rambler.ru
- 18 Манучарян Донара Владимировна
преподаватель, НАУА,
Эл. почта - donaramanucharyan@gmail.com

- 19 Маргарян Мигран Арнакович аспирант, кафедра Механики и машиноведения, НПУА,
Эл. почта - marg.mihran@gmail.com
- 20 Мартиросян Артур Мартунович к.т.н., с.н.с., НПУА,
Эл. почта - artmart08@mail.ru
- 21 Мартиросян Степан Гегамович с.н.с. Института радиофизики и электроники НАН РА,
Эл. почта - stepanmartirosyan1953@gmail.com
- 22 Мнацаканян Армине Рубеновна старший инженер ИППФ НАН РА,
Эл. почта - sirushrub06@yahoo.com
- 23 Момджян Арсен Мелконович аспирант, НПУА,
Эл. почта - momjyanarsen@gmail.com
- 24 Мхитарян Самвел Агасович к.т.н., доцент кафедры экономики РАУ РА, главный инженер ИППФ НАН РА,
Эл. почта - sammkhitar@yahoo.com
- 25 Овакимян Вреж Варужанович аспирант, Институт ГМ и ХТ, НПУА; научный сотрудник Лаборатории геомеханики и горных работ, ЗАО “Лернаметаллургияи институт”,
Эл. почта - vrezh_hovakimyan@mmi.am
- 26 Ордян Нуне Альбертовна к.т.н., доцент, кафедра Технологического образования, АГПУ им. Х. Абовяна,
Эл. почта - nordris@gmail.com
- 27 Петросян Асмик Самсоновна д.т.н., профессор, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА
Эл. почта - univ70@mail.ru
- 28 Петросян Геворг Людвигович д.т.н., профессор, кафедра Механики и машиноведения, НПУА,
Эл. почта - gevorglp@seua.am
- 29 Петросян Олег Арутюнович д.т.н., профессор, НПУА,
Эл. почта - polonc.ru@mail.ru
- 30 Погосян Хосров Владимирович аспирант, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - xosrov92@mail.ru
- 31 Саакян Нина Гагиковна соискатель, Институт ГМ и ХТ, НПУА,
Эл. почта - Nina.sahakyan@mail.ru
- 32 Симонян Саргис Оганесович д.т.н., проф., зав. кафедрой Информационных технологий и автоматизации, НПУА,
Эл. почта - ssimonyan@seua.am
- 33 Хачатрян Арам Геворгович аспирант, НПУА; специалист, проходящий подготовку по оценке рисков, ЗАО “Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности”,
Эл. почта - ar.khachatryan@nrsc.am
- 34 Хачатрян Тигран Багратович магистрант, НПУА; инженер по программному обеспечению, ЗАО “Синописис Армения”,
Эл. почта - khacha@synopsys.com
- 35 Шалджян Давид Самвелович аспирант, НПУА,
Эл. почта - shaljyan.davit@gmail.com

LIST OF THE AUTHORS

- | | | |
|----|-----------------------------|---|
| 1 | Aghbalyan Artak Suren | Cand. of tech. sci., SW, NPUA,
E-mail - aghbalyan.edu@gmail.com |
| 2 | Aghbalyan Suren Geworg | Dr. of tech. sci., Prof., NPUA,
E-mail - metalsur@polytechnic.am |
| 3 | Aharonyan Gagik Anushavan | Cand. of tech. sci., Head of drilling and blasting operations,
CJSC “A.A.B. PROJECT” |
| 4 | Amirjanyan Armen Marat | “Nuclear and radiation safety center” CJSC –director
E-mail - a.amirjanyan@nrsc.am |
| 5 | Antonyan Anna Petik | Institute of Applied Problems of Physics of the National
Academy of Sciences of Republic Armenia Researcher at
tahe IAPP
E-mail -anna_iapp@yahoo.com |
| 6 | Avoyan Romik Hovhannes | Graduate student of NPUA
E-mail - avoyan.rom@gmail.com |
| 7 | Ayvazyan Gagik Yerdjanik | Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., NPUA,
E-mail -agagarm@gmail.com |
| 8 | Babayan Arman Artak | Post-graduate student, chair of Mechanics and Machine
Science
E-mail - babayan.arman.1997@mail.ru |
| 9 | Davtyan David Frunzik | Cand. of tech. sci., Research and Development Senior
Manager, “Synopsis Armenia” CJSC, NPUA,
E-mail - davidd@synopsys.com |
| 10 | Drnoyan Aleksandr Artashes | Post-graduate student, NPUA
E-mail - a.drnoyan@polytechnic.am |
| 11 | Gevorgyan Aram Ashik | Cand. of tech. sci., assoc. prof., NPUA,
E-mail - a.gevorgyan@polytechnic.am |
| 12 | Grigoryan Manvel Tigran | Engineer 2, “Synopsis Armenia”, NPUA
E-mail - manvelg@synopsys.com |
| 13 | Hovakimyan Vrezh Varuzhan | Post-graduate, Institute of Mining and Metallurgy and
Chemical Technologies, Yerevan, Armenia, researcher of
geomechanics and mining works laboratory of CJSC
“Lernametalurgiai Institute”
E-mail - email: vrezh_hovakimyan@mmi.am |
| 14 | Kanetsyan Gurgen Ruben | Cand. of tech. sci., “Nuclear and radiation safety center”
CJSC – leading specialist on risk assessment,
E-mail - g.kanetsyan@nrsc.am |
| 15 | Khachatryan Aram Gevorg | Post-graduate student, “Nuclear and radiation safety center”
CJSC – trainee on risk assessment, NPUA,
E-mail - ar.khachatryan@nrsc.am |
| 16 | Khachatryan Tigran Bagrat | Graduate student of NPUA
Software Engineer, “Synopsis Armenia” CJSC
E-mail - |
| 17 | Kostanyan Hakob Tigran | Post-graduate student of National Polytechnic University of
Armenia, Analog and Mixed signal circuit design engineer,
Engr. II OOO “Synopsis Armenia”
E-mail -hakobk@synopsys.com |
| 18 | Manucharyan Donara Vladimir | Lecturer of NPUA
E-mail - donaramanucharyan@gmail.com |
| 19 | Manukyan Levon Andranic | Assoc. Prof. of NPUA, Institute of Mining and Metallurgy
and Chemical Technologies, Director of LRC “Geoinjirig”
E-mail -manukyanlevon-a@rambler.ru |

- 20** Margaryan Mihran Arnak Post-graduate student, Chair of Mechanics and Machine Science
E-mail - marg.mihran@gmail
- 21** Martirosyan Artur Martun Cand. of tech. sci., SW, NPUA,
E-mail -artmart08@mail.ru
- 22** Martirosyan Stepan Gegham Senior researcher of the Institute of Radiophysics and Electronics of NAS of RA
E-mail -stepanmartirosyan1953@gmail.com
- 23** Mkhitarian Samvel Aghasi Cand. of tech. sci., Institute of Applied Problems of Physics of the National Academy of Sciences of Republic Armenia. Chief engineer of the IAPP, ARU, Assoc. prof. at the Institute of Business and Economics of the PAY, Senior researcher at the IAPP
E-mail -sammkhitar@yahoo.com
- 24** Mnatsakanyan Armine Ruben Institute of Applied Problems of Physics of the National Academy of Sciences of Republic Armenia, Senior engineer at the IAPP
E-mail -sirushrub06@yahoo.com
- 25** Momjyan Arsen Melkon Post-graduate, student, NPUA
E-mail -momjyanarsen@gmail.com
- 26** Ordyan Nune Albert Cand. of tech. sci., Assoc.Prof. of the Chair “Machine Science and Material Processing”, State Pedagogical University of Armenia,
E-mail -nordris@gmail.com
- 27** Petrosyan Gevorg Ludvik Dr. of tech. sci., Prof. of the Chair “Mechanics and Machine Science”, NPUA
E-mail -gevorglp@seua.am
- 28** Petrosyan Hasmik Samson Dr. of tech. sci., Prof. of the Chair, “Metallurgy and Material science”
E-mail -univ70@mail.ru
- 29** Petrosyan Oleg Harutyun Dr. of tech. sci., Prof.,
E-mail -polonc.ru@mail.ru
- 30** Poghosyan Khosrov Vladimir Post-graduate student of the Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA,
E-mail -xosrov92@mail.ru
- 31** Sahakyan Nina Gagik Probationer, Deputy Dean of the Institute of “Mining, Metallurgy and Chemical Technologies”, NPUA,
E-mail - Nina.sahakyan@mail.ru
- 32** Shaljyan David Samvel graduate student, NPUA
E-mail -shaljyan.davit@gmail.com
- 33** Simonyan Sargis Hovhannes Dr. of tech. sci., Prof., Head of the Chair “Information Technologies and Automatization”, NPUA,
E-mail -ssimonyan@seua.am
- 34** Vardanyan Gor Patvakan Cand. of tech. sci., Rector of NPUA,
E-mail - Gor.vardanyan@polytechnic.am
- 35** Yezakyan Narek David Cand. of tech. sci., lecturer at the Chair of Radio devices in NPUA, junior researcher in the “Laboratory of Applied Radiophysics” (Institute of Radiophysics and Electronics of NAS of RA)
E-mail -yezakinarek@gmail.com

«Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի տեղեկագիր. տեխնիկական գիտությունների սերիա» հանդեսում տպագրվում են տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները տեխնիկական գիտությունների հետևյալ բաժիններից՝ մեքենաշինություն, մետալուրգիա, նյութագիտություն, ընդերքօգտագործման տեխնոլոգիաներ, շինարարական կառուցվածքներ, հիդրավլիկա և հիդրոտեխնիկական կառույցներ, էներգետիկա, էլեկտրատեխնիկա, գիտական սարքաշինություն և չափողական տեխնիկա, հաշվողական տեխնիկա և ինֆորմատիկա, ռադիոէլեկտրոնիկա, միկրոէլեկտրոնիկա, լազերային տեխնիկա, ավտոմատացում և կառավարման համակարգեր:

Հանդեսում լուսաբանվում են ակադեմիական և ճյուղային գիտահետազոտական ինստիտուտների, բուհերի, գիտաարտադրական միավորումների և այլ կազմակերպությունների գիտական գործունեության առավել կարևոր արդյունքները:

Հանդեսի հիմնական նպատակն է խթանել գիտատեխնիկական առաջընթացը և նպաստել արտադրության մեջ այդ արդյունքների ներդրմանը:

Հանդեսը նախատեսված է ճարտարագետների, հետազոտողների և գիտնականների լայն շրջանների համար: Լույս է տեսնում երեք ամիսը մեկ անգամ:

В журнале "Известия Национальной академии наук РА и Национального политехнического университета Армении. Серия технических наук" публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований, охватывающих основные разделы технических наук: машиностроение, металлургия, материаловедение, технологии недропользования, строительные конструкции, гидравлика и гидротехнические сооружения, энергетика, электротехника, научное приборостроение и измерительная техника, вычислительная техника и информатика, радиоэлектроника, микроэлектроника, лазерная техника, автоматизация и системы управления.

Журнал является периодическим изданием, освещающим наиболее важные результаты научной деятельности академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов, научно-производственных объединений и др.

Основная цель журнала - пропагандировать фундаментальные и прикладные исследования в области технических наук, способствовать внедрению их результатов и ускорению научно-технического прогресса в производстве.

Журнал рассчитан на широкий круг ученых, исследователей и инженеров. Выходит один раз в три месяца.

The journal "Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences" publishes the results of theoretical and experimental investigations concerning the main branches of technical sciences: mechanical engineering, metallurgy, material science, mining engineering, natura utilization, building constructions, hydraulics and hydrotechnical constructions, power and electrical engineering, scientific instrument making and measuring devices, computer science and informatics, radioelectronics, microelectronics, laser eequipment, automation and control systems.

The journal is a periodical edition that presents the most important results of scientific activities at academic and branch scientific-research institutions, universities, research - industrial companies, etc.

The main task of the journal is the propaganda of fundamental and applied investigations in the field of technical sciences, and the promotion of their introduction and the acceleration of scientific and technological progress in industry.

The journal is intended for a wide range of scientists, researchers and engineers. It is published once in three months.

ՀՈՂՎԱԾՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՆՈՆՆԵՐԸ

Նյութը խմբագրություն ներկայացվում է ըստ հետևյալ պահանջների.

1. Երկու օրինակ, նաև էլեկտրոնային տարբերակով, համակարգչային շարվածքը՝ Microsoft Office Word: Հոդվածի ծավալը կարող է լինել մինչև 10 էջ, հաղորդումներինը՝ մինչև 4 էջ: Տեքստը շարադրվում է A4 չափսի թղթի վրա, աշխատանքային դաշտը՝ Top-5սմ, Bottom-5,1սմ, Left-5,75սմ, Right-1,75սմ, Footer-4,6սմ, միջտողային տարածությունը (Line spacing)՝ 1,1, պարբերությունը (First line)՝ 0,75 սմ: Հայերեն լինելու դեպքում նյութը շարադրվում է Sylfaen տառատեսակով, տառաչափը՝ 10, իսկ ռուսերեն կամ անգլերեն լինելու դեպքում՝ Times New Roman տառատեսակով, տառաչափը՝ 11:

2. Թղթի վերևի ձախ անկյունում գրվում է համապիտանի տասնորդական դարականիշը՝ տեքստին համապատասխան լեզվով (ՀՏԴ, ՄԴԿ, UDC), հաջորդ տողի կենտրոնում՝ գլխատառերով հեղինակ(ներ)ի անվան-հայրանվան սկզբնատառերը և ազգանուն(ներ)ը՝ bold, 10 տառաչափով հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում: Հոդվածի վերնագիրը տրվում է հեղինակի ազգանվանը հաջորդող տողի կենտրոնում՝ bold, ամբողջությամբ գլխատառերով՝ 10 տառաչափով՝ հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

3. Նյութը սկսվում է ամփոփումով (անտասցիա) այն լեզվով, որով ներկայացված է: Ամփոփումն ավարտվում է առանցքային բառերով՝ տառաչափը՝ 9 հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, և միայն «Առանցքային բառեր» արտահայտությունը՝ bold, italic: Ամփոփումը պետք է լինի 500 նիշից ոչ ավելի՝ ներառյալ միջակայքերը, առանցքային բառերը կամ բառակապակցությունները՝ 4-8 բառ:

4. Երաշխավորվում է նյութի շարադրման հետևյալ կարգը. «Ներածություն», որը պետք է համառոտ ներառի հարցի վիճակը, թեմայի արդիականությունը և հետազոտության նպատակը, «Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը», «Հետազոտության արդյունքները», «Եզրակացություն», անհրաժեշտության դեպքում՝ նաև այլ բաժիններ՝ համապատասխան վերնագրերով:

5. Տեքստում հղումները գրականությանը նշվում են ուղղանկյուն փակագծերով: Բանաձևերը ներկայացվում են նոր տողից, Equation Editor ծրագրով, italic, տառաչափը՝ 11, անհրաժեշտության դեպքում համարակալվում են տողի վերջում՝ սովորական (կոր) փակագծի մեջ:

6. Նկարներն ու աղյուսակները հաջորդում են տեքստում համապատասխան հղումներին: «Նկ. » և «Աղյուսակ» բառերը, նկարների մակագրությունը և աղյուսակների անվանումները գրվում են Italic 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

7. Տեքստին հաջորդում է գրականության ցանկը՝ 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, միայն հեղինակի ազգանունն ու անվան-հայրանվան սկզբնատառերը՝ bold, «Գրականության ցանկ» արտահայտությունը՝ տողի կենտրոնում, գլխատառերով: Ցանկում գրականության յուրաքանչյուր աղբյուր համարակալվում է ըստ տեքստում իր հղման հերթականության: Գրականության աղբյուրները պարբերական հրատարակությունների դեպքում ներկայացվում են հետևյալ կարգով. հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հանդեսի անվանումը կամ ընդունված հապավումը, հրատարակման տարեթիվը, հատորի ու թողարկման համարները, հերթական համարը, նյութի գետեղման էջերը, գրքերի դեպքում՝ հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հրատարակման վայրը, հրատարակչությունը, թվականը, էջերի քանակը:

8. Գրականության ցանկին հաջորդում են ամփոփումները մյուս երկու լեզուներով (եթե տեքստը հայերեն է, ամփոփումները նախ՝ ռուսերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե ռուսերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե անգլերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ ռուսերեն): Ամփոփումները բոլոր երեք լեզուներով իրենց բովանդակությամբ և առանցքային բառերով պետք է լինեն նույնական:

9. Տեքստը ստորագրվում է հեղինակ(ներ)ի կողմից, նշվում է նյութը խմբագրություն հանձնելու ամսաթիվը: Տեքստի խմբագրված և սրբագրված տարբերակը համաձայնեցվում է հեղինակ(ներ)ի հետ:

10. Հեղինակ(ներ)ն առանձին էջով ներկայացնում է (են) ազգանուն, անուն, հայրանունը (լրիվ), աշխատավայրի, սովորելու վայրի լրիվ անվանումը, զբաղեցրած պաշտոնը, գիտական աստիճանը, հեռախոսահամարները (աշխատանքային, տան և բջջային):

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Материал представляется в редакцию в соответствии со следующими правилами:

1. Статья в двух экземплярах и файл статьи в формате Microsoft Office Word. Объем статьи не должен превышать 10 страниц, объем сообщений – до 4-х страниц. Формат страницы – А4. Рабочее поле: Top – 5cm, Bottom – 5,1cm, Left – 5,75cm, Right – 1,75cm, Footer – 4,6cm, межстрочный интервал (Line spacing) – 1,1, красная строка (First line) – 0,75cm. Для статьи, написанной на армянском языке, применяется шрифт Sylfaen (размер шрифта - 10), а на русском и английском – Times New Roman (размер шрифта – 11).

2. В левом верхнем углу первого листа указывается универсальный десятичный классификатор (ՀՏԴ, УДК, UDC); строкой ниже - инициалы (И.О.) и фамилия - заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз., выравнивание по центру; строкой ниже по центру указывается название статьи – заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз.

3. Материал текста начинается с аннотации и представляется на том языке, на котором написана статья. Текст аннотации должен состоять не более чем из 500 знаков, включая пробелы. После аннотации пишутся ключевые слова – от 4-х до 8-и слов или словосочетаний. Размер текста аннотации и ключевых слов 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз., словосочетание **“Ключевые слова”** - Bold, italic.

4. Рекомендуется следующий порядок изложения материала статьи: введение, в котором должны быть кратко представлены состояние вопроса, актуальность темы и цель исследования; постановка задачи и обоснование методики; результаты исследования; заключение (эти, а при необходимости, и другие разделы должны иметь соответствующие заголовки).

5. Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках. Формулы и математические выражения набираются редактором Microsoft Equation, italic, размер – 11. Формулы набираются с новой строки, выравнивание по центру. При необходимости, их нумеруют. Номер формулы располагается в конце строки, в круглых скобках.

6. Рисунки и таблицы располагаются в тексте по ходу ссылки на них. Слова *“Рис.”*, *“Таблица”*, а также названия рисунков и таблиц пишутся italic, размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз.

7. В конце статьи дается список литературы: размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз. Словосочетание **“СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ”** располагается в центре строки заглавными буквами, Bold. Цитированная литература нумеруется в порядке ссылки на нее в тексте. Каждый источник представляется в следующем порядке: в случае ссылки на статью из журнала: **фамилия, инициалы И.О.** - Bold, название статьи, название журнала, место издания, год издания, том и номер издания, с какой по какую страницы занимает статья в этом журнале; в случае ссылки на книгу: **фамилия, инициалы И.О.**, название книги, место издания, название издательства, год издания, общее количество страниц.

8. После литературы представляются аннотации вместе с ключевыми словами на двух других языках. Если статья написана на армянском языке, то сначала дается аннотация на русском языке, затем на английском; если написана на русском языке – соответственно на армянском и английском, а если на английском – соответственно на армянском и русском языках. Содержание аннотаций и ключевые слова должны быть на трех языках одинаковыми.

9. Статья подписывается автором (авторами). В конце статьи ставится дата (число, месяц, год) представления статьи. Отредактированный и откорректированный вариант рукописи согласовывается с автором (авторами).

10. На отдельной странице необходимо представить следующие авторские данные: фамилия, имя, отчество; полное наименование места работы, места учебы; занимаемая должность, ученая степень и звание; номера телефонов (служебный, домашний, мобильный).

RULES FOR PREPARATION OF MANUSCRIPTS

The material should be presented to the editorial staff in accordance with the requirements given below.

1. The authors are requested to submit two hard copies, and also the electronic version of the manuscript by Microsoft Office Word. The volume of scientific paper is limited to 10 pages, and to 4 pages for short communications. The text should be printed on A4 sized paper. The text margins should be: Top – 5cm, Bottom – 5.1 cm, Left – 5.75 cm, Right – 1.75 cm, Footer – 4.6 cm, Line-spacing – 1.1 cm, the first line – 0.75 cm. Texts in Armenian should be printed by the Sylfaen, font size 10, and the texts in by Times New Roman, in font size 10 .

2. On the top left corner, the Universal Decimal Classifier is placed in the language of the manuscript (ՀՏԴ, ՄԴԿ, UDC). The initials and the surname(s) in font size 10, bold for texts in Armenian, English and Russian should be in the centre of the next line. The title should be placed in the centre of the line following the author's surname in font size 10, bold, all in capital letters for texts in Armenian, English and Russian.

3. The text begins with an abstract in the language it is presented. It ends with keywords in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for the ones in English and Russian. Only the word “Keywords” should be bold, italic. The summary should not exceed 500 characters including the spaces, the number of keywords or word combinations - 4-8.

4. The papers should include an introduction briefly introducing the state of the problem area, the importance of the subject and the aim of investigation, as well as sections describing the statement of the problem and selection of the methodology, the results of investigation, conclusion (other sections if necessary) with subtitles, and it should end with the list of references.

5. The references in the text should be given in square brackets. The formulae should be introduced by the Microsoft Equation Editor. They should be printed from a new line in italic, font size 11 in the center of the line, and if necessary numbered at the end of the line in round brackets..

6. Figures and tables should follow their references given in the text. The words “Fig”, “Table”, the figure inscriptions and the table names should be printed in italic, in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for texts in English and Russian.

7. The text is followed by the references in font size 9 for texts in Armenian and in font size 10 for texts in English and Russian. Only the author's initials and surname should be bold. The word “References” should be placed in the centre of the line in capital letters. In the list of references, each source should be enumerated according to its reference number in the text. For the periodicals, the references should be introduced in the following style: the author's surname, initials, title, year, numbers of the volume and issue, page numbers, and for books – the authors names, full title, publication place, publisher, year, total number of pages.

8. The references are followed by the abstracts in the other two languages. If the text is in Armenian, the abstracts should be first in Russian and then in English. The text in Russian should be followed first by Armenian and then by English abstracts, while the texts in English should be followed first by Armenian, then by Russian abstracts. The abstracts in all the three languages should be identical in content and keywords.

9. The manuscript should be signed by the author(s) with indication of the submission date. The edited and proofread version of the manuscript should be agreed upon by the author(s).

10. On a separate page, the author(s) should introduce his/her/their full surname(s), name(s), patronymic(s); the full name(s) of employment place, educational institution; the position occupied scientific degree, telephone numbers (office, home, mobile).