

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ  
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ  
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

## Տ Ե Ղ Ե Կ Ա Գ Ի Ր

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 77

N 4 2024

ՀՈԿՏԵՄԲԵՐ - ԴԵԿՏԵՄԲԵՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2025

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И  
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 77

N 4 2024

ОКТАБРЬ - ДЕКАБРЬ

ЕРЕВАН 2025

---

---

## PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 77

N 4 2024

OCTOBER - DECEMBER

YEREVAN 2025

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

**ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈՒԵԳԻԱ**

Գլխավոր խմբագիր՝ Մելիքյան Վ.Շ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Գլխ. խմբագրի տեղակալ՝ Խաչատրյան Ա.Ժ., ֆ.մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Պատասխանատու քարտուղար՝ Մելքանյան 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 Հ.Վ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Բաղդասարյան Ս.Զ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ  
Գռնեյմա Ս., տ.գ.թ., Եգիպտոս  
Գրիմբլաթ Վ., տ.գ.թ., Չիլի  
Դոկիչ Բ., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա  
Ջոքյան Ե., տ.գ.թ., ԱՄՆ  
Իյուշենկո Ա.Ֆ., Բելառուսի ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս  
Լան Չ., 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  
Մանդալիկա Ս., տ.գ.թ., Հնդկաստան  
Մարուխյան Ո.Զ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ  
Միխայլիչ Ա.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս  
Շլիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա  
Չանգ Ֆ., Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան  
Չապլիզին 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  
Մապատենկար Ս., տ.գ.թ., ԱՄՆ  
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 Ռ., Էստոնիայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., Էստոնիա  
Ուսանով Վ.Ի., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

**Заместитель главного редактора Хачатрян А.Ж.**, д.ф.-м.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

**Асламян 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

**Воробьев А.Е.**, д.т.н., проф., Россия

**Гонейма М.**, к.т.н., Египет

**Гримблат В.**, к.т.н., Чили

**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

**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

## EDITORIAL BOARD

**Editor-in-Chief: Melikyan V.Sh.**, Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia  
**Deputy Editor-in-Chief: Khachatran A.Zh.**, Dr. of Phys-math Sci., 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  
**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  
**Ghoneima M.**, Ph.Dr., Egypt  
**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  
**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), 2024

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Հ.Վ. ԱՎԱԳՅԱՆ, Տ.Ս. ԱՂԱՄՅԱՆ

**ՊՂՆՁԻ ՕՔՍԻԴԱՅԱԾ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԵՐԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑԻՑ ՊՂՆՁԻ ԿՈՐՁՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ՝ ՍՈՒԼՖԻԴԱՅՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

Պղնձի դժվար հարստացվող, օքսիդացած և խառը հանքաքարերի վերամշակման մեթոդների վերլուծության հիման վրա աշխատանքում առաջարկվում է ծծումբ պարունակող սիլիցումի սուլֆիդի և նատրիումի թիոկոմպլեքսի առկայությամբ օքսիդացած պղնձային հանքաքարերի հիդրոջերմային սուլֆիդացման և մանրացման գործընթացների համատեղում: Բազմաթիվ սուլֆիդարարներից մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում ջրում հիդրոլիզվող և սուլֆիդացնող նյութերը, որոնք աղացում մեխանակտիվացման ժամանակ առաջացնում են պղնձի կայուն սուլֆիդներ՝ թթվայինից մինչև չեզոք միջավայրերում: Գործընթացը կարելի է իրականացնել սովորական գնդաղացներում մինչև 373 Կ ջերմաստիճանում՝ ստացվող արգասիքի հետագա ֆլոտացմամբ:

Հետազոտվել են սիլիցիումի սուլֆիդի և նատրիումի թիոկոմպլեքսի ու պղնձի օքսիդացած միներալների (ազուրիտ, մալախիտ, կուպրիտ, տենորիտ) փոխազդեցության ռեակցիաները: Ապացուցվել է ցածր ջերմաստիճաններում սիլիցիումի սուլֆիդի և նատրիումի թիոկոմպլեքսի բարձր ռեակցիոն ունակությունը, որը թույլ է տալիս աղացման գործընթացում իրականացնել պղնձի օքսիդացած միներալների մակերևույթների խոր սուլֆիդացում: Ցույց է տրված, որ պղնձի օքսիդացած միներալների սուլֆիդացման գործընթացի վրա ազդում են ջերմաստիճանը, տևողությունը, սուլֆիդարարի ծախսը, ինչպես նաև հանքանյութերի մանրացման աստիճանը: Գործընթացի տևողության և սուլֆիդարարի ծախսի ավելացումը բարձրացնում է օքսիդացած միներալների սուլֆիդացման աստիճանը: Ցույց է տրված, որ պղնձի օքսիդացած միներալների սուլֆիդացումը սիլիցիումի սուլֆիդով կամ նատրիումի թիոկոմպլեքսով դանդաղում է միներալների մակերևույթին սուլֆիդային թաղանթների առաջացման հետևանքով: Այդ գործընթացում նկատվում է ներքին դիֆուզիայի դիմադրության աճ, քանի որ գործընթացը տեղի է ունենում սիլիցիումի սուլֆիդի կամ նատրիումի թիոկոմպլեքսի մասնակցությամբ դիֆուզիայով առաջացած սուլֆիդային (Cu<sub>2</sub>S) թաղանթի միջով: Դրա հետևանքով գործընթացի արագությունը մեծանում է, և ավելանում է սուլֆիդացված պղնձի մասնաբաժինը: Այսպիսով, սուլֆիդացման ռեակցիայի արագությունը որոշվում է մակերևույթների առաջացման արագությամբ: Սուլֆիդացման գործընթացը պինդ ֆազային տիպական ռեակցիա է, որը սկսվում է միներալների հատիկների մանրացումով:

**Առանցքային բառեր.** պղնձ, օքսիդ, միներալ, գնդաղաց, մանրացում, մեխանաքիմիական ակտիվացում, սուլֆիդացում, թերմոդինամիկա, ֆլոտացիա, էլանյութ, արգասիք:

**Ներածություն:** Հայաստանի Հանրապետությունում պղնձային հումքի համալիր վերամշակումը հանքարդյունաբերության և մետալուրգիայի զարգացման կարևոր ուղղություններից է: Այն հնարավորություն կտա հումքի ավելի արդյունավետ օգտագործում, պղնձի կորզման աստիճանի բարձրացում, բնապահպանական նորմերի պահպանում, արտադրական գործընթացների լավարկում, միջազգային ստանդարտներին բավարարող արտադրանքի ստացում և այլն: Այս խնդիրների հիմքում ընկած է նորագույն և առավել արդյունավետ տեխնոլոգիաների մշակումը և ներդրումը: Պղնձի արտադրության կազմակերպումը հանրապետությունում կապված է որոշակի դժվարությունների հետ, քանի որ չկան ջրային և էներգետիկ պաշարներ, ինչպես նաև տնտեսական պայմաններ:

Ներկայումս Հայաստանի Հանրապետության հարստացուցիչ ֆաբրիկաներն արտադրում են 24...25% պղնձի պարունակությամբ խտանյութեր, որոնցից պղնձի կորզման ավանդական մշակման եղանակները հաճախ դառնում են անկիրառելի՝ հատկապես, երբ պղնձի կորզումը կատարվում է միայն սուլֆիդային հանքանյութերից՝ ֆլոտացման եղանակով:

Օքսիդացած և խառը պղնձային հանքանյութերը չեն հարստացվում: Իսկ ՀՀ հանքարդյունաբերությունում պղնձի հումքի զգալի մասը պարունակում է խառը և օքսիդացած միներալներ, որոնք դժվար հարստացվող են: Ուստի հանքավայրերի հանքահումքային պաշարների զգալի մասը հարստացման չենթարկվելու պատճառով չի օգտագործվում: Միաժամանակ, գործող տեխնոլոգիաները դժվար հարստացվող, օքսիդացած, խառը և ոչ կոնդիցիոն հանքաքարի առումով չեն ապահովում դրա հարստացումը, որն անցնում է թափոնային պոչեր: Դեռևս մնում է չլուծված SO<sub>2</sub>-ի կորզման հարցերը, որոնք կապված են բնապահպանական դժվարությունների հետ: Գործող եղանակով կորզվում է միայն պղինձը, այնինչ երկաթը, որի պարունակությունը այդ խտանյութերում կազմում է 25...30%, արտանետվում է թափոնների տեսքով:

ՀՀ թափոնային պահեստարաններում արդեն կուտակվել են ~400 մլն տոննա թափոնակույտային պոչանքներ՝ պղնձի մոտավորապես 0,12% միջին պարունակությամբ: Այդ քանակությունը անընդհատ ավելանում է, և շրջակա միջավայրի պաշտպանության տեսակետից կարելի է համարել աղետ: Նշված խնդիրը խիստ արդիական է բոլոր հանքավայրերի առումով:

Մետալուրգիական գործընթացներում արդեն մշակվում է նոր ուղղություն, որի համաձայն խտանյութերի մշակումը կատարվում է մեխանաքիմիական և մետաղաթերմային վերականգնման եղանակների զուգակցմամբ [1-3]: Այս դեպքում տեղի է ունենում օքսիդավերականգնման գործընթացների ինտեսիվացում և սկզբունքային նոր մոդիֆիկացիաներով նյութերի ստացում: Մեխանիկական ակտիվացումը մեծացնում է նյութի մանրացման աստիճանը, մակերևութային

էներգիան: Առաջացնում է բյուրեղային ցանցի աղավաղումներ: Պինդ նյութերի ռեակցիոն կարողությունները մեծանում են, որն էլ նպաստում է քիմիական ռեակցիայի արագությանը:

Շատ մանր վիճակում նյութերը ենթարկվում են սկզբունքային նոր փոփոխությունների: Վերջինս պայմանավորված է խտացված վիճակի ֆիզիկական առանձնահատկություններով, տարրերի յուրահատուկ կազմով, կապերի ձևով, ֆիզիկական հատկանիշների փոփոխմամբ և այլն [4-7]:

Թեղուտի հանքավայրում օքսիդացած ապարների գոտին կազմում է մոտավորապես 250 հեկտար մակերեսով և 70 *ւ* խորությամբ զանգված՝ համեմատաբար հարուստ հանքայնացմամբ, որի վերամշակման խնդիրն առաջնային է:

Հեռանկարային են համարվում այն գործընթացները, որոնք նպաստում են պղնձի օքսիդային ձևի (օքսիդներ, կարբոնատներ, սուլֆատներ և այլն) փոխակերպմանը հեշտ ֆլոտացվող սուլֆիդների: Միներալների մակերևույթները սուլֆիդացնող առկա եղանակները չեն ապահովում անհրաժեշտ արդյունավետություն, քանի որ սուլֆիդային թաղանթներն առաջանում են հիմնային միջավայրում, անկայուն են և հեշտությամբ քայքայվում են ֆլոտացման ընթացքում: Դա է պատճառը, որ հիմնախնդրի արդյունավետ լուծում է համարվում հանքաքարի արժեքավոր բաղադրիչների միներալաբանական բաղադրության փոփոխումը՝ կիրառելով հանքաքարի մանրացման գործընթացը:

Պղնձային դժվար հարստացվող, օքսիդացված և խառը հանքաքարի վերամշակման մեթոդների ուսումնասիրությունը ներկայումս գունավոր մետալուրգիայի գիտատեխնիկական կարևոր հիմնախնդիրներից է, քանի որ ավանդական մեթոդների կիրառումը պահանջվող տեխնոլոգիական և տնտեսական բավարար ցուցանիշներ չի ապահովում: Ուստի անհրաժեշտ է մշակել նոր տեխնոլոգիական մեթոդներ և սխեմաներ՝ օքսիդացած և խառը հանքանյութերի հարստացման համար, որը խիստ արդիական խնդիր է:

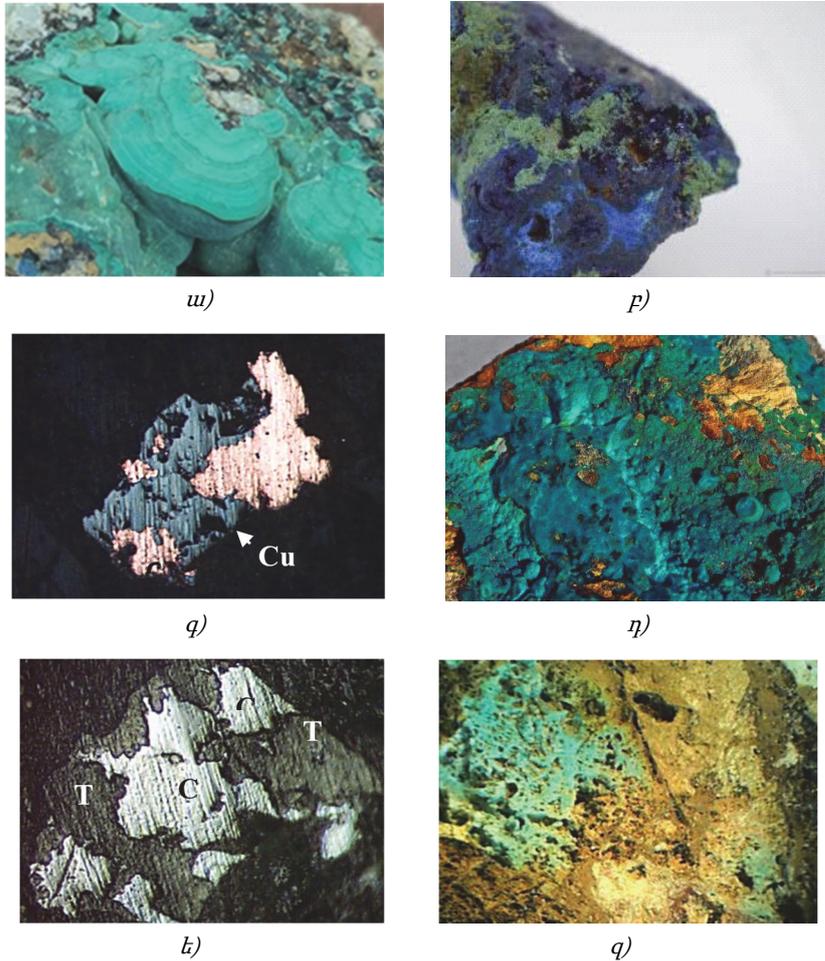
Ելնելով վերոնշյալից՝ աշխատանքի նպատակն է ուսումնասիրել պղնձի օքսիդացած հանքանյութերը և դրանցից պղնձի կորզման առանձնահատկությունները՝ սուլֆիդացման մեթոդի կիրառմամբ:

**Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը:** Դժվար հարստացվող, օքսիդացած և խառը հանքանյութերի, հանքամնացուկների և թափոնակույտային խարամների վերամշակման տարածված եղանակներից են անմիջական ֆլոտացումը, Մոստովիչի, սորբցիա-ֆլոտացման, սեգրեգացնող թրծման, կենսատեխնոլոգիական և կոմբինացված տեխնոլոգիաները: Ամենատարածվածներից է ծծմբական թթվով տարրալուծման մեթոդը: Քիմիական տարրալուծման ( $H_2SO_4$  և այլ նյութեր) եղանակները պահանջում են մեծաքանակ թանկ և ազդեցիվ ազդանյութեր, ինչպես նաև կոռոզիակայուն սարքավորումներ: Այս մեթոդները կիրառելի չեն

տեղական հանքանյութերի վերամշակման դեպքում: Առավել հեռանկարային են այն գործընթացները, որոնք ուղղված են պղնձի օքսիդային ձևի (օքսիդներ, կարբոնատներ, սուլֆատներ և այլն) փոխակերպմանը հեշտ ֆլոտացվող սուլֆիդների: Միներալների մակերևույթները սուլֆիդացնող առկա եղանակները չեն ապահովում անհրաժեշտ արդյունավետություն, քանի որ սուլֆիդային թաղանթներն առաջանում են հիմնային միջավայրում, անկայուն են և հեշտությամբ քայքայվում են ֆլոտացման ընթացքում: Այս հիմնախնդրի ամենաարդյունավետ լուծումը հանքաքարի արժեքավոր բաղադրիչների միներալոգիական բաղադրության փոփոխումն է՝ ֆլոտացման հասկությունների լավացման նպատակով, օքսիդացած միներալների մակերևույթների խոր սուլֆիդացման միջոցով, հանքաքարի մանրացման գործընթացում՝ օգտագործելով  $SiS_2$ ,  $Na_2S$ ,  $Na_2[SiS_3]$  կամ այլ սուլֆիդային համակարգեր:

Ֆլոտացիան գունավոր և հազվագյուտ մետաղների հանքանյութերի հարստացման հիմնական և որոշիչ գործընթացն է: Ֆլոտացման ընթացքում մետաղի կորստի կեսից ավելին պայմանավորված է օքսիդացված հանքանյութերի առկայությամբ: Մասնավորապես, պղնձի կորստի մասնաբաժինը կազմում է ~13 զանգվ. %: Բարդ միներալոգիական կազմ ունեցող հանքաքարերը չեն կարող մշակվել հարստացման պարզ եղանակներով, ուստի պետք է կիրառել համակցված տեխնոլոգիաներ, որոնք հնարավորություն կտան դժվար հարստացվող բազմամետաղային հանքանյութերը ներառել մշակման գործընթացում:

Օքսիդացած հումքի հարստացման դեպքում, որն ավանդական մեթոդներով չի վերամշակվում, անհրաժեշտ է հաշվի առնել ինչպես հանքաքարի բաղադրությունը, այնպես էլ դատարկ ապարների բաղադրիչների ֆիզիկաքիմիական և տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները [8]: Թեղուտի հանքավայրի օքսիդացած գոտու պղնձի միներալներն են մալախիտը ( $Cu(OH)_2[CO_3]$ ), ազուրիտը ( $Cu(OH)_2[CO_3]_2$ ), տենորիտը ( $CuO$ ), կուպրիտը ( $Cu_2O$ ), խրիզոկոլան ( $Cu(OH)_2.Si_4O_{10}.nH_2O$ ) և սահմանափակ տեղամասերում փիրուզը ( $CuAl_6(OH)_8[PO_4]_4.4H_2O$ ) (նկ. 1): Այդպիսի հանքանյութն ավանդական մեթոդներով վերամշակելը գործնականում շատ դժվար է:



Նկ. 1. Թեղուտի հանքավայրի օքսիդացված գոտու հանքաքարերի միներալների մակրոկառուցվածքը. ա- մալախիտ (x10), բ- ազուրիտ (x50), գ- կուպրիտ (x400), դ- խրիզոկոլա (x50), ե- տենորիտ (x400), զ- փիրուզ (x6)

[8-10] աշխատանքներում առաջարկվել են մեծ թվով տարբեր ֆլոտատեագենտներ՝ ֆլոտացիայով օքսիդացած հանքանյութերի հարստացման ցուցանիշները բարձրացնելու համար, որոնք, սակայն, արտադրական պայմաններում այնքան էլ արդյունավետ չեն, քանի որ պահանջում են pH-ի փոքր միջակայքի պահպանում և այդ պարամետրերի խիստ վերահսկողություն:

Ֆլոտացման մեթոդների արդյունավետության ոչ բավարար լինելու պատճառով մեծ կիրառություն են ստացել համակցված գործընթացները, որոնցից գործնականում կիրառվում են միայն «տարրալուծում-նստեցում-ֆլոտացում» գործընթացը և «սորբցիա առանց ֆիլտրման» տեխնոլոգիաները [8, 11, 12]: Այդ գործըն-

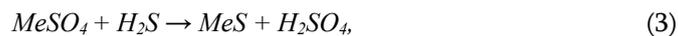
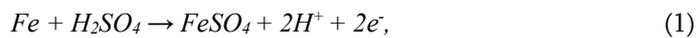
թացների իրականացումը կապված է էական դժվարությունների հետ, քանի որ պահանջվում են հատուկ և թանկ սարքավորումներ, ինչպես նաև շրջակա միջավայրի համար պարունակում են բնապահպանական ռիսկեր:

Պղնձի հանքանյութերի սուլֆիդացման համար օգտագործում են ծծմբի հիմքով միացություններ: Ծծումբ պարունակող ցանկացած մոդիֆիկատոր ձևավորում է խլուսի հեղուկ ֆազի ոչ միանման խոնային կազմ, որի կայունությունը որոշվում է միաջավայրի pH-ի արժեքով, մոդիֆիկատորի կոնցենտրացիայով, հանքանյութերի բազմազանությամբ, խլուսի ջերմաստիճանով:

Նատրիումի սուլֆիդով սուլֆիդացման դեպքում օքսիդացած պղնձի հանքանյութերի մակերևույթին առաջանում է սուլֆիդային թաղանթ, որն իր կառուցվածքով ու հատկություններով համապատասխանում է կովելինին: Թաղանթը փխրուն է և անկայուն: Սուլֆիդային թաղանթի ամրությունն աճում է ամոնիումի աղերի (ամոնիումի սուլֆատ) և մագնեզիումի հեքսամետաքլորիդի ավելացման դեպքում [13]:

Աշխատանք [14]-ում կիրառվել են պղնձի օքսիդացած հանքաքարի սուլֆիդացման սկզբունքորեն նոր՝ էլեկտրաքիմիական, մեթոդներ: Առաջարկվել է սուլֆիդացման երկու տարբերակ: Առաջին՝ առանց սուլֆիդարարի ներմուծման, որի դեպքում գործընթացն իրականացվում է հանքաքարում պարունակվող ծծմբի հաշվին: Երկրորդ՝ նատրիումի սուլֆիդի ներմուծմամբ, երբ հանքաքարը պարունակում է քիչ քանակությամբ ծծումբ: Էլեկտրաքիմիական սուլֆիդացման օպտիմալ պայմաններում պղնձի կորզման ելքը խտանյութում կազմում է 30...40%: Օքսիդացած պղնձային հանքանյութերի սուլֆիդացումը մանրացման ժամանակ թույլ է տալիս տարրական ծծմբի հետ փոխազդեցության ջերմաստիճանը հասցնել մինչև 80°C-ի, ինչպես նաև բարձրացնել սուլֆիդային թաղանթի ամրությունը: Օքսիդացած պղնձային հանքանյութի սուլֆիդացման գործընթացում, բացի տարրական ծծմբի կիրառումից, քննարկվել է նաև այլ սուլֆիդարարների՝ պիրիտի, նատրիումի պոլիսուլֆիդի և ամոնիումի օգտագործման հարցը: Սուլֆիդացման գործընթացի առավելագույն արդյունավետության հասնում են ակտիվացված ծծմբի և էլեկտրաակտիվացված ամոնիումի պոլիսուլֆիդի կիրառմամբ: Սուլֆիդացման և մանրացման գործընթացների համատեղումը թույլ է տալիս բարձրացնել պղնձ-ի կորզման ելքը ֆլոտացիայից հետո՝ 10...20%: [15] աշխատանքի հեղինակներն այն բացատրում են pH-ի փոքրացմամբ, որն արագացնում է սուլֆիդների առաջացումը: Տարրական ծծմբով և մետաղական երկաթով ծծմբաթթվային լուծույթներում ծանր գունավոր մետաղների սուլֆիդացման մեխանիզմի բացահայտման համար Ա.Լ. Մադիգինի և Վ.Ա. Կուկոնի կողմից կատարվել են ուսումնասիրություններ [16], որոնց հիման վրա հաստատվել է, որ սուլֆիդացման գործընթացը տեղի է ունենում S<sup>2-</sup>-իոնների հաշվին, որոնք ստացվում են տարրական ծծմբով և ատոմական

ջրածնով վերականգնման միջոցով՝ ծծմբի և երկաթի մասնիկների սերտ կոնտակտի պայմաններում: Հեղինակների կարծիքով՝ սուլֆատային լուծույթներից սուլֆիդների նստեցումը կատարվում է հետևյալ ռեակցիաներով՝



որտեղ Me-ը Cu, Ni, Co է:

Ռեազենտ-նստեցուցիչի՝ Na<sub>2</sub>S-ի նվազագույն ավելցուկի առկայությունը պինդ ֆազում գործնականում ամբողջությամբ սահմանափակում է հակառակ ռեակցիայի ընթացքը՝ ձևավորված սուլֆիդների լուծվելը: Այդ դեպքում, երբ սուլֆիդների նստեցումն ընթանում է երկաթային խյուսում, տեղի է ունենում հետևյալ փոխազդեցությունը՝



Առաջացած երկաթի սուլֆիդները մասնակի նստեցնում են գունավոր մետաղները:

Աշխատանք [17]–ում մշակվել է քիմիական հարստացման մեթոդ, որը ներառում է օքսիդացած պղնձային հանքանյութերի սուլֆիդացումը նատրիումի պոլիսուլֆիդների ջրային լուծույթներով 353...368 Կ ջերմաստիճանում:

Հայտնի է ծծմբաջրածնով սուլֆիդացման մեթոդը, որը կիրառվում է Մոս Բեյ (Կուբա) և Շերիտ Գորդոն (Կանադա) գործարաններում [18, 19]: Տարրալուծման լուծույթների մաքրումը կատարվում է ծծմբաջրածնով՝ պղնձի սուլֆիդացման համար ստեխիոմետրական անհրաժեշտ քանակով և կապարի համար 10% ավելցուկով [20, 21]: Հաստատված է, որ ծծմբաջրածնով մետաղների նստեցման խորությունը կախված է համապատասխան սուլֆիդների լուծելիությունից, որն իր հերթին ուղիղ համեմատական կախվածություն ունի ծծմբական թթվի կոնցենտրացիայից և հակադարձ համեմատական՝ ծծմբաջրածնի ճնշումից ու ջերմաստիճանից: Նստեցման գումարային ռեակցիան ունի հետևյալ տեսքը.



Հիմնային միջավայրում պղնձի սուլֆիդացման մեթոդներից կարելի է նշել պղնձի սիլիկատային հանքանյութերի, ջրում լուծելի սուլֆիդարարի՝ սուլֆիդների և տարրական ծծմբի խառնուրդի միաժամանակյա ավտոկլավային տարրալուծումը: Գործընթացն ընթանում է 433...453 Կ ջերմաստիճանում, նատրիումի հիդրօքսիդի

160 կգ/մ<sup>3</sup> լուծույթում, 1...1,5 ժամ տեկտություն: Պղնձի օքսիդացած հանքանյութերի փոխազդեցությունը նատրիումի սուլֆիդների հետ հիմնային միջավայրում սխեմատիկորեն կարելի է պատկերել հետևյալ ռեակցիայով՝



Միլիկատահիմնային լուծույթի անջատումից և սորախցուկի լվացումից հետո, մինչև pH=9...10, պղնձի սուլֆիդները կորզվում են ֆլոտացիայով: Չնայած նրան, որ տվյալ տեխնոլոգիան ապահովում է բարձր ցուցանիշներ, ինչպես կորզման (90...94%), այնպես էլ խտանյութում պղնձի պարունակության (20...25%) տեսանկյունից, սակայն արդյունաբերության մեջ դրա կիրառումը դժվար է՝ բարդ տեխնոլոգիական սխեմայի, թանկ ռեագենտների և ֆիլտրման ցածր արագության պատճառով: Այն հետևանք է ստացված խլուսի բարձր խտության և մածուցիկության, ինչպես նաև NaOH-ի ռեզեներացիայի հիմնախնդիրների առկայության [22]:

Աշխատանք [23]-ում առաջարկվում է հիմնային լուծույթներով տարրալուծել և միաժամանակ օքսիդացած պղինձը տարրական ծծմբով սուլֆիդացնել այնպիսի հանքաքարերի դեպքում, որոնց ապարային հիմքը կազմված է թթվատարողունակ միացություններից: Սուլֆիդացումը կատարվել է 413 Գ ջերմաստիճանում, լուծույթի կոնցենտրացիան՝ NH<sub>3</sub>- 85 կգ/մ<sup>3</sup>, CO<sub>2</sub> - 55 կգ/մ<sup>3</sup>: Ծծմբի ծախսը 1,3...1,5 անգամ ավելի է, քան հանքաքարում օքսիդացած պղնձի քանակությունը, գործընթացի տևողությունը երկու ժամ է: Ստացվել է 30%-անոց պղնձի խտանյութ՝ 90,2% կորզման ելքով: Գործընթացը նախկինից տարբերվում է ավելի մեղմ ջերմաստիճանային ու ցածր հիմնայնության պայմաններով:

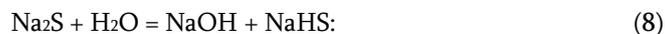
Առավել հեռանկարային են այն գործընթացները, որոնք ուղղված են գունավոր մետաղների օքսիդային ձևի (օքսիդներ, կարբոնատներ, սուլֆատներ, մոլիբդատներ և այլն) փոխակերպմանը հեշտ ֆլոտացվող սուլֆիդների:

Այսպիսով, գրականության վերլուծությունից բխում է, որ օքսիդացած պղնձային հումքի համար վերամշակման ամենաարդյունավետ միջոցներից է հանքաքարի մանրացման փուլում նախնական սուլֆիդացման գործընթացը:

**Հետազոտության արդյունքները:** Միներալների մակերևույթները սուլֆիդացնող առկա եղանակները չեն ապահովում անհրաժեշտ արդյունավետություն, քանի որ առաջացած սուլֆիդային թաղանթները հեշտությամբ քայքայվում են ֆլոտացման ընթացքում: Ուստի տվյալ հիմնախնդրի ամենաարդյունավետ լուծումը հանքաքարի արժեքավոր բաղադրիչների միներալաբանական բաղադրության փոփոխումն է՝ ֆլոտացման հասկությունների լավացման նպատակով, օքսիդացած միներալի մակերևույթի խոր սուլֆիդացման միջոցով, հանքաքարի մանրացման գործընթացում օգտագործելով SiS<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>S, (Na<sub>2</sub>S-SiS<sub>2</sub>) սուլֆիդային համակարգեր:

Միներալների մակերևույթները սուլֆիդացնող առկա եղանակները չեն ապահովում անհաժեշտ արդյունավետություն, քանի որ օգտագործվում են սուլֆիդարարներ, որոնք ջրային միջավայրում առաջացնում են հիմնային ռեակցիա ( $\text{Na}_2\text{S}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_n$ ,  $\text{BaS}$ ,  $\text{CaS}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_n$  և այլն), և սուլֆիդային թաղանթներն առաջանում են հիմնային միջավայրում, որտեղ սուլֆիդներն անկայուն են և հեշտությամբ քայքայվում են ֆլուտացման գործընթացում: Օքսիդացած հանքանյութերի սուլֆիդացման համար բարձր կոնցենտրացիայով նատրիումի սուլֆիդի օգտագործումը հանգեցնում է խլուսի pH-ի կտրուկ աճին, որը բացատրվում է երկու պատճառով. առաջին՝ բարձր հիմնայնության հետևանքով առաջանում են մետաղների օքսիդների հիդրատներ, որոնց կատիոնները կարող են մտնել խլուսի մեջ հենց հանքաքարից: Դրանք կարող են ընկնել խլուսի մեջ ջրի կամ ռեազենտների միջոցով: Այդ հիդրօքսիդները ոչ ընտրողաբար նստում են օգտակար միներալների մասնիկների և դատարկ ապարների վրա և դրանով վատացնում առանձնացման պայմանները: Երկրորդ՝ pH-ի բարձր արժեքների դեպքում նատրիումի սուլֆիդն ունի պեպտիզացնող հատկություններ, ինչը հանգեցնում է կոլոիդային սուլֆիդների ձևավորմանը, որը չի կաշում օքսիդացած միներալների մակերևույթին և վատացնում է դրանց սուլֆիդացման գործընթացը:

$\text{Na}_2\text{S}$ -ի ջրային լուծույթները հիդրոլիզի հետևանքով առաջացնում են ուժեղ հիմնային ռեակցիա.



$\text{Na}_2\text{S}$ -ի 0,1 նորմալ լուծույթի հիդրոլիզի աստիճանը  $25^\circ\text{C}$ -ում կազմում է 86,5%: Հաջորդ  $\text{NaHS} + \text{H}_2\text{O} = \text{NaOH} + \text{H}_2\text{S}$  ռեակցիան սովորական պայմաններում չի ընթանում: 0,1 նորմալ  $\text{NaHS}$ -ի լուծույթը  $25^\circ\text{C}$ -ում հիդրոլիզվում է միայն 0,12%-ով [24]:

Տաքացնելիս  $\text{NaHS}$ -ի լուծույթից անջատվում է ծծմբաջրածին.

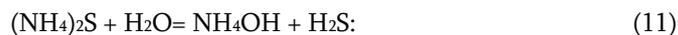


Ամոնիումի սուլֆիդը կայուն է  $15^\circ\text{C}$ -ից ցածր ջերմաստիճաններում և քայքայվում է դրանից բարձր ջերմաստիճաններում.

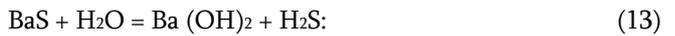
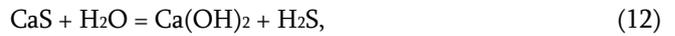


$\text{NH}_3$  և  $\text{H}_2\text{S}$ -ի փոխազդեցության դեպքում առանց սառեցման առաջանում է  $\text{NH}_4\text{HS}$ -ը, որը կայուն է մինչև  $\sim 32^\circ\text{C}$  ջերմաստիճանը:

$(\text{NH}_4)_2\text{S}$ -ը ջրում հիդրոլիզվում է՝ առաջացնելով ծծմբաջրածին, և ունի հիմնային ռեակցիա: Մեկ մոլ լուծույթի pH-ը 9,3 է.



CaS-ը և BaS-ը նույնպես ջրում հիդրոլիզվում են և առաջացնում հիմնային ռեակցիա.



Վերամշակվող պղնձի օքսիդացած հանքանյութերում, մետաղների բաղադրամասերի քանակների փոքրացման պայմաններում, կիրառվող տեխնոլոգիական գործընթացների համար չափանիշներ են տեխնոլոգիայի պարզությունը, հոսքայնությունը և իրականացման չափավոր պարամետրերը (ջերմաստիճան, տևողություն, ռեագենտների և էներգետիկ ծախսեր): Մեխանիկական ակտիվացման էֆեկտի հաշվին կարելի է օքսիդացած պղնձային հանքանյութերի ձևափոխման էներգետիկ ծախսերը հասցնել նվազագույնի:

Մանրացման ընթացքում, երբ տեղի է ունենում հանքանյութի մեխանիկական ակտիվացում, մեխանիկական ուժերի ազդեցությամբ կատարվում է միներալների էներգետիկ վիճակի, ֆիզիկական ու քիմիական հատկությունների փոփոխություն, ընդ որում, էներգետիկ վիճակի փոփոխությունը վերաբերում է հետերոֆազ համակարգերին, որի պինդ բաղադրիչները ենթարկվում են մեխանիկական ազդեցության: Հանքանյութերի ֆիզիկական և ֆիզիկաքիմիական հատկություններն ավելի շատ կախված են բյուրեղավանդակում արատների տեսակից ու կոնցենտրացիայից, քան բաղադրությունից և կառուցվածքից:

Ինչպես երևում է [25] աշխատանքից, մանրացման ժամանակ պինդ մարմնի վրա մեխանիկական ազդեցություն են հարվածներն ու շփումը, որոնք առաջացնում են հետևյալ երևույթները.

- հարուցվում են լայն միջակայքով էլեկտրամագնիսական ալիքներ, այդ թվում՝ ձայնային ու լուսային,
- առաջանում է ջերմություն՝ տաքացնելով մանրացված նյութը,
- խթանվում է էլեկտրոնների էմիսիան, և առաջանում է պոտենցիալների տարբերություն,
- խախտվում է նյութի ամբողջականությունը, և մեծանում է նրա ազատ մակերևույթը,
- առաջանում են առանձգական դեֆորմացիաներ. հետևաբար՝ նյութը, ենթարկվելով մեխանիկական ուժերի ազդեցությանը, ինչ-որ ժամանակ պարունակում է «ավելցուկային» էներգիայի պաշար,
- մանրացված նյութերում քայքայվում են քիմիական կապերը (մեխանոլիզ, մեխանակրեկինգ և այլն). այդ դեպքում առաջացած և չկոմպենսացված քիմիական կապերը կամ ազատ ռադիկալները պարունակում են «ավելցուկային» էներգիայի պաշարներ:

Նշված երևույթների հետևանքով պինդ նյութերը ձեռք են բերում ռեակցիոն մեծ կարողություն, արագացված քիմիական փոխազդեցություն ինչպես պինդ ֆազային, այնպես էլ պինդ ու հեղուկ բաղադրիչների միջև, որը և հնարավորություն է տալիս ճիշտ ընտրել մեխանաակտիվացման մեխանիզմի տեսակը:

Մանրացման համար հայտնի բոլոր մեքենաներից ամենատարածվածը թմբուկային աղացներն են, որոնցում գնդերի հարվածը որոշվում է բնական գրավիտացիոն ուժով: Չնայած նրան, որ թմբուկային աղացները գերմանր աղացման համար չեն նախատեսված, սակայն նուրբ մանրացման հասնում են կասկադային ռեժիմի կիրառմամբ և քերամաշման ազդեցության գերակշռությամբ ու շփող գնդերի մակերևույթների փոքրացմամբ: Ակտիվացման նպատակով արդյունավետ է նաև գերկրիտիկական ռեժիմը: Նուրբ մանրացման ու մեխանիկական ակտիվացման նպատակով լայն տարածում են գտել թրթռային ու շիթային աղացները [25-27]:

Օգտագործվում են նաև կենտրոնախույս-մոլորակային աղացները, որոնց հիմնական առավելություններն են՝ պտույտների կրիտիկական թվի ավելացման հնարավորությունը, կոմպակտությունը, ինչպես նաև քիչ մետաղատարությունը և տեղակայանքի շարժունակությունը:

Մեխանիկական ակտիվացումը բնութագրվում է մեխանիկական ուժերի ազդեցության տակ համակարգի ազատ էներգիայի փոփոխությամբ, որը կարելի է արտահայտել հետևյալ տեսքով [25].

$$G_{\text{ակտ}} = G_{\text{մակ}} + G_{\text{դեֆ}}, \quad (14)$$

որտեղ  $G_{\text{ակտ}}$ -ն մանրացման ընթացքում ազատ էներգիայի փոփոխությունն է,  $G_{\text{մակ}}$ -ն՝ մանրացման ընթացքում մակենտությամբ էներգիայի փոփոխությունը,  $G_{\text{դեֆ}}$ -ն՝ ներքին էներգիայի փոփոխությունը՝ ի հաշիվ դեֆորմացիայի ու մասամբ բյուրեղավանդակի քայքայման: Վերը նշված բոլոր օրինաչափություններն ավելի լրիվ ու հստակ արտահայտվում են նյութի նուրբ մանրացման դեպքում:

Տեխնոլոգիական շատ գործընթացների հիմքում ընկած են հետերոգեն քիմիական ռեակցիաները, որոնք ընթանում են ֆազերի բաժանման սահմանում: Փոխազդեցության այդ տեսակին է պատկանում հիդրոթերմալ սուլֆիդացման գործընթացը: Հայտնի է, որ նոր պինդ ֆազի առաջացմամբ ընթացող ռեակցիաների կինետիկական սովորաբար բարդանում է նրանով, որ նոր առաջացած պինդ նորագոյացությունները դժվարացնում են ռեագենտների մուտքը չփոխազդված տիրույթ: Մանրացման պայմաններում նման փոխազդեցությունների անցկացման դեպքում, երբ մանրացվող պինդ մարմնի բաղադրիչների մակերևույթը անընդհատ նորանում է ռեակցիայի արգասիքների հեռացումով, ռեակցիայի արագությունը չի սահմանափակվում դիֆուզիոն գործընթացներով և նկարագրվում է պարզ գծային հավասարումներով:

Տարրական ծծմբով ծանր գունավոր մետաղների օքսիդացած հանքանյութերի հիդրոթերմալ սուլֆիդացման համար պարտադիր պայման է փոխազդող նյութերի անմիջական շփումը, որը պահանջում է խառնուրդներում բաղադրիչների հավասարաչափ բաշխում: Նյութերի այդ աստիճանի խառնվելու տեխնիկական միջոց կարող են հանդիսանալ աղացները: Սուլֆիդացման ու մանրացման գործընթացների համակցմանը նպաստում է նաև այն, որ մեխանաակտիվացման էներգիայի ազդեցության առավելագույն էֆեկտ կարելի է սպասել, երբ այն անջատվում է փոխազդող նյութերի անմիջական շփման պահին:

[28] աշխատանքի հեղինակների կողմից առաջարկվում է փոխազդեցության հետևյալ հաջորդականությունը, երբ  $H_2S$ -ը առաջանում է տարրական ծծմբով մանրացման դեպքում՝



այնուհետև տեղի է ունենում  $H_2S$ -ի փոխազդեցությունը մետաղի հետ՝



[29] աշխատանքում տրված է սուլֆիդազոյացման պինդֆազային մեխանիզմը՝



որտեղ  $Me$ -ն  $Mg, Cd, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi$  է:

Այսպիսով, աղացներում նուրբ և գերնուրբ մանրացման դեպքում հնարավոր է իրականացնել նման սինթեզներ:

Պ.Ա. Ռեբինդերի աշխատանքներից հայտնի է, որ ջերմաստիճանը որոշիչ գործոններից մեկն է օքսիդացած պղնձային հանքանյութերի տարրական ծծմբով հիդրոթերմալ սուլֆիդացման գործընթացում: 277...343 °C ջերմաստիճանային միջակայքում ջրի մածուցիկությունը փոքրանում է 5 անգամ, իսկ էլեկտրոլիտիկ դիսոցման և թրջման ջերմությունն ավելանում է: Դա ավելացնում է միկրոճաքերի թիվը, իսկ ջրի թափանցման արագությունն ու խորությունը հանգեցնում են միկրոճաքերի սեպաճեղքման, և ինտենսիվանում է նյութերի թաց մանրացումը:

Լեռնային ապարների մանրացման գործընթացի լավացման կախվածությունը ջերմաստիճանից բացատրվում է հետևյալ կերպ. միներալները բնութագրվում են ջերմային ընդարձակման տարբեր գործակիցներով, որը գենեզիսի ժամանակ հովացման գործընթացում ներքին լարվածությունների ծագման պատճառ է հանդիսանում: Սակայն երկրաբանական գործընթացներն ընթանում են միլիոնավոր տարիների ընթացքում, այդ լարվածությունները գործնականում հասնում են

զրոյի, տաքացումը հանգեցնում է միջֆազային լարվածության վերականգնման, որն էլ մեծացնում է ապարի ամրությունը:

Վ.Վ. Բոլդիրևը, դիտարկելով ջերմաստիճանի ու ճնշման կարճաժամկետ բարձրացման գործոնները, դրանք կապել է պինդ մարմնի գրգռված վիճակի հետ: Իր հերթին գրգռվածությունը երեք հիմնական գործընթացների՝ շփման, դեֆորմացիայի արդյունքում տաքացման և քայքայման ընթացքում էներգիայի անջատման արդյունք է: Կինետիկ պատկերացումները թույլ են տալիս մեխանաքիմիական գործընթացները դիտարկել ավելի բարդ համակարգերում, օրինակ՝ հեղուկ-պինդ մարմին, գազ-պինդ մարմին, և առանձնացնել ջերմաստիճանի ու ճնշման ազդեցությունները: Համակարգում ջերմաստիճանի բարձրացման աղբյուր կարող են լինել ադիաբատ սեղմման գործընթացը և պինդ մարմինների ծակոտիների միջով հեղուկի հոսքը: Մոտավոր գնահատումը ցույց է տվել, որ ջերմաստիճանը կարող է հասնել 773...973 Կ, իսկ մասնիկների միջև առաջացող ճնշումը՝ 0,5...0,6 ՄՊա: Նման պայմաններում հնարավոր է լինում որոշ միներալների սինթեզը:

Պոնձի օքսիդացած միներալների սուլֆիդացման գործընթացները կապված են բազմաթիվ օքսիդավերականգնման ռեակցիաների հետ: Այդ գործընթացները բավականին բարդ են: Հիմնական ռեակցիաների ընթանալու հավանականությունը պարզելու համար կատարվել է նախնական թերմոդինամիկական հաշվարկ: Այդ ռեակցիաների ընթանալու չափանիշը՝ հաստատուն ճնշման և ջերմաստիճանի պայմաններում, Գիբսի էներգիայի ( $\Delta G$ ) նվազումն է:  $\Delta G$ -ի հաշվարկները կատարվել է Տեմկին-Շվարցմանի մեթոդով [30-34], որի համար անհրաժեշտ տվյալները բերված են աղյուսակում: Համեմատելի տվյալներ ստանալու համար հաշվարկները կատարվել են 1 մոլ սուլֆիդարարի համար: Ուսումնասիրվող ռեակցիաների  $\Delta G^\circ$ -ի համեմատությունը հնարավորություն է տալիս՝ որոշելու մի ռեակցիայի առավելությունը մյուսի համեմատ: Եթե դարձելի քիմիական ռեակցիաներն ընթանում են մինչև հավասարակշռություն, ապա մոլեկուլար-ստատիկորեն դա նշանակում է, որ ուղիղ և հետադարձ ռեակցիաների արագությունները հավասարվում են [35], իսկ թերմոդինամիկայի տեսանկյունից հավասարվում են բաղադրամասերի քիմիական պոտենցիալները:

Ելանյութերի էնթալպիաների և էնտրոպիաների արժեքները

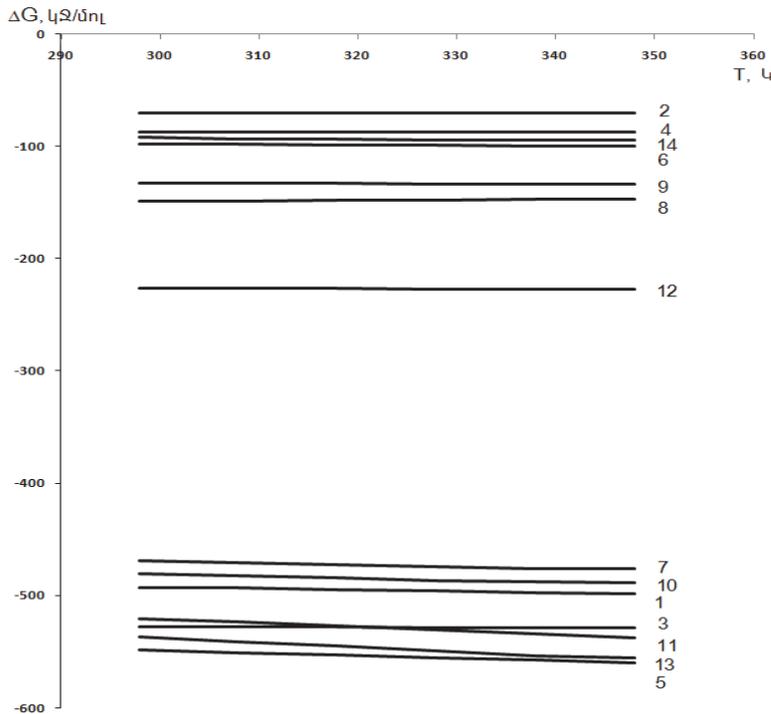
Տարրեր, միացություն	$\Delta H^{0}_{298}$ , կՋ/մոլ	$\Delta S^{0}_{298}$ , կՋ/մոլ·աստ	$T_{\text{հալմ}},$ Կ	$T_{\text{եռմ}},$ Կ
CuO	155,64	42,68	1515	-
Cu <sub>2</sub> O	170,53	93,09	-	-
Cu <sub>2</sub> S	82,0	119,24	1403	-
CuS	50,62	66,52	-	-
Cu <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> [CO <sub>3</sub> ] <sub>2</sub>	1632,17	402,5	-	-
Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> [CO <sub>3</sub> ]	1051,43	186,18	-	-
Na <sub>2</sub> S	386,60	98,32	1223	-
SiS <sub>2</sub>	205,01	80,32	1363	1403
SiO <sub>2</sub>	905,41	43,51	1696	-
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1130,76	138,78	1131	-
NaOH	426,35	64,43	593	1663
H <sub>2</sub> O	285,82	69,95	-	373
CO <sub>2</sub>	393,50	213,67	-	-
SO <sub>2</sub>	296,89	248,06	-	-
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	1089,51	146,02	-	-

Ստորև բերված են հիմնական ռեակցիաները և թերմոդինամիկական հաշվարկների արդյունքները (սկ. 2):

Ընթանում են հետևյալ ռեակցիաները.

- $2\text{CuO} + \text{SiS}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{CuS} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ :
- $\text{CuO} + \text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} = \text{CuS} + 2\text{NaOH}$ :
- $2\text{Cu}_2\text{O} + \text{SiS}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{Cu}_2\text{S} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ :
- $\text{Cu}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} = \text{Cu}_2\text{S} + 2\text{NaOH}$ :
- $3\text{CuO} + \text{SiS}_2 + \text{H}_2\text{O} = 3/2 \text{Cu}_2\text{S} + \text{SiO}_2 + 1/2 \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ :
- $3/2 \text{CuO} + \text{Na}_2\text{S} + 3/2\text{H}_2\text{O} = 3/4\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{NaOH} + 1/4 \text{SO}_2 + 1/2 \text{H}_2\text{O}$ :
- $2/3 \text{Cu}_3\text{OH}_2[\text{CO}_3]_2 + \text{SiS}_2 + 2/3\text{H}_2\text{O} = 2\text{CuS} + \text{SiO}_2 + 4/3\text{CO}_2 + 4/3 \text{H}_2\text{O}$ :
- $1/3\text{Cu}_3\text{OH}_2[\text{CO}_3]_2 + \text{Na}_2\text{S} + 1/3\text{H}_2\text{O} = \text{CuS} + 2/3\text{Na}_2\text{CO}_3 + 2/3 \text{NaOH} + 1/3 \text{H}_2\text{O}$ :
- $1/2\text{Cu}_2\text{OH}_2[\text{CO}_3] + \text{Na}_2\text{S} + 1/2 \text{H}_2\text{O} = \text{CuS} + 1/2\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$ :
- $\text{Cu}_2\text{OH}_2[\text{CO}_3] + \text{SiS}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{CuS} + \text{SiO}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ :
- $\text{Cu}_3\text{OH}_2[\text{CO}_3]_2 + \text{SiS}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2/3 \text{Cu}_2\text{S} + \text{SiO}_2 + 1/2 \text{SO}_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ :
- $1/2\text{Cu}_3\text{OH}_2[\text{CO}_3]_2 + \text{Na}_2\text{S} + 1/2\text{H}_2\text{O} = 3/4\text{Cu}_2\text{S} + 3/4\text{Na}_2\text{CO}_3 + 1/4\text{Na}_2\text{SO}_3 + 1/4\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ :
- $3/2\text{Cu}_2\text{OH}_2[\text{CO}_3] + \text{SiS}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} = 3/4\text{Cu}_2\text{S} + \text{SiO}_2 + 1/2 \text{SO}_2 + 3/2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ :
- $3/4 \text{Cu}_2\text{OH}_2[\text{CO}_3] + \text{Na}_2\text{S} + 1/4\text{H}_2\text{O} = 3/4\text{Cu}_2\text{S} + 2\text{NaOH} + 1/4 \text{SO}_2 + 3/4\text{CO}_2$ :

Այսպիսով, թերմոդինամիկական հաշվարկները ցույց են տալիս, որ Թեղուտի հանքավայրի օքսիդացման գոտու պղնձի միներալների սուլֆիդացման ռեակցիաները սիլիցիումի սուլֆիդով ունեն ընթանալու մեծ հավանականություն՝ նատրիումի սուլֆիդի համեմատ: Փոխազդեցությունն ընթանում է  $\Delta G$ -ի մեծ բացասական արժեքով, որը և հաստատում է սիլիցիումի սուլֆիդով պղնձի սուլֆիդների ստացման մեծ հնարավորությունը (նկ.2):



Նկ. 2. Գիրսի էներգիայի արժեքների կախվածությունը ջերմաստիճանից

Օքսիդացած պղնձային հանքանյութերի ֆլուտացման նախապատրաստման ամենաարդյունավետ մեթոդը սուլֆիդացումն է [36]: Մանրացման փուլում հեռանկարային տարբերակներից է սիլիցիումի սուլֆիդով կամ նատրիումի թիոկոմպլեքսով սուլֆիդացումը:

Նատրիումի թիոկոմպլեքսը պատրաստվել է հետևյալ կերպ. նատրիումի սուլֆիդի վրա ավելացվել է ստեխիոմետրական քանակով սիլիցիումի սուլֆիդ, այնուհետև այն տաքացվել է, և ստացվել համասեռ զանգված:

Հետազոտվել են աղացում սուլֆիդացման գործընթացները: Կատարվել են հետազոտություններ սուլֆիդացման գործընթացի ինտենսիվացման համար՝ մեխանիկական ակտիվացման միջոցով: Մեխանիկական ակտիվացման օգտագործումը հնարավորություն է տալիս՝ բարձրացնելու պինդ մարմինների ռեակցիոն

ունակությունները՝ ի հաշիվ բյուրեղային կառուցվածքում արատների առաջացման և դիֆուզիայի գործընթացի արագացման: Պղնձի օքսիդացած միներալների սուլֆիդացումը սիլիցիումի սուլֆիդով կամ նատրիումի թիոկոմպլեքսով դանդաղում է միներալների մակերևույթին սուլֆիդային թաղանթների առաջացման հետևանքով: Այդ գործընթացում նկատվում է ներքին դիֆուզիայի դիմադրության աճ, քանի որ գործընթացը տեղի է ունենում ռեազենտի (սիլիցիումի սուլֆիդի կամ նատրիումի թիոկոմպլեքսի) դիֆուզիայով առաջացած սուլֆիդային (Cu<sub>2</sub>S) թաղանթի միջով: Մեխանիկական ակտիվացման կիրառումը (մանրացման գործընթաց), որի ընթացքում գոյանում են օքսիդացած միներալների թարմ մակերևույթներ՝ սուլֆիդի շերտի հեռացման հետևանքով, հնարավորություն է տալիս ներքին դիֆուզիայի ռեժիմից անցնել կինետիկական ռեժիմի: Դրա հետևանքով գործընթացի արագությունը մեծանում է, և ավելանում է սուլֆիդացված պղնձի մասնաբաժինը: Այսպիսով, սուլֆիդացման ռեակցիայի արագությունը որոշվում է մակերևույթների առաջացման արագությամբ: Սուլֆիդացման գործընթացը տիպիկ պինդֆազային ռեակցիա է, որը սկսվում է միներալների հատիկների մանրացումով:

**Եզրակացություն:** Գրականության ակնարկի տվյալների և կատարված փորձարարական հետազոտությունների վերլուծության հիման վրա աշխատանքում առաջարկվում է ծծումբ պարունակող սիլիցիումի սուլֆիդի և նատրիումի թիոկոմպլեքսի առկայությամբ օքսիդացած պղնձային հանքաքարերի հիդրոջերմային սուլֆիդացման և մանրացման գործընթացների համատեղում: Գործընթացը կարելի է իրականացնել սովորական գնդադացներում մինչև 373 Կ ջերմաստիճանում՝ արգասիքի հետագա ֆլոտացմամբ: Ի տարբերություն ավտոկլավային մեթոդի՝ հնարավոր է լինում նվազեցնել սուլֆիդացման գործընթացի տեխնոլոգիական պայմանները, պարզեցնել վերամշակման սխեման՝ ի հաշիվ սուլֆիդացման ու մանրացման օպերացիաների համատեղման, նվազեցնել նաև սուլֆիդացման գործընթացի իրականացման տնտեսական ծախսերը: Ցույց է տրված, որ պղնձի օքսիդացած միներալների սուլֆիդացումը սիլիցիումի սուլֆիդով կամ նատրիումի թիոկոմպլեքսով դանդաղում է միներալների մակերևույթին սուլֆիդային թաղանթների առաջացման հետևանքով, որի ընթացքում նկատվում է ներքին դիֆուզիայի դիմադրության աճ: Դրա հետևանքով գործընթացի արագությունը մեծանում է, և ավելանում է սուլֆիդացված պղնձի մասնաբաժինը:

Այսպիսով, սուլֆիդացման ռեակցիայի արագությունը որոշվում է մակերևույթների առաջացման արագությամբ: Սուլֆիդացման գործընթացը տիպիկ պինդֆազային ռեակցիա է, որը սկսվում է միներալների հատիկների մանրացումով:

*Հետազոտությունները կատարվել են Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Նյութագիտություն և մետալուրգիա» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում:*

## ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Кулебакин В.Г.** Превращения сульфидов при активировании.- Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1983.- 209 с.
2. **Болдырев В.В.** Механохимический синтез в неорганической химии: Сб. науч.тр.- Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991.- С.5-33.
3. **Юхвид В.И.** Закономерности фазоразделения в металлотермических процессах // Известия АН СССР. Металлы.-М.: Наука, 1980.- №6.- С.61-64.
4. **Соколов И.П., Чекмарев А.М., Селезня В.П., Козырев А.В.** Особенности протекания твердофазных металлотермических реакций // Изв. АН СССР.- Металлы.- 1990.- №2.- С.17-18.
5. **Варенцов Е.А., Хрусталов Ю.А.** Механоэмиссия и механохимия молекулярных органических кристаллов // Успехи химии.- РАН.- 1995.- Т. 64, №8.- С.834-849.
6. **Тананаев И.В.** Физикохимия ультрадисперсных систем / Институт металлургии им. А.А. Байкова, АН СССР.- М.: Наука, 1987.- 150 с.
7. **Ребиндер П.А., Дерягин Б.В.** Механоэмиссия и механохимия твердых тел / Институт физики и математики АН Киргизской ССР. – Фрунзе: Изд-во «ИЛИМ», 1974.- 205 с.
8. **Абрамов А.А.** Технология обогащения окисленных и смешанных руд цветных металлов.- М.: Недра, 1986.- 302 с.
9. **Глембоцкий В.А., Анфимова Е.А.** Флотация окисленных руд цветных металлов.- М.: Недра, 1966.- 253 с.
10. **Полькин С.И., Адамов Э.В., Анфимова Э.В.** Обогащение руд цветных металлов.- М.: Недра, 1983.- 400 с.
11. **Соболев Д.С., Фишман М.А.** Практика обогащения руд цветных и редких металлов.- М.: Госгортехиздат, 1969.- 588 с.
12. Комбинированные и специальные методы обогащения бедных и труднообогатимых руд за рубежом / **О.В. Денисова и др.**- М.: Цветметинформация, 1978.- 32 с.
13. **Абрамов А.Л., Михайлов С.М.** Оптимальные условия сульфидизации и флотации окисленных медных минералов.- М.: Недра, 1978.- 150 с.
14. **Лаптев Ю.В., Сиркис А.Л., Колонии Г.Р.** Сера и сульфидообразование в гидрометаллургических процессах.- Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1987.- 53 с.
15. **Стригин И.А., Кушникова В.Г.** Влияние сульфата аммония и сульфата алюминия на скорость сульфидизации малахита и хризоколлы и на адсорбцию собирателя на них // Обогащение, металлургия цветных металлов и методы анализа.– М.: Металлургиздат, 1995.- С. 30-40.
16. **Садыгина А.Л., Кукоев В.А., Горячкин В.И., Гавриленко А.Ф.** Особенности осаждения меди и никеля в гидратной пульпе // Цветные металлы.- 1979. -3.– С. 11-14.
17. К вопросу о сульфидизации и флотации хризоколлы / **В.М. Угорец, Э.Б. Сагиндыкова, М.З. Угорец и др.** // Цветные металлы. – 1988. - № 12. – С. 83-86.
18. **Полькин С.И., Адамов Э.В.** Обогащение руд цветных металлов.-М., 1983.-400 с.

19. **Митрофанов С.И., Мещанникова В.И., Курочкина А.В.** Комбинированные процессы переработки руд цветных металлов.- М.: Недра, 1984.- 218 с.
20. Комбинированные методы переработки окисленных и смешанных руд / **С.И. Митрофанов и др.**- М.: Недра, 1970.- 288 с.
21. **Клец В.Э., Михеев А.Д., Борбат В.Ф.** Выделение цветных металлов из растворов в виде сульфидов // Цветные металлы.- М., 1985.- Вып. 4.- С. 15-18.
22. **Омаров Б.Н., Юсупов Т.С., Бектурганов Н.С., Сим С.П.** Исследование процесса сульфидирования окисленных медных руд на стадии измельчения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.- 1993.- № 3.- С. 96-101.
23. Hudrometallurgy on China C.Y. chem. p.6587 Hudrometallurgy: research // Development and Planet Prac. of the 3rd Intern. Symp. on Hudrometallurgy.- Atlanta, 1983.- P.1020.
24. **Позин М.Е.** Технология минеральных солей. Ч.1.- Л.: Химия, 1970.- 792 с.
25. **Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жернов Е.Н.** Активация минералов при измельчении.- М.: Недра, 1986.- 207 с.
26. **Юсупов Т.С.** Теория и практика направленного изменения структуры и свойств минералов в процессах тонкого измельчения с целью интенсификации химической переработки и флотационного обогащения руд: Автореф. дис. ... докт. техн. наук.- Новосибирск, 1988.- 392 с.
27. **Гвоздик В.С.** Исследование влияния способа измельчения на технологию обогащения бедных железных руд: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кривой Рог, 1978.- 21 с.
28. **Гусев Г.М.** О реакциях элементарной серы с металлами в процессе тонкого диспергирования их в водной среде // В сб.: Механохимические явления при сверхтонком измельчении.- Новосибирск: СО АН СССР, 1971.- С. 110-115.
29. **Кулибакин В.Г.** Применение механохимии в гидрометаллургических процессах. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1988.- 272 с.
30. **Дорогокунец П.И., Карпов И.К.** Термодинамика минералов и минеральных равновесий. - Новосибирск: Наука, Сибирское итделение, 1984. – 184 с.
31. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / **В.П. Глушко, Л.В. Гурвич и др.** - М., 1978. - Т. 1-4.- 496 с.
32. **Карпов. И.К., Конник С.А., Лашкевич Т.М.** Константы веществ для термодинамических расчетов в геохимии и петрологии. - М.: Наука, 1986. - 143 с.
33. **Наумов Т.Б., Рыженко Б.Н., Ходаковский И.Л.** Справочник термодинамических величин. - М.: Атомиздат, 1971. - 239 с.
34. **Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А.** Справочник неорганических веществ.- М.: Химия, 1987.- 230 с.
35. **Мержанов А.Г.** Процессы горения и синтез материалов.- Черноголовка: Изд-во ИСМАН, 1998. -512 с.
36. **Бектурганов Н.С.** Физико-химические основы и технология подготовки окисленных и смешанных руд тяжелых цветных металлов к флотационному обогащению методом гидротермальной сульфидизации: Автореф. дис. ... докт. техн. наук.- М., 1990.-39 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 08.10.2024:

С.Г. АГБАЛЯН, А.В. АВАГЯН, Т.С. АГАМЯН

## ОКИСЛЕННЫЕ МЕДНЫЕ РУДЫ И ОСОБЕННОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ НИХ МЕДИ МЕТОДАМИ СУЛЬФИДАЦИИ

На основе анализа методов переработки труднообогатяемых медных, окисленных и смешанных руд в работе предложено сочетание процессов гидротермального сульфидирования и измельчения окисленных медных руд с наличием серосодержащего сульфида кремния и тиокомплекса натрия. Из многих сульфидирующих агентов большой интерес представляют водно-гидролизуемые и сульфидирующие агенты, образующие при механоактивации стабильные сульфиды меди в кислых и нейтральных средах. Процесс можно проводить в обычных шаровых мельницах при температуре до 373 K с последующей флотацией полученного продукта.

Исследованы реакции взаимодействия сульфида кремния с тиокомплексом натрия и окисленными минералами меди (азуритом, малахитом, купритом, теноритом). Доказана высокая реакционная способность сульфида кремния и тиокомплекса натрия при низких температурах, что позволяет осуществлять глубокую сульфидацию поверхности окисленных медных минералов в процессе измельчения. Показано, что на процесс сульфидирования окисленных медных минералов влияют температура, продолжительность, расход сульфидатора, а также степень измельчения минералов. Увеличение продолжительности процесса и стоимости сульфидатора повышает степень сульфидирования окисленных минералов. Показано, что сульфидирование окисленных медных минералов сульфидом кремния или тиокомплексом натрия замедляется за счет образования сульфидных пленок на поверхности минералов. В этом процессе происходит увеличение сопротивления внутренней диффузии, поскольку процесс ограничивается индуцированной диффузией сульфидной ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) пленкой сульфида кремния или тиокомплекса натрия. В результате увеличивается скорость процесса и повышается доля сульфидированной меди. Таким образом, скорость реакции сульфидирования определяется скоростью образования поверхностей. Процесс сульфидирования представляет собой типичную твердофазную реакцию, которая начинается с измельчения минеральных зерен.

**Ключевые слова:** медь, оксид, минерал, шаровая мельница, измельчение, механохимическая активация, сульфидирование, термодинамика, флотация, исходное сырье, продукт.

S.G. AGHBALYAN, H.V. AVAGYAN, T.S. AGHAMYAN

**OXIDIZED COPPER ORES AND PECULIARITIES OF COPPER EXTRACTION  
FROM THEM THROUGH SULFIDATION METHODS**

Based on the analysis of methods for processing difficult-to-enrich copper ores, oxidized and mixed ores, a combination of hydrothermal sulfiding and grinding processes for oxidized copper ores containing sulfur-containing silicon sulfide and sodium thiocomplex is proposed. Of many sulfiding agents, water-hydrolyzable and sulfiding agents that form stable copper sulfides in acidic and neutral environments during mechanical activation are of great interest. The process can be carried out in conventional ball mills at temperatures up to 373 K, followed by flotation of the resulting product.

The reactions of interaction of silicon sulfide with sodium thiocomplex and oxidized copper minerals (azurite, malachite, cuprite, tenorite) are studied. The high reactivity of silicon sulfide and sodium thiocomplex at low temperatures has been proven, which allows for deep sulfidation of the surface of oxidized copper minerals during the grinding process. It has been shown that the process of sulfidation of oxidized copper minerals is influenced by temperature, duration, consumption of sulfidizer, as well as the degree of grinding of minerals. Increasing the duration of the process and the cost of the sulfidizer increases the degree of sulfidation of oxidized minerals. It is shown that sulfidation of oxidized copper minerals by silicon sulfide or sodium thiocomplex is slowed down due to the formation of sulfide films on the surface of the minerals. In this process, an increase in internal diffusion resistance occurs because the process is limited by the diffusion-induced sulfide ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) film of silicon sulfide or sodium thiocomplex. As a result, the speed of the process increases and the proportion of sulphidized copper increases. Thus, the rate of sulfidation reaction is determined by the rate of surface formation. The sulfidation process is a typical solid-state reaction that begins with the grinding of mineral grains.

**Keywords:** copper, oxide, mineral, ball mill, grinding, mechanochemical activation, sulfidation, thermodynamics, flotation, feedstock, product.

Ս.Գ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ն.Վ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Օ.Գ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴԵՐՔՈՒՄ ԱԾԽԱԲԵՐ  
ԱՌԱՋԱՑՈՒՄՆԵՐԻ ՀՐԱՔԱՅՔԱՅՈՒՄՈՎ ՍՏԱՑՎԱԾ՝ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԻ  
ԿԱՐԲԻԴԻ ԵՎ ԱԾԽԱԾՆԱՅԻՆ ՏԱՐՐԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ  
ԲԱՂԱՂԱՆՑՈՒԹԵՐ**

Էլեկտրատեխնիկական և կիսահաղորդչային սարքերի ժամանակակից արտադրությունը պահանջում է լայն գործառական հատկություններով նյութերի կիրառություն: Այս համատեքստում առանձնահատուկ հետաքրքրություն են ներկայացնում կիսահաղորդչային՝ ածխածնային, սիլիցիումային տարրերի և դրանց միացությունների հիմքով քիմիական կառույցները, որոնք խթանում են արդի տեխնիկայի պահանջներին համապատասխան նոր ֆերմագնիսական և ֆերիմագնիսական նյութերի մշակումը և ստացման առաջադեմ տեխնոլոգիաների զարգացումը: Ավանդական արտադրական եղանակները բնութագրվում են բարձր էներգասպառմամբ և թանկարժեք հումքի օգտագործմամբ, որի հետևանքով էապես բարձրանում է արտադրանքի ինքնարժեքը:

Սույն կիրառական հետազոտության շրջանակներում ուսումնասիրվում է Հայաստանի ածխաբեր առաջացումների՝ որպես հումքի օգտագործման տեխնիկական հնարավորությունը: Այդ նպատակով կիրառվում է բարձրջերմաստիճանային հրաքայքայման եղանակը, որը նպատակաուղղված է տեղական ածխածնային հումքի տեխնոլոգիական վերամշակմանը: Հրաքայքայման արդյունքում ձևավորվում են կիսահաղորդչային՝ խորանարդային կառուցվածքով սիլիցիումի կարբիդի (Moissanite 3C), 3R տեսակի գրաֆիտի ու  $Fe_5Si_3$  կազմով ֆերոսիլիցիումի հիմքով համակցված նյութեր, որոնք ցուցաբերում են էլեկտրամագնիսական հատկություններ:

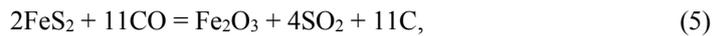
**Առանցքային բաներ.** ածխաբեր առաջացումներ, հումք, էլեկտրամագնիսական բաղադրանյութեր, կիսահաղորդչային տարրեր, համակցված նյութեր:

**Ներածություն:** Ժամանակակից գիտության և տեխնիկայի բնագավառներում բարձր տեխնոլոգիաների առաջընթացը պայմանավորված է երկրում նյութագիտության ոլորտի ինստիտուտների զարգացածության մակարդակով: Այս տեսակետից մեծ է պահանջարկը հատկապես բարձր ջերմա-, էլեկտրահաղորդականության ու առաձգականության մոդուլով՝ ագրեսիվ միջավայրում օքսիդակայուն, ընդ որում՝ տեսակարար կշռով մետաղներից թեթև, լայն գործառական նշանակությամբ նյութերի նկատմամբ, քանի որ դրանք հնարավոր է կիրառել ծայրահեղ պայմաններում շահագործվող առանցքակալների, պաշտպանիչ ծածկերի, էլեկտրական կոնտակտների, ջերմափոխանակիչների և այլ արտադրական գործընթաց-

ներում: Որպես առաջադեմ այդ նյութերի շարքում հարկ է կարևորել ֆերի- և ֆերոմագնիսական հատկություններով բաղադրանյութերի դերը, որոնք կիրառվում են հիշող և շեղող օպտիկական սարքերում, մագնիսական դաշտի սենսորներում, դրանով իսկ կարևոր նախադրյալներ ստեղծելով նորագույն սարքեր նախագծելու համար [1-4]: Նույն համատեքստում հնարավոր է ավելացնել տարբեր մետաղների խառնուրդներով նոսրացված կամ ոչ համասեռ մագնիսական կիսահաղորդիչները: Օրինակ, մատրիցի գործառնությամբ՝ քիմիական տարրերի պարբերական աղյուսակի III-V (III-Al, Ga, In; V-P, As, Sb) և II-IV (II-Zn, Cd; IV-Si, Ge, Pb, Sn) խմբերի կիսահաղորդիչները պարունակում են  $TiO_2$ , ZnO և Fe, Co Ni և այլ մագնիսական միացություններ և մասնիկներ: Նշված երկնշանակությամբ արտադրանքները ստանալու գործընթացներում կիրառվում է էլանյութերի առանձնահատկությունները մեկտեղելու տեխնիկական սկզբունքը՝ դրա համար օգտագործելով հումքի տաք մամլման, եռակալման, էլեկտրական պլազմային պարպման և ինքնաբոցավառման բարձրջերմաստիճանային սինթեզի (ԻԲՄ) տեխնոլոգիաները: Հայտնի է նաև, որ այդ նպատակով գործող տեխնոլոգիաների արդյունքում ստացվում են բարձր ինքնարժեքով արտադրանքներ, ինչը պայմանավորված է դրանցում կիրառվող թանկարժեք հումքով, սարքավորումներով, էլեկտրական էներգիայի բարձր ծախսով և այլն:

Այս աշխատանքները նվիրված են վերոհիշյալ տեխնիկական խնդիրների լուծմանը, որի այս փուլում նպատակը C և Si կիսահաղորդչային տարրերի հիմքով, ընդ որում՝ երկաթի և այլ մետաղների պարունակությամբ, էլեկտրամագնիսական բաղադրանյութերի ստացման ժամանակակից տեխնոլոգիայի մշակումն է:

**Խնդրի դրվածքը, հումքի փորձարկման եղանակի հիմնավորումը:** Կիսահաղորդչային ածխածնի և սիլիցիումի տարրերի և դրանց միացությունների հիմքով մագնիսական բաղադրանյութերի ստացման նպատակով սույն հետազոտությունում որպես հումք փորձ է արվել՝ օգտագործելու Հայաստանի Հանրապետության ընդերքում տարածված մետաղակիր ածխաբեր առաջացումները [5]: Նման որոշումը հիմնվում է աշխատանքի նպատակային տեսանկյունից հումքի նպաստավոր քիմիական կազմի և տնտեսական նպատակահարմարության վրա: Հայաստանի ընդերքում տարածված ածխաբեր առաջացումների (ՀԱԱ) տեխնոլոգիական փորձարկումների համար նպատակահարմար է եղել կիրառել բարձրջերմաստիճանային, նոսր մթնոլորտային օդի պայմաններում հրաքայքայման եղանակը: Նախընտրած հետազոտական եղանակի տեխնիկական իրատեսությունը որոշելու համար օգտագործվել է գործընթացում հնարավոր փոխազդեցությունների հավասարակշռության թերմոդինամիկական գործոնները հաշվարկելու [6] եղանակը: Տեխնոլոգիական նկատառումներով կարևոր փոխազդեցությունների հավասարումները ներկայացված են ստորև՝



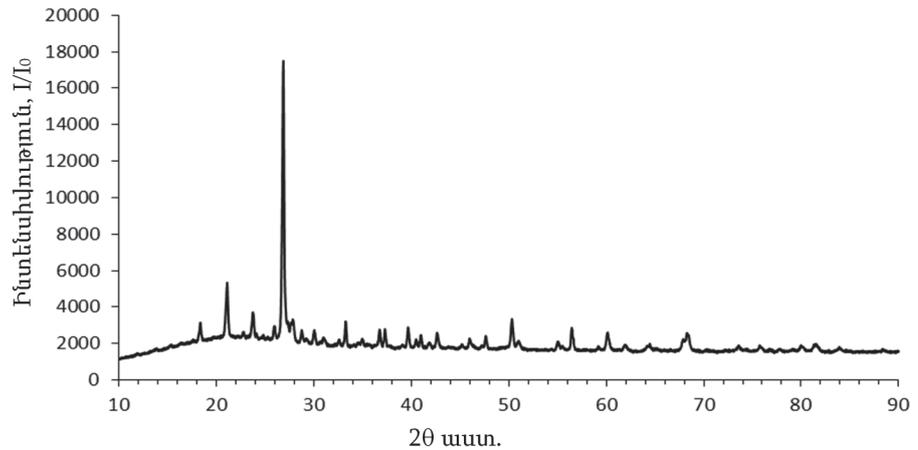
Այդ վերլուծությունները ցույց են տալիս, որ մինչև 1000...1100°C ջերմաստիճաններում ՀԱԱ հրաքայքայելիս ընթանում են դրանց մեջ պարունակվող բարդ քիմիական միացությունների քայքայման փոխազդեցությունները: Դրանց արդյունքում գոյացած սիլիցիումի և մետաղների օքսիդային և սուլֆիդային միացություններն այնուհետև հայտնվում են բնութագրերով վերականգնիչ ածխածնաթթվային ու ածխածնաջրածնային զագերի միջավայրում, որտեղ մոտավորապես 1100°C և բարձր ջերմաստիճաններում առաջանում են արժեքավոր արգասիքներ՝ C, Si կիսահաղորդչային տարրերը և SiC, FeSi միացությունները:

Հետազոտության արգասիքների ֆազային վերլուծությունները կատարվել են ՀԱԱ Ա.Բ. Նալբանդյանի անվան քիմիական ֆիզիկայի ինստիտուտում՝ ճապոնական արտադրության Rigaku MiniFlex 600 մակնիշի ռենտգենային դիֆրակտորի միջոցով՝ CuK $\alpha$ -ճառագայթների պայմաններում, իսկ ամբողջական վերլուծությունը կայանում է Ռիտվելդի ֆազային բաժնեմասերի և ցանցերի հաշվառման եղանակի հիման վրա: Հարկ է վերջում հավելել, որ բնական վիճակով հումքի և դրանց մշակումներով նախապատրաստված փորձնմուշների հրաքայքայման արգասիքների ծավալային օհմային դիմադրությունը որոշվել է VC 9808 վոլտամպերաչափով, տեսակարար էլեկտրական դիմադրությունը՝ քառամխանային եղանակով [7], իսկ մագնիսական հատկությունները՝ 2 Տլ ինդուկտիվության մագնիսի միջոցով՝ ուսումնասիրելով փոխազդեցության ինտենսիվությունը:

**Հետազոտության նկարագրությունը և արդյունքները:** Ածխածնի, սիլիցիումի ու դրանց միացությունների հիմքով մագնիսական բաղադրանյութերի ստացման համար որպես հումք օգտագործվել են Հայաստանի Հանրապետության ածխաբեր առաջացումները, որոնց քիմիական կազմը ներկայացված է աղ. 1-ում, ֆազային վերլուծության ռենտգենագիրը՝ նկ. 1-ում, իսկ արդյունքները՝ աղ. 2-ում:

Հայաստանի Հանրապետության ընդերքում ածխաբեր առաջացումների քիմիական կազմը, կշռ. %

C	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	CrO	S,N,O,H` այրման կորուստը	Ընդամենը
43,4	31,6	8,3	4,2	2,4	0,7	0,3	0,2	0,1	8,8	100,0



Նկ. 1. Հայաստանի Հանրապետության ընդերքում ածխաբեր առաջացումների ֆազային վերլուծության ռենտգենագիրը

Հայաստանի Հանրապետության ընդերքում ածխաբեր առաջացումների ֆազային վերլուծության արդյունքները

Քիմիական կառույցի անվանումը	Քիմիական բանաձևը	Չանգվածային մասնաբաժինը, %
Սիլիցիումի երկօքսիդ	SiO <sub>2</sub>	70,9
Պիրիտ	FeS <sub>2</sub>	7,1
Երկօքսիդ, Fe+2-բետոնիդ	Ca (Mg <sup>0.69</sup> Fe <sup>0.31</sup> ) (Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	7,1
Ածխածին	C	8,5
Քրոմի օքսիդ	CrO <sub>3</sub>	0,6
Երկաթ (II), երկաթ (III), մագնետիտ	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2,3
Սիլիմանիտ	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	3,5

ՀԱԱ-ի քիմիական կազմի վերաբերյալ աղ. 2-ի տվյալներին պետք է հավելել, դրանց այրման ընդհանուր կորուստը, որը կազմում է 51,4%: Վերջինիս մեջ հիմնական օրգանական բաղադրիչ հանդիսացող ածխածնի պարունակությունը կազմում է մոտավորապես 42,5%, ծծմբինը՝ 3,0%, թթվածնինը՝ 2,0%, իսկ ջրածնինը՝

ագոտի հետ՝ 3,8%: Նույն աղյուսակի տվյալները, մյուս կողմից՝ ցույց են տալիս, որ ՀԱԱ -ի մեջ սիլիցիումը հանդես է գալիս սիլիկահողի և սիլիմանիտի, երկաթը՝ տարբեր օքսիդների, ինչպես նաև պիրիտի և քիմիական փոխազդեցությունների նկատմամբ դիմակայուն ավելի բարդ միացությունների տեսքով, իսկ ածխածինը հիմնականում գտնվում է ամորֆ կամ ոչ բյուրեղային վիճակում, քանի որ ածխածնի տարրերը կազմում են հումքում ընդհանուր պարունակության միայն 20%-ը:

ՀԱԱ-ի՝ ջարդոնի տեսքով փորձանմուշների, ինչպես նաև դրանց մանրացումներով ստացված համասեռ մանրազանգվածի ու վերջինիս փոշեմամլված հաբերի հրաքայքայումը կատարվել է գրաֆիտային հնոցով՝ փոխազդեցության տարածքում վակուում ստեղծելու ունակությամբ ինդուկցիոն վառարանում: Կատարված փորձերի տեխնիկական տվյալների ու արգասիքների վերաբերյալ տվյալները բերված են աղ. 3-ում:

Աղյուսակ 3

Փորձերի արգասիքների զանգվածը՝ կախված ածխաբեր առաջացումների տեսակից և հրաքայքայման գործընթացի պայմաններից

Փ.Փ. ը/հ	Ածխաբեր առաջացումների տեսքը	Չանգվածը, գ	Խտությունը, գ/սմ <sup>3</sup>	Հումքի հրաքայքայման պայմանները, °C/րոպե	Հրաքայքայման արգասիքները, գ
1	Ջարդոն	5	1,67	(25 ... 1045) / 30 +	2,30
2				+ (1045 ... 1200) / 40 +	2,40
3	Մանրազանգված	5	0,73	+ (1200 ... 1270) / 90	0,30
4					0,32
5	Փոշեմամլված հաբեր	2,0	1,54	(25 ... 1045) / 30 +	0,75
6		1,50		+ (1045 ... 1200) / 40 +	0,60
				+ (1200 ... 1270) / 90	
				(25...1045) / 30 +	
				+ (1045 ... 1270) / 50 +	
				+ 1270 / 80	

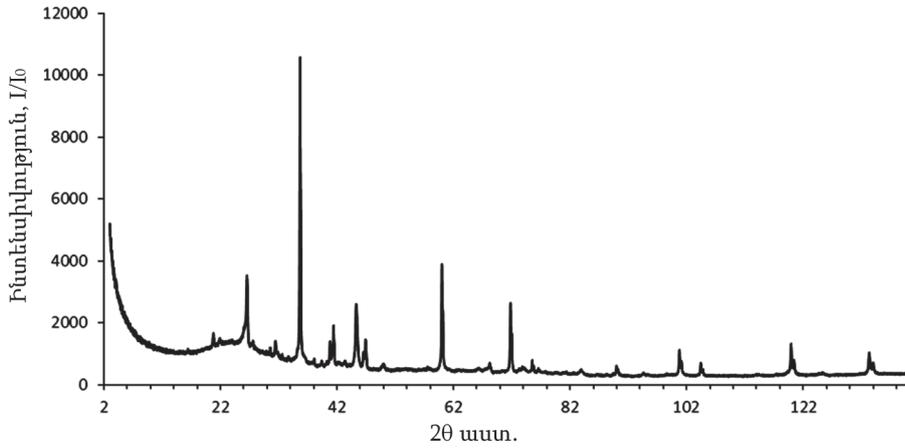
Աղ. 3-ի տվյալները լրամշակելու նպատակով անհրաժեշտ է հավելել, որ ՀԱԱ-ի հրաքայքայումը կատարվել է -680 մմ.սս-ը համապատասխան նոսրությամբ մթնոլորտային օդի պայմաններում, ընդ որում՝ 1,2 փորձերում հումքը 4...10 մմ չափերով ջարդոնն է, 3 և 4-ում՝ մինչև 100 մկմ հատիկային չափերով մանրազանգվածը, իսկ 5 և 6-ում՝ վերջիններիս՝ 5000 կգ/սմ<sup>3</sup> ճնշման տակ փոշե-մամլումով ստացված 12 մմ տրամագծով և 8...11 մմ բարձրությամբ հաբերը: Նույն աղյուսակում բերված տվյալները ցույց են տալիս, որ փորձերի արգասիքների զանգվածը, հրաքայքայման գործընթացի պայմաններից բացի, ուղղակիորեն կապված են հումքի տեսակարար խտությունից: Նշված ցուցանիշներով պայմանավորված 1,2 և 5,6 փորձերի արդյունքում ստացված արգասիքները համապատասխանաբար

կազմում են հումքի զանգվածի 46% և 36,0...39,0%, իսկ 3 և 4-ում՝ մինչև 6,4%-ը: Փաստորեն ներկայացված փորձերի շարքում որպես առավել արդյունավետ պետք է ընդունել 5 և 6 փորձերի արդյունքները, որոնցում ստացված արգասիքների ծավալային դիմադրությունը տատանվում է 16...50 *Օւ* տիրույթում, իսկ տեսակարար դիմադրությունը կազմում է շուրջ 150 *Օւ.սւ*, բացի դրանցից, համեմատաբար ակտիվորեն են փոխազդում 2*Տլ* ինդուկտիվության մագնիսի հետ (նկ. 2): Վերջինիս առնչությամբ հարկ է հավելել, որ 1 և 2 փորձերում ստացված ջարդոնի տեսքով 0,2 *գ* սևեռված արգասիքը ունակ է օդում կախված վիճակում պահելու զանգվածով իրենից տասնյակ անգամներ ծանր մագնիսը: Մնում է հաղորդել, որ փորձերի արգասիքների տեսակարար կշիռը, որպես կանոն, ցածր է հումքից մոտավորապես երկու անգամ. այսպես, օրինակ՝ հրաքայքայումից հետո 5,6 փորձերի ելման հաբերի տեսակարար կշիռը կազմում է 1,54 *գ/սւ*<sup>3</sup>, իսկ արգասիքինը՝ շուրջ 1,0 *գ/սւ*<sup>3</sup>:

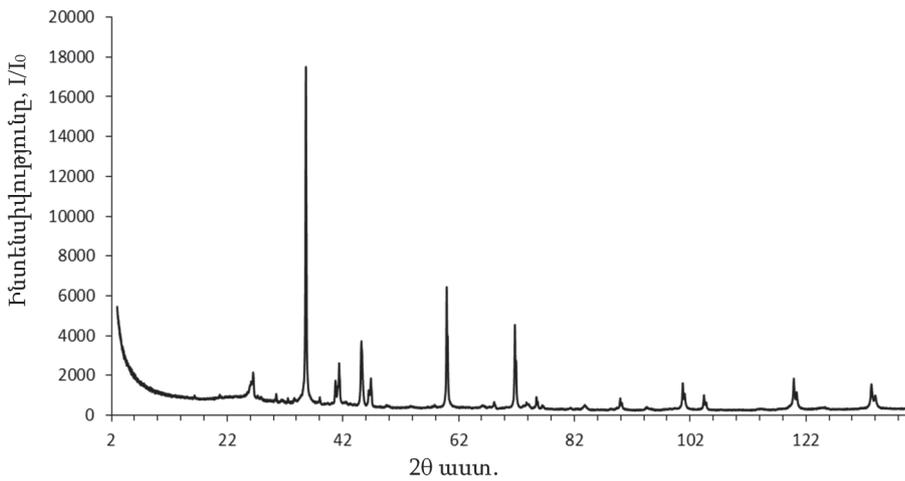


*Նկ. 2. Փորձ 2. ածխաբեր առաջացումների հրաքայքայված ջարդոնի 2Տլ ինդուկտիվությամբ մագնիսի հետ փոխազդեցության պատկերը*

Ֆազային հետազոտ վերլուծությունների նպատակով հարմար է եղել օգտագործել առավել արդյունավետ համարվող փորձերի արգասիքները: Այս առնչությամբ նկ. 3 և 4-ում ներկայացված են 1 և 6 փորձերի արգասիքների ֆազային վերլուծության ռենտգենագրերը, իսկ աղ. 4-ում՝ 1, 5 և 6 փորձերի արդյունքները՝ ըստ վերից վար հաջորդականության:



Նկ. 3. Փորձ 1: Չարդոնի տեսքով ածխաբեր առաջացումների հրաքայքայման արգասիքի ֆազային վերլուծության ռենտգենագիրը



Նկ. 4. Փորձ 6: Հաբերի տեսքով ածխաբեր առաջացումների հրաքայքայման արգասիքի ֆազային վերլուծության ռենտգենագիրը

**Հետազոտության արդյունքների ամփոփումը:** Մույն հետազոտությունում ստացված տվյալները (աղ. 4) ցույց են տալիս, որ հումքի նախապատրաստման փուլում ածխաբեր առաջացումները նպատակահարմար է մանրացնել մինչև 100 մկմ հատիկային չափերի, իսկ դրանից հետո ստացված համասեռ բովախառնուրդի փոշեմամլումը կատարել՝ 4000...5000 կգ/սմ<sup>2</sup> ճնշման պայմաններում:

Հայաստանի Հանրապետության ընդերքում ածխաբեր առաջացումների հրաքայքայման արգասիքների ֆազային վերլուծության արդյունքները

Քիմիական կառույցի անվանումը	Քիմիական բանաձևը	Զանգվածային մասնաբաժինը, %
Մոիսանիտ (Moissanite 3C, cubic)	SiC	38,7
Երկաթի սիլիցիդ, խիֆենզիտ	FeSi <sub>3</sub>	12,2
Միլիկահող (a-SiO <sub>2</sub> , quartz a)	SiO <sub>2</sub>	13,8
Ալյումին նիկել	AlNi	3,49
Մանգան	Mn	1,58
Քառաերկաթ մանգանի եռասիլիցիդ	Fe <sub>4</sub> MnSi <sub>3</sub>	0,15
Երկաթ	Fe	0,47
Ածխածին	C	1,64
Ածխածին	C	28,0
Ֆուլերիտ	C	0,0000067
Մոիսանիտ (Moissanite 3C, cubic)	SiC	49,0
Երկաթի սիլիցիդ, խիֆենզիտ	FeSi <sub>3</sub>	12,0
Ածխածին	C	39,0
Մոիսանիտ (Moissanite 3C, cubic)	SiC	57,40
Երկաթի սիլիցիդ, խիֆենզիտ	FeSi <sub>3</sub>	12, 51
Գրաֆիտ(3R)	C	30,10

ՀԱԱ-ի հրաքայքայման գործընթացներում համեմատաբար արդյունավետ են հումքի նախնական մշակումներով նախապատրաստված, հաբերի տեսքով բովախառնուրդի՝ (25...1045)<sup>0</sup>C / 30 րոպե + (1045...1270)<sup>0</sup>C / 50 րոպե + 1270<sup>0</sup>C / 80 րոպե եռակլաման պայմանները, երբ հումքում պարունակվող սիլիկահողը և ածխածինը իրացվում են ամբողջությամբ: Նշված ջերմային պայմաններում ստացվել են 3C, խորանարդային կառուցվածքով սիլիցիումի կարբիդ, 3R տեսակի գրաֆիտ և FeSi<sub>3</sub> քիմիական բանաձևով երկաթի սիլիցիդ, որոնց միջին պարունակությունները համապատասխանաբար կազմում են 53,2%, 34,5% և 12,3%: Անհրաժեշտ է վերջում ընդգծել, որ, ի տարբերություն գործնականորեն էլեկտրական հոսանքի մեկուսիչ հանդիսացող ՀԱԱ-ի, որի ծավալային դիմադրությունը կազմում է մոտավորապես 99900 Օմ, իսկ տեսակարար դիմադրությունը՝ 376629 Օմ.սմ, փաստորեն հրաքայքայված ՀԱԱ-ն ցուցաբերում են էլեկտրամագնիսական նյութերին բնորոշ հատկություններ, քանի որ դրանց ծավալային դիմադրությունը տատանվում է 16-50 Օմ տիրույթում, իսկ տեսակարար դիմադրությունը կազմում է շուրջ 150 Օմ.սմ:

Հետազոտության արդյունքները, ըստ էության, ուշագրավ են ինչպես տեսական, այնպես էլ և գիտատեխնիկական կիրառական նկատառումով, քանի որ ցույց են տալիս.

1. Կիսահաղորդչային սիլիցիումի կարբիդի և ածխածնային տարրերի հիմքով էլեկտրամագնիսական բաղադրանյութեր ստանալու ՀԱԱ հրաքայքայման եղանակի տեխնիկա-տեխնոլոգիական իրատեսությունը;

2. Հայաստանի Հանրապետությունում հանքակուտակ ածխաբեր առաջացումների՝ որպես սիլիցիումի կարբիդի և ածխածնային տարրերի հիմքով էլեկտրամագնիսական բաղադրանյութերի ստացման տնտեսական նպատակահարմար հումքի կիրառելիությունը:

Ակներն է նաև, որ աշխատանքում ստացված էլեկտրամագնիսական բաղադրանյութի կազմում արժեքավոր կիսահաղորդչային սիլիցիումի կարբիդի, ածխածնային տարրերի ու երկաթի սիլիցիդի առաջացումը պայմանավորված է ածխաբեր առաջացումների հրաքայքայման ժամանակ ընթացող կատալիզային փոխազդեցություններով: Այսպիսի հետևության հիմնավորումը հնարավոր է սույն հետազոտության և [8-11] աղբյուրների տեխնոլոգիական ցուցանիշների համեմատության միջոցով:

Դժվար չէ նկատել նաև, որ հետազոտության արգասիքը կառուցվածքով համընկնում է  $M_{n+1}AX_n$  քիմիական բանաձևով Max ֆազային միացություններին [12, 13], որոնցում M անցումային d շարքի մետաղը երկաթն է (Fe), A տարրը՝ սիլիցիումը (Si), իսկ X՝ ածխածինը (C): Փաստորեն, այս հետազոտության արդյունքում ստացվածը՝ Fe-Si-C, քիմիական տարրերի համակարգին դասվող բազմաֆազային միացություն է, որի մեջ ածխածնի պարունակությունը կազմում է 47,4%, սիլիցիումը՝ 43,0%, իսկ երկաթը՝ 9,6%: Այստեղից իր հերթին հետևում է, որ որպես վերջնանյութ նշված քիմիական միացության մեջ մեկ ատոմ երկաթին միացված են 4,5 ատոմ սիլիցիում և 5,0՝ ածխածին ( $Fe + 4,5Si + 5C$ ):

**Եզրակացություն.** Առաջարկվում է երկաթ պարունակող կիսահաղորդչային գրաֆիտի տարրերի և սիլիցիումի կարբիդի հիմքով (C+SiC), բնութագրերով էլեկտրամագնիսական բաղադրանյութերի ստացման գույակցված՝ փոշեհրամետալուրգիական տեխնոլոգիական ուրվագիծ, ընդ որում՝ նաև գործընթացի լավարկված ցուցանիշները: Համաձայն աշխատանքում բերված տեսական աղբյուրների տեղեկությունների՝ ստացված բաղադրանյութը հնարավոր է կիրառել տեխնիկայի տարբեր ոլորտներում՝ էլեկտրական շարժիչների ստատորների ու ռոտորների, տրանսֆորմատորների միջուկների, բարձրահաճախական կոճերի պատրաստման նպատակներով: Մյուս կողմից՝ ակներև է հետազոտությունում ստացված արտադրանքի բնութագրերը մանրամասնելու անհրաժեշտությունը, որոնց շարքում առաջնահերթը էլեկտրամագնիսական հատկություններն են:

Հետազոտությունը կատարվել է ՀԱՊՀ «Միկրո- և նանոէլեկտրոնիկա» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայի գիտական ծրագրերի շրջանակում:

## ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Патент RU 2400850 С1. Магнитный полупроводниковый материал / **Т.И. Конешова, Э.А. Тищенко.** - Оpubл. 27.09.2010.
2. **Макарова Т.Л.** Магнитные свойства углеродных структур // Физика и техника полупроводников. - 2004. - Том 38, вып. 6. - С. 641-664.
3. Патент RU 2392680 С2. Полупроводниковый ферромагнитный материал / **Г.Д. Нипан, В.А. Кецко, Т.Н. Кольцова и др.** - Оpubл. 20.06.2010.
4. Патент RU 2794652 С1. Магнитомягкий аморфный материал на основе Fe-Ni в виде ленты/ **Д.А. Мильков, Э.Н. Занаева, А.И. Базлов и др.** - Оpubл. 24.04.2023.
5. **Алоян П.Г., Алоян Г.П.** Металлоносность черносланцевых (терригенно-углеродистых) комплексов Армении // Изв. НАН РА. Науки о Земле.- 2003. - № 3. - С. 8 - 13.
6. **Մարտիրոսյան Վ.Հ., Աղբալյան Ս.Գ.** Մետալուրգիական գործընթացների հավասարակշռության թերմոդինամիկա: Ուսումնական ձեռնարկ. – Եր.: Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարան, 1999. - 51 էջ:
7. **Ботавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В.** Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. - М.: Радио и связь, 1985. - 264 с.
8. [http://www.google.com /search?sca-esv=...](http://www.google.com/search?sca-esv=...) = модификации + графит.
9. А.с. СССР № 276926. Способ получения карборунда / **В.И. Родин.** - Оpubл. 15.10.1970.
10. ru. Wikipedia. Org / Wiki / Силицид-железа. Патент RU 2383493 С1. Способ карбо-термического восстановления кремния / **Л.В. Черняковский, Ю.Т. Анатольевич, И.В. Янчевский, А.А. Тороев.** - Оpubл. 10.03.2010.
11. **Саенко Н.С., Зиятдинов А.М.** Ферромагнитные нанокomпозиты на основе многослойных углеродных нанотрубок, полученные каталитическим пиролизом метана // Химия и химическая технология. - 2015. - Том 58, вып. 5. - С. 10-13.
12. **Афанасьев Н.И., Лепакова О.К.** Синтез композиционных материалов на основе МАХ-фазы  $Ti_3SiC_2$ , содержащей бориды // Новые материалы и технологии в космической технике / Томский научный центр СО РАН. - 2018. - Том 2, №4(26). - С. 225-228.
13. **Сметкин А.А., Каченюк М.Н.** Механосинтез и характеристики порошковых композиций Ti-Si и Ti-SiC-C // Керамика и композиционные материалы: Тез. докл. V Всерос. конф. – Сыктывкар, 2004. - С. 115.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 03.06.2025:

**С.Г. АЙРАПЕТЯН, Н.В. МАРТИРОСЯН, О.Г. ГЕВОРГЯН**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПИРОЛИЗОМ УГЛИСТЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ**

Современное производство электротехнических и полупроводниковых приборов требует использования материалов, которые наделены широким спектром функциональных свойств. Особый интерес в этом контексте представляют полупроводниковые элементы углерод и кремний и химические структуры на их основе, которые способствуют разработке ряда новых ферромагнитных и ферримагнитных материалов, отвечающих требованиям современной техники, а также прогрессу технологий их производства. Традиционные методы производства характеризуются высокой энергоемкостью и использованием дорогостоящего сырья, что существенно увеличивает себестоимость продукции.

В рамках данного прикладного исследования изучается техническая возможность использования угленосных формаций Армении в качестве сырья для вышеуказанных целей. Для этого используется метод высокотемпературного пиролиза, направленный на технологическую переработку местного углеродного сырья. В результате процесса пиролиза формируются композиционные материалы на основе полупроводниковых фаз - карбида кремния с кубической структурой (муассанит 3С), графита типа 3R и ферросилиция состава  $Fe_5Si_3$ .

**Ключевые слова:** углеродные образования, сырье, электромагнитные композиты, полупроводниковые элементы, композиционные материалы.

**S.G. HAYRAPETYAN, N.V. MARTIROSYAN, O.G. GEVORGYAN**

**ELECTROMAGNETIC MATERIALS BASED ON SILICON CARBIDE AND CARBON ELEMENTS OBTAINED BY PYROLYSIS OF CARBON FORMATIONS OF REPUBLIC OF ARMENIA**

Modern production of electrical and semiconductor devices requires the use of materials that have a wide range of functional properties. Of particular interest in this context are the semiconductor elements carbon and silicon and chemical structures based on their compounds, which favour the development of a number of ferromagnetic and ferromagnetic materials, at meeting the requirements of modern technology, as well as the progress of their production technologies. Traditional production methods are characterized by high energy intensity and the use of expensive raw materials, which significantly increases the cost of production.

Within the framework of this applied research, the technical feasibility of using coal-bearing formations of Armenia as raw materials for the above-mentioned purposes is studied. For this purpose, the high-temperature pyrolysis method is used, aimed at technological processing of local carbon raw materials. As a result of the pyrolysis process, composite materials are formed based on semiconductor phases - silicon carbide with a cubic structure (moissanite 3C), graphite type 3R and ferrosilicon of the composition  $Fe_5Si_3$ .

**Keywords:** carbon formations, raw materials, electromagnetic composites, semiconductor elements, composite materials.

**Կ.Վ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ**

**ԳԵՏԱՅԻՆ ՏԻՊԻ ՊՈՉԱՄԲԱՐՆԵՐԻՑ ՊՈՉԱՅԻՆ ՆՍՏՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԵՌԱՑՄԱՆ  
ՆՈՐ ՍԱՐՔԻ ՆԵՐԴՐՄԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ-ՏՆՏԵՍԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏԱԿԱՆԸ**

Օգտակար հանածոների հարստացման ժամանակ առաջացած միլիոնավոր տոննաներով հանքահարստացման պոչերը պահեստավորվում են պոչամբարներում և պարունակում են մետաղական օգտակար բաղադրիչների զգալի պաշարներ: Վերջիններիս՝ երկրորդային հումքի ստացման տեխնոլոգիաների վերամշակման հեռանկարները վաղուց գտնվում են ոլորտի մասնագետների ուշադրության կենտրոնում: Դրանց վերամշակման արդյունավետության բարձրացման համար դիտարկվում են օգտակար հանածոների վերամշակման ժամանակակից տեխնոլոգիաների կիրառման հնարավորությունները: Դրանցով հնարավոր կլինի բարձրացնել պոչային նստվածքներից զգալի արժեք ներկայացնող օգտակար մետաղական բաղադրիչների կորզման արդյունավետությունը:

Տեխնոլոգիաների հումքի երկրորդային վերամշակման համար, տեխնոլոգիական սխեմաների կիրառման հետագա արդյունավետության բարձրացումից բացի, առանձնահատուկ կարևորություն ունեն նաև պոչամբարներից պոչերի հեռացման և մինչև հարստացուցիչ ֆաբրիկա տեղափոխման հետ կապված ինժեներական լուծումների մշակումը ու վերջիններիս կիրառման տեխնիկա-տնտեսական հիմնավորումը: Պոչամբարների դատարկման ներկայումս առավել հայտնի եղանակներից են հիդրավլիկական մեթոդների կիրառմամբ եղանակները՝ հիդրոմոնիտորների կամ հողածուծ մեքենաների օգտագործմամբ:

Հողվածում բերված է գետային տիպի պոչամբարներից պոչային նստվածքների հեռացման՝ հեղինակի կողմից մշակված արտոնագրված սարքի և վերջինիս ամենամոտ նմանակի կիրառման տեխնիկա-տնտեսական վերլուծությունն ու գնահատականը: Գետային տիպի պոչամբարների դատարկման հայտնի սարքերի կիրառման հավասար պայմանների ապահովման համար ընտրվել է «Զանգեզուրի ՊՄԿ» ՓԲ ընկերության կողմից Ողջի գետի վրա կառուցված և ներկայումս կոնսերվացված համանուն պոչամբարը:

**Առանցքային բառեր.** պոչային նստվածք, պոչամբար, սարք, ինքնարժեք, ծախս, կապիտալ ներդրում, գումարային բերված ծախսեր, արդյունավետություն:

**Ներածություն.** Լեռնահանքային ձեռնարկությունների կոնսերվացված պոչամբարներում կուտակված հանքահարստացման պոչերը պարունակում են օգտակար մետաղական բաղադրիչների զգալի պաշարներ, որոնց արդյունահանման և վերամշակման նկատմամբ հետաքրքրությունը տարեցտարի ավելանում է՝ պայմանավորված օգտակար հանածոների հարստացման ժամանակակից նոր մեթոդների և գոյություն ունեցող տեխնոլոգիաների շարունակական զարգացմամբ:

Տեխնածին ծագում ունեցող թափոնների՝ որպես երկրորդային հումքի վերամշակման խնդիրները, հատկապես վերջին տասնամյակներին, գտնվում են գիտական և արդյունաբերական շրջանակների մասնագետների ուշադրության կենտրոնում:

Կոնսերվացված պոչամբարների վերամշակման տնտեսական արդյունավետության գնահատման առաջնային գործոններից է պառկած պոչերից մետաղական բաղադրիչների կորզման տարբեր տեխնոլոգիաների կիրառման արդյունավետության ուսումնասիրությունը: Դրա հետ մեկտեղ՝ շատ կարևոր է պոչամբարներից պոչերի հեռացման գործընթացի կազմակերպմանն առնչվող տարաբնույթ ինժեներա-տեխնիկական խնդիրների լուծումը: Վերջիններս կապված են հանքահարստացման պոչերի տեխնածին հանքավայրերի արդյունավետ և անվտանգ յուրացման հետ և պահանջում են համապարփակ տեխնիկա-տնտեսական հիմնավորում և ներառում են ժամանակակից վերլուծական և տեխնոլոգիական խնդիրների լուծումներ, որոնք կոնկրետ լեռնաերկրաբանական ռելիեֆային և բնակլիմայական պայմանների հետ կապված՝ շատ հաճախ դառնում են ավելի բարդ ու տնտեսապես ոչ ձեռնտու: Պոչամբարների դատարկման և պոչային նստվածքներից մետաղական օգտակար բաղադրիչների կորզման աշխատանքների կատարումը սերտ կապված է բնապահպանական մշտադիտարկումների, խախտված հողերի ռեկուլտիվացիայի և հարակից տարածքների վերականգնման ինժեներատեխնիկական մեխանիզմների ստեղծման հետ, հիմք ստեղծելով շրջակա միջավայրի երկարաժամկետ և հուսալի պահպանության համար [1 - 3]:

Ջրահագեցած և թույլ կապակցված պոչանքային նստվածքներով կոնսերվացված պոչամբարներում ավանդական հանույթաբարձման սարքավորումների կիրառման արդյունավետությունը ցածր է: Ուստի ներկայումս նախագծվում և կիրառվում են պոչամբարների դատարկմանն ուղղված բազմաթիվ մեթոդներ, սարքեր և տեխնոլոգիական լուծումներ, որոնք հաճախ կիրառելի են միայն պոչամբարների տեղադրման կոնկրետ ռելիեֆային և լեռնաերկրաբանական պայմաններում: Ներկայումս գործնականում առավել տարածում են գտել պոչամբարների դատարկման համար հիդրավլիկական տեխնոլոգիաների կիրառման հետ կապված սարքերն ու մեթոդները, որոնք ապահովում են կոնսերվացված պոչամբարներից պոչերի հեռացումը՝ նվազեցնելով շրջակա միջավայրի վրա բացասական ազդեցությունը, միաժամանակ ապահովելով աշխատանքների կատարման անվտանգությունն ու արդյունավետությունը:

**Խնդրի դրվածքը.** Հայտնի է գետային տիպի պոչամբարներից պոչային նստվածքների հեռացման մեր կողմից մշակված և արտոնագրված սարքը, որն ունի պոչամբարի տարածքից դուրս տեղակայված անշարժ հենասյուներ, գլխավոր ճոպաններով դրանց ամրակցված աշխատանքային հարթակ և դրա տակ ուղղաձիգ տեղաշարժման հնարավորությամբ տեղակայված սյունավոր հիմքով աշտա-

րակ, որի վերևի մասն իրականացված է այունների միջև տեղակայված սուզարկղի տեսքով: Աշխատանքային հարթակի վրա տեղակայված են ձգիչ կարապիկներ, որոնց ճոպանների ազատ ծայրերն ամրացված են աշտարակին: Սուզարկղի ստորին մասում տեղակայված են ապարախյուսի հեռացման խողովակաշարին միացված ապարախյուսային պոմպ և ջրի մատակարարման խողովակաշարին միացված բարձր ճնշման կցափողեր: Գլխավոր ճոպանները ձգված են միմյանց զուգահեռ՝ մեկ հորիզոնական հարթության մեջ, իսկ աշխատանքային հարթակն իրականացված է ճոպանների երկայնքով տեղաշարժման հնարավորությամբ սայլակի տեսքով, որն անիվներով հենված է գլխավոր ճոպանների վրա: Մարքը լրացուցիչ ունի քարշափոխադրիչ կարապիկի տեսքով իրականացված շարժաբեք, որը տեղակայված է միննույն կողմում գտնվող անշարժ հենասյունների մոտակայքում և որի շարժաբեք ճոպանը ձգված է անշարժ հենասյունների միջև՝ գլխավոր ճոպաններին զուգահեռ, ու կոշտ ամրակցված է աշխատանքային հարթակին [4]:

Հայտնի է նաև գետային տիպի պոչամբարների դատարկման եղանակի իրագործման համար կիրառվող մեկ այլ սարք [5], որի համաձայն՝ պոչամբարը դատարկում են ջրանետիչների (հիդրոմոնիտորների) և հողածուծ մեքենայի միջոցով: Այս տեխնիկական լուծման համաձայն՝ պոչամբարում անցկացնում են խրամափոս, այն լցնում են ջրով, որի արդյունքում ձևավորում են վերջրյա և ստորջրյա հանքաստիճաններ: Վերջրյա հանքաստիճանները մշակում են ջրանետիչների միջոցով. պոչերը ողողում են և ինքնահոս ձևով ուղղում դեպի ստորգետնյա հանքաստիճան: Ստորգետնյա հանքաստիճանների մշակումն իրականացնում են խրամափոսում տեղադրված լողացող հողածուծ մեքենայով: Այս մեքենայով վերաջրիկացված պոչերը, նախապես անցկացված լողացող և առափնյա խյուսամուկերով, տեղափոխում են վերամշակման: Խրամափոսն անցկացնում են պոչամբարի կողի լողափային և լճակային գոտիների սահմանին: Խրամափոսի հետագա զարգացումը և ջրիկացած պոչերի հեռացումը հողածուծ մեքենայով իրականացնում են լճակի ուղղությամբ՝ լայնական-զուգահեռ ընթացաշերտերով: Յուրաքանչյուր հաջորդ ընթացաշերտի խրամափոսում ջրի հայելու մակարդակը իջեցնում են լողափային գոտու թեքության չափով և աստիճանաբար մեծացնում են ստորջրյա հանքաստիճանից պոչանքային խյուսի առքի խորությունը: Ընթացաշերտի վերջին ստորջրյա հանքաստիճանից պոչերի առքն ավարտելուց հետո պոչամբարի դիմադիր պատվարի կողմից իրականացնում են վերջրյա հանքաստիճանի ողողահարում:

**Հետազոտության արդյունքները.** Գետային տիպի պոչամբարներից պոչային նստվածքների հեռացման՝ մեր կողմից արտոնագրված սարքի [4] կիրառման տեխնիկա-տնտեսական հիմնավորման համար որպես ամենամոտ բազային տարբերակ ընտրվել է գետային տիպի պոչամբարների դատարկման հայտնի եղանակը (արտոնագիր №2502 А) [5]: Կատարվել է վերևում նշված տարբե-

րակների օգտագործման տեխնիկա-տնտեսական հիմնավորում՝ համեմատելով դրանց կիրառման համար անհրաժեշտ կապիտալ ներդրումների և շահագործական ծախսերի ծավալները, որոնք ներառում են հայտնի սարքերում կիրառվող հիմնական մեքենաների, սարքավորումների, նյութերի, պահեստամասերի արժեքները, սպասարկող անձնակազմի աշխատավարձը և էներգակիրների ծախսերը: Ընտրված սարքերի կիրառման տեխնիկա-տնտեսական համեմատության համար պայմանականորեն ընտրվել է «Զանգեզուրի ՊՄԿ» ՓԲԸ-ի կողմից Ողջի գետի վրա կառուցված համանուն կոնսերվացված պոչամբարից այդ սարքերով պոչերի հեռացման վրա կատարվելիք ծախսերը: Պայմանականորեն ընտրվել է նաև նոր կառուցվող հանքահարստացուցիչ ֆաբրիկայի տեղադիրքը՝ գետի հոսանքով դեպի ներքև՝ պոչամբարից դեպի հյուսիս-արևելք գտնվող տարածքը: Հաշվարկների համար անհրաժեշտ էլակետային տվյալները բերված են աղ. 1-ում:

Աղյուսակ 1

Պոչամբարից հեռացվող վերաջրիկացված պոչերի ծավալները

№	Ցուցանիշի անվանումը	Չափման միավորը	Ծավալը
1	Պոչամբարից հեռացվող պոչերի քանակը	հազ. տ/տարի	2500,0
		հազ. տ/օր	7,35
		տ/ժամ	306,0
2	Պոչերի տեսակարար կշիռը	տ/մ <sup>3</sup>	1,40
3	Պոչամբարից հեռացման ենթակա պոչերի ծավալը	հազ. մ <sup>3</sup> /տարի	1785,71
		հազ. մ <sup>3</sup> /օր	5,25
		մ <sup>3</sup> /ժամ	429,0
4	Պոչերի վերաջրիկացման արդյունքում ստացվող ապարախյուսի թանձրությունը	պինդ	1
		հեղուկ	3,2
5	Վերաջրիկացված ապարախյուսի ելքը	հազ. մ <sup>3</sup> /տարի	9785,71
		հազ. մ <sup>3</sup> /օր	28,78
		հազ. մ <sup>3</sup> /ժամ	1,20
		մ <sup>3</sup> /վրկ	0,33
6	Տեխնիկական ջրի ծախսը	մ <sup>3</sup> /վրկ	0,27
7	Տարվա մեջ աշխատանքային օրերի քանակը	օր	340
8	Հերթափոխերի քանակը 1 օրում	հերթ.	3
9	Հերթափոխի տևողությունը	ժամ	8

Պոչամբարից տրվող վերաջրիկացված պոչերի (ապարախյուսի) ծավալը հաշվարկվել է հետևյալ արտահայտությամբ [6].

$$Q = \frac{\frac{P}{\gamma P} + P \times H}{N \times T \times t} u^{\beta} / \text{վրկ}, \quad (1)$$

որտեղ  $P$  – ն պոչամբարից հեռացվող պառկած պոչերի տարեկան քանակն է,  $u$ ,  $H$  – ը՛ ապարախյուսում հեղուկ և պինդ ֆազերի հարաբերակցությունը,  $\gamma P$  – ն՛ պառկած պոչերի տեսակարար կշիռը,  $u/u^{\beta}$ ,  $N$  – ն՛ տարվա մեջ աշխատանքային օրերի քանակը  $օր$ ,  $T$  – ն՛ օրվա տևողությունը,  $\partial u$ ,  $t$  – ն՛ 1 ժամում վայրկյանների քանակը,  $\text{վրկ}$  :

Բանաձևի (1) մեջ տեղադրելով  $P=2,5 \times 10^6$   $u$ ,  $H=3,2$ ,  $\gamma P=1,40$   $u/u^{\beta}$ ,  $N=340$   $օր$ ,  $T=24$   $\partial u$  և  $t=3600$   $\text{վրկ}$  արժեքները, կստանանք.

$$Q = \frac{\frac{2,5 \times 10^6}{1,40} + 2,5 \times 10^6 \times 3,2}{340 \times 24 \times 3600} = 0,33 \text{ } u^{\beta} / \text{վրկ}:$$

Աղ. 2-ում բերված են համեմատվող տարբերակների իրագործման համար անհրաժեշտ կապիտալ ներդրումների մեծությունները՝ տեխնոլոգիական մեքենաների և սարքավորումների ձեռքբերման համար:

Համեմատվող տարբերակների կիրառման համար անհրաժեշտ կապիտալ ներդրումների և շահագործողական ծախսեր կազմող աշխատավարձի ֆոնդի, վառելիքի, նյութերի, էներգետիկ ծախսերի և ամորտիզացիոն հատկացումների հանրագումարը բերված է աղ. 3-ում:

Անհրաժեշտ գումարային բերված ծախսերը՝ ըստ տարբերակների, որոշվում են հայտնի արտահայտությամբ հետևյալ բանաձևով [7].

$$C_{\text{բ}} = C_i + E_0 K_i, \text{ մլն. դրամ/տարի}, \quad (2)$$

որտեղ  $C_i$ - ն ինքնարժեքի ծախսերի գումարն է մեկ տարում,  $\text{մլն. դրամ}$ ,  $E_0$ - ն՛ կապիտալ ներդրումների նորմավորված արդյունավետության գործակիցը,  $\text{դրամ/դրամ-տարի}$  (0,14...0,16), ընդունվում է 0,15,  $K_i$ -ն՛ լրիվ կապիտալ ներդրումների գումարը,  $\text{մլն. դրամ}$ :

Ինքնարժեքը կազմող հոդվածների ծախսերի գումարը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ.

$$C_i = C_{\text{աֆ}} + C_{\text{ա}} + C_{\text{գ}} + C_{\text{լ}} + C_{\text{է}} \text{ մլն. դրամ}, \quad (3)$$

որտեղ  $C_{\text{աֆ}}$ - ը լրիվ աշխատավարձի ֆոնդն է,  $\text{մլն. դրամ}$ ,  $C_{\text{ա}}$ - ն՛ հիմնական միջոցների ամորտիզացիան,  $\text{մլն. դրամ}$ ,  $C_{\text{գ}}$ - ն՛ վառելիքի ծախսը,  $\text{մլն. դրամ}$ ,  $C_{\text{լ}}$ - ն՛ նյութերի ծախսը,  $\text{մլն. դրամ}$ ,  $C_{\text{է}}$ - ն՛ էներգետիկ ծախսը,  $\text{մլն. դրամ}$ :

Համեմատվող տարբերակների կապիտալ ներդրումները տեխնոլոգիական մեքենաների և սարքավորումների ձեռքբերման համար

№	Տեխնոլոգիական մեքենաների և սարքավորումների անվանումը	Չափման միավորը	Քանակը	Միավորի արժեքը, մլն. դրամ	Գինը, մլն. դրամ
<b>Տարբերակ I</b> (արտոնագիր №2502 A)					
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
1.1	Թրթուրավոր Լքսկավատոր CAT 390FL, շերտի ծավալը 3,9 մ <sup>3</sup> , շարժիչը՝ C18 ACERT	հատ	1	471,30	471,30
1.2	Ճահճային բուլդոզեր XCMG TSY230G	հատ	1	126,32	126,32
1.3	Ջրանետիչ/հիդրոնոնիտոր GM-300 մակնիշի	հատ	4	11,60	46,40
1.4	Լողացող կայանք՝ հողածուծ սարքով ՅՔԸ 1600/25	հատ	1	64,0	64,0
1.5	Վերաջրիկացած պոչերի արտամղման / հեռացման խողովակաշար Ø325x20 մմ	զծ. մ	3100,0	0,05	139,66
1.6	Լողուն խողովակաշարի մոնտաժման համար նախատեսված պոնտոններ (կամբջանավեր)	հատ	100	0,07	6,73
1.7	Տեխնիկական ջրի մատակարարման առափնյա խողովակաշար Ø250x5 մմ ГОСТ 8734-75 Ст. 09	զծ. մ	2300,0	0,03	61,15
1.8	Առափնյա խողովակաշարի ջրանետ ճյուղ Ø250x5 մմ/ГОСТ 8734-75 Ст. 09	զծ. մ	680,0	0,03	18,08
1.9	Տեխնիկական ջրի մղման պոմպակայան BA-C250H45 D610, Q=1,400 մ <sup>3</sup> /ժամ, H=85 մ	հատ	1	80,0	80,0
1.10	Մանիպուլյատոր КамАЗ-43114С (6x6) մեքենայի հիմքի վրա	հատ	1	66,91	66,91
1.11	Ավտոկռունկ՝ XCMG XCT16-1, 16 տ բեռնունակությամբ	հատ	1	65,35	65,35
<b>Ընդամենը</b>		-	-	-	<b>1145,89</b>

Աղյուսակ 2-ի շարունակությունը

1	2	3	4	5	6
1.12	Օժանդակ նյութեր և սարքավորումներ	-	-	20%	229,18
1.13	Տեղափոխման ծախսեր	-	-	5%	57,29
1.14	Տեղադրման ծախսեր	-	-	10%	114,59
<b>Ընդհանուրը</b>		-	-	-	<b>1546,95</b>

**Տարբերակ II. Համաձայն գետային տիպի պոչամբարների դատարկման մեր կողմից մշակված սարքի [4]**

2.1	Ճահճային բուլլոզեր XCMG TSY230G	հատ	1	126,32	126,32
2.2	Ջրանետիչ/հիդրոմոնիտոր ԴՄ-300 մակնիշի	հատ	4	11,60	46,40
2.3	Վերաջրիկացած պոչերի արտամիման/հեռացման խողովակաշար Ø325x20 մմ	զծ. մ	2000,0	0,05	90,10
2.4	Տեխնիկական ջրի մատակարարման առափնյա խողովակաշար Ø250x5 մմ ГОСТ 8734-75 Ст. 09	զծ. մ	2300,0	0,03	61,15
2.5	Տեխնիկական ջրի մղման պոմպակայան BA-C250H45 D610, Q=1,400 մ <sup>3</sup> /ժամ, H=85 մ	հատ	1	80,0	80,0
2.6	Սնամեջ պուներով մետաղական աշտարակ	հատ	1	8,0	8,0
2.7	Սուզարկղ	հատ	1	4,0	4,0
2.8	Ապարախյուսային պոմպ, H=150 մ, 132 կՎտ	հատ	1	36,0	36,0
2.9	Հորիզոնական տեղադրված ջրանետիչ կցափողեր	հատ	4	2,8	11,2
2.10	Ուղղահայաց տեղադրված ջրանետիչ կցափողեր	հատ	4	2,8	11,2
2.11	Աշխատանքային հարթակ կառավարման մեխանիզմներով և հանգույցներով	հատ	1	12,5	12,5
2.12	Ձգիչ կարապիկներ ձգիչ ճոպանների հետ միասին	հատ	4	2,0	8,0
2.13	Պոչամբարի սահմաններից դուրս տեղադրված անշարժ հենասյուներ	հատ	2	9,04	18,07
2.14	Գլխավոր ճոպաններ	զծ. մ	1600,0	0,002	2,88

Աղյուսակ 2-ի շարունակությունը

1	2	3	4	5	6
2.15	Քարշափոխադրման կարապիկ	հատ	1	6,21	6,21
2.16	Քարշափոխադրման կարապիկի շարժաբեր ճոպան	զծ. մ	800,0	0,002	1,44
2.17	Ճոպանների ձգման մեխանիզմներ	հատ	2	14,98	29,96
2.18	Գլխավոր ճոպաններին ամրացված հատուկ ամրաններ	հատ	20	0,48	9,6
2.19	Մանիպուլյատոր KamAZ-43114C (6x6) մեքենայի հիմքի վրա	հատ	1	66,91	66,91
2.20	Ավտոկրունկ XCMG XCT16-1, 16 տ բեռնունակությամբ	հատ	1	65,35	65,35
<b>Ընդամենը</b>		-	-	-	<b>695,28</b>
2.21	Օժանդակ նյութեր և սարքավորումներ	-	-	20%	139,06
2.22	Տեղափոխման ծախսեր	-	-	5%	34,76
2.23	Տեղադրման ծախսեր	-	-	10%	69,53
<b>Ընդհանուրը</b>		-	-	-	<b>938,63</b>

Աղ. 3-ում բերված տվյալների հիման վրա ինքնարժեքը կազմող ծախսերի հանրագումարը համեմատվող 1 և 2 տարբերակների դեպքում համապատասխանաբար կկազմի.

$$C_1 = 0,542 \times 10^9 + 0,275 \times 10^9 + 1,525 \times 10^9 + 0,040 \times 10^9 + 0,036 \times 10^9 = 2,418 \times 10^9 \text{ դրամ},$$

$$C_2 = 0,521 \times 10^9 + 0,159 \times 10^9 + 1,124 \times 10^9 + 0,033 \times 10^9 + 0,038 \times 10^9 = 1,876 \times 10^9 \text{ դրամ}:$$

Լրիվ կապիտալ ներդրումները 1 և 2 տարբերակների համար (աղ. 3) կազմել են համապատասխանաբար.

$$K_1 = 1,547 \times 10^9 \text{ դրամ},$$

$$K_2 = 0,939 \times 10^9 \text{ դրամ}:$$

Համեմատվող տարբերակների կապիտալ ներդրումները և տարեկան շահագործական անփոփ ծախսերը

№	Ծախսերի հոդվածները	Քանակն ըստ տարբերակների		Չափման միավորը	Համեմատվող տարբերակներ	
		I	II		I	II
1	2	3	4	5	6	7
1	Կապիտալ ներդրումների արժեքը մեքենաների և սարքավորումների ձեռքբերման համար	-	-	մլն. դրամ	1546,95	938,63
2	Շահագործական ծախսեր, այդ թվում՝	-	-	մլն. դրամ	2417,60	1875,53
2.1	աշխատավարձի լրիվ ֆոնդն ըստ աշխատողների ընդհանուր քանակի	56	54	մլն. դրամ	541,70	521,34
2.2	հիմնական միջոցների քանակը դրանց ամորտիզացիայի ծախսերի որոշման համար (հատ)	113	53	մլն. դրամ	274,88	159,12
2.3	վառելիքի ծախսը սարքի և այլ սարքավորումների շահագործման համար (հազ. լ)	282 4	2081	մլն. դրամ	1524,85	1123,86
2.4	նյութերի ծախս սարքի և այլ սարքավորումների շահագործման համար	-	-	մլն. դրամ	40,12	32,89
2.5	էներգետիկ ծախսեր սարքի և այլ սարքավորումների շահագործման համար (ՄՎտ/ժ)	145 7	1548	մլն. դրամ	36,05	38,31
Ընդհանուրը		-	-	մլն. դրամ	3964,55	2814,16
3	Գումարային բերված ծախսեր	-	-	մլն. դրամ	2649,65	2016,32
1 տ պոչերի հեռացման գումարային բերված ծախսերը		-	-	դրամ/տ	1'059,86	806,53

Տեղադրելով արժեքները (2) արտահայտության մեջ՝ կստանանք. I տարբերակի դեպքում՝

$$C_{F1} = 2,418 \times 10^6 + 0,15 \times 1,547 \times 10^6 = 2,650 \times 10^9 \text{ դրամ/տարի:}$$

II տարբերակի դեպքում՝

$$C_{\text{բ2}} = 1,876 \times 10^6 + 0,15 \times 0,939 \times 10^6 = 2,016 \times 10^9 \text{ դրամ/տարի:}$$

1 *տ* պոչերի հեռացման ինքնարժեքը յուրաքանչյուր տարբերակի համար հաշվարկվել է հետևյալ բանաձևով.

$$C = \frac{C_{\text{բ}}}{Q} \text{ դրամ/տ,} \quad (4)$$

որտեղ  $Q$  –ն պոչամբարից պառկած պոչերի հեռացման քանակն է 1 տարում, համաձայն աղ. 1-ի՝ կազմում է  $Q = 2,5 \times 10^6$  տ:

1 *տ* պոչերի հեռացման ինքնարժեքը, համեմատության համար ընտրված 1 և 2 տարբերակների դեպքում, համապատասխանաբար կկազմի.

$$C_1 = \frac{2,650 \times 10^6}{2,5 \times 10^6} = 1059,86 \text{ դրամ/տ,}$$

$$C_2 = \frac{2,016 \times 10^6}{2,5 \times 10^6} = 806,53 \text{ դրամ/տ:}$$

Ողջի գետի վրա տեղադրված կոնսերվացված պոչամբարից պառկած պոչերի հեռացման համար առաջարկված նոր սարքի և համեմատության համար ընտրված եղանակի դեպքում նոր սարքի կիրառման տնտեսական շահավետությունը 1 տարում կկազմի.

$$P = (1059,86 - 806,53) \times 2,5 \times 10^6 \text{ դրամ:}$$

### **Եզրակացություն.**

1. Կատարվել է Ողջի գետի հունում կազմավորված և ներկայումս կոնսերվացված գետային տիպի պոչամբարից հեղինակի կողմից մշակված նոր սարքով և դրան ամենամոտ նմանակ սարքով պոչային նստվածքների հեռացման տեխնիկատնտեսական տարբերակների համեմատությունը:

2. Գումարային բերված ծախսերի համեմատությունից երևում է, որ մեր կողմից մշակված և արտոնագրված սարքի կիրառության դեպքում պոչամբարից 1 *տ* վերաջրիկացված պոչերը դեպի հանքահարստացուցիչ ֆաբրիկա տեղափոխման ծախսերը կազմել են 806,53 *դրամ*, իսկ համեմատության համար ընտրված տարբերակի համար՝ 1059,86 *մլն. դրամ*:

3. Հիմնավորվել է, որ Ողջի գետի վրա կառուցված կոնսերվացված պոչամբարից 1 *տ* պոչերի հեռացման գումարային բերված ծախսերը, մեր կողմից արտոնագրված սարքի կիրառության դեպքում, 31,41 %-ով ցածր է՝ համեմատած ընտրված ամենամոտ նմանակի օգտագործման ծախսերի հետ:

## ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Архипов А.В., Решетняк С.П.** Техногенные месторождения. Разработка и формирование: Монография.- ФАНО России, Кольский научный центр РАН, Горный институт КНЦ РАН, 2017. - 175 с.
2. **Якубенко Л.В., Гулямов Б.С.** Систематизация технологических схем открытой разработки техногенных месторождений//ГИАБ.- 2008.- №5.-С. 254–262.
3. **Шапарь А.Г., Копач П.И., Якубенко Л.В., Гулямов Б.С.** Технологические аспекты разработки техногенных месторождений на базе шламохранилищ// ГИАБ.- 2006.- №9.-С. 259–267.
4. **Արտոնագիր №793Y, AM20220052Y, E21C 45/00, E02F 3/00:** Գետային տիպի պոչամբարներից նստվածքների հեռացման սարք/ **Լ. Մանուկյան, Կ. Հարությունյան, Տ. Մանուկյան, Մ. Գևորգյան;** ՀՀ մտավոր սեփականության գործակալություն.- Երևան, 2023.- էջ 14:
5. **Արտոնագիր №2502A, AM20090097, E21C 41/00, E02B 7/00:** Գետային տիպի պոչամբարների դատարկման եղանակ/ **Ս. Արզումանյան, Լ. Մանուկյան, Ա. Մկրտումյան, Ա. Կալպակչյան, Գ. Ղազարյան, Է. Սարգսյան, Ա. Ղազարյան;** ՀՀ մտավոր սեփականության գործակալություն.- Երևան, 2011.- էջ 17:
6. **Бальян Л.Г., Барина И.А., Месяцева Л.И.** Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности/ ВНИИ ВОДГЕО.- М.: Стройиздат, 1986.-128 с.
7. **Գևորգյան Հ.Գ.** Ընդերքաբանական ձեռնարկությունների տնտեսագիտություն. Ուսումնական ձեռնարկ.- Երևան: ՀՀ Կրթության և գիտության նախարարություն, Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարան, 2003.- 114 էջ:

Ջանգեզուրի պղնձամոլիբդենային կոմբինատ ՓԲԸ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 03.03.2025:

**К.В. АРУТЮНЯН**

### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ХВОСТОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ИЗ ХВОСТОХРАНИЛИЩ РЕЧНОГО ТИПА**

В хвостах обогащения, образующихся в процессе обогащения полезных ископаемых и хранящихся в хвостохранилищах, содержатся остаточные запасы металлических компонентов. Перспективы их переработки давно находятся в центре внимания специалистов отрасли как источника получения вторичного сырья. Для оценки эффективности переработки рассматривается возможность применения современных технологий обогащения полезных ископаемых, с помощью которых возможно извлечение ценных металлических компонентов из хвостовых отложений.

Помимо эффективности применения технологических схем вторичной переработки хвостов, особую важность имеют также инженерные решения, связанные с удалением этих хвостов из хвостохранилищ и их транспортировкой до обогатительной

фабрики, и технико-экономическая оценка этих решений. В настоящее время одним из наиболее распространённых способов опорожнения хвостохранилищ является гидравлический метод с использованием гидромониторов или землесосов.

В статье представлена сравнительная технико-экономическая оценка применения запатентованного авторами статьи устройства для удаления хвостов из хвостохранилищ речного типа и наиболее близкого к нему прототипа. В качестве базового для сравнения выбрано законсервированное хвостохранилище, сформированное ЗАО «Зангезурский ММК» в ущелье р. Вохчи.

**Ключевые слова:** хвостовые отложения, хвостохранилище, устройство, себестоимость, расходы, капитальные вложения, суммарно приведенные затраты, эффективность.

**K.V. HARUTYUNYAN**

#### **TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE IMPLEMENTATION OF A NEW DEVICE FOR REMOVING TAILINGS FROM RIVER-TYPE TAILING DAMS**

The tailings generated during ore processing and stored in tailings dams contain residual reserves of valuable metallic components. The prospects for their reprocessing have long been in the focus of industry experts as a potential source of secondary raw materials. To assess the efficiency of reprocessing, the application of modern mineral beneficiation technologies is considered, which can enable the extraction of valuable metallic components from tailings deposits.

In addition to the effectiveness of tailings reprocessing schemes, special importance is also given to the engineering solutions related to the removal of these tailings from the tailing dams and their transportation to the processing plant, along with the corresponding technical and economic evaluation. One of the most common methods for emptying tailing dams is the hydraulic method, using hydraulic monitors or dredging machines.

The article presents a comparative technical-economic assessment of the application of patented device by the authors for removing tailings from river-type tailing dams and its closest existing prototype. For the purposes of comparison, a decommissioned tailings dam constructed by “Zangezur Copper Molybdenum Combine” CJSC in the Voghji River gorge was selected as the reference case.

**Keywords:** tailings, tailing dam, device, production cost, expenses, capital investment, total discounted costs, efficiency.

Լ.Ս. ՄԱԻՅԱՆ

ՓՈՔԸ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ԶԱՌԻԹԱՓ ՀԱՆՔԵՐԱԿՆԵՐԻ ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ  
ՄՇԱԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ԱՐՏԱՍԱՀՄԱՆՅԱՆ ՓՈՐՁԻ  
ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Փոքր հզորությամբ գառիթափ հանքամարմինների շահագործման գործում գիտատեխնիկական առաջընթացի զլխավոր ուղղություն, որպես կանոն, դիտարկվում է հանքաքարի արդյունահանման տեխնոլոգիական գործընթացների մեքենայացումը, հատկապես ինքնագնաց լեռնային սարքավորումների և թրթռատեխնիկայի լայն կիրառումն ու օժանդակ աշխատանքների մեքենայացումը:

Անկախ հանքամարմնի հզորությունից՝ մաքրման տարածության լայնության մեծացումը, ի հաշիվ կողային ապարների պոկման, հանգեցնում է արդյունահանման ժամանակ հանքաքարի որակի փոփոխման գործակցի փոքրացմանը, որի հարուցած տնտեսական վնասը որոշակի պայմաններում կարող է գերազանցել աշխատանքի արտադրողականության բարձրացմամբ պայմանավորված հանքաքարի կորզման կրճատվող ծախսերը: Իսկ եթե մաքրման տարածության լայնության մեծացումը պայմանավորված է հանքամարմնի հզորության աճով, ապա հնարավորություն է առաջանում՝ լավացնելու ոչ միայն աշխատանքային պայմանները, այլև հանքաքարի արդյունահանման որակական ցուցանիշները: Հետևաբար, հանքաքարի մաքրահանման աշխատանքների մեքենայացման աստիճանի բարձրացման խնդիրը, որպես մշակման համակարգի կատարելագործման գերակա ուղղություն, կարելի է միանշանակ ընդունելի համարել հանքամարմնի համեմատաբար մեծ հզորության պայմաններում:

Վերը շարադրվածի համատեքստում կարևորվում է փոքր հզորությամբ գառիթափ հանքամարմինների ստորգետնյա մշակման համակարգերի կիրառման համաշխարհային փորձի վերլուծությունը, որը բացահայտել է, մի կողմից՝ փոքրագաբարիտ մեքենայացված համալիրների օգտագործման և, մյուս կողմից՝ անջատ կամ տեսակավոր հանույթ թույլատրող, ինչպես նաև հանույթային տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգերի կիրառման նպատակահարմարությունը:

**Առանցքային բաներ.** հանքաքար, մշակման համակարգ, հզորություն, բարակ հանքերակ, փոքրագաբարիտ, աղբատացում:

**Ներածություն:** Հայաստանում դիտվում է մասնավոր ներդրողի կողմից առանձնակի հետաքրքրություն համեմատաբար փոքր մասշտաբներով, սակայն գունավոր և ազնիվ մետաղներով «հարուստ» հանքավայրերի և հանքերևակումների

նկատմամբ, որոնց յուրացումը պահանջում է ոչ մեծ ֆինանսական միջոցներ և ունի փոքր ռիսկայնություն: Այդպիսիներից են Ալավերդու և Շամլուղի պղնձի, Տերտերասարի և Թունդիքի ոսկի-պղնձի, Շահումյանի, Արմանիսի, Ազատեկի, Լիչքվազ-Թեյի ոսկի-բազմամետաղային և մի շարք այլ հանքավայրերը:

Հանքավայրերը, սովորաբար, ներկայացված են չափազանց բարակ (մինչև 0.6...0.8 *ւ*/ հզորությամբ) և բարակ (0.8 *ւ*-ից մինչև 2.0 *ւ*/ հզորությամբ) զառիթափ (50<sup>0</sup>-ից ավելի անկման անկյամբ) հանքերակներով:

Չափազանց բարակ հանքամարմինների դեպքում հանքախորշում բնականոն աշխատանքային պայմաններ ստեղծելու համար, հանքաքարի մաքրահանմանը զուգընթաց, իրականացվում է պարփակող կողային ապարների պոկում: Անվտանգության կանոններով սահմանված է, որ զառիթափ հանքամարմնի դեպքում մաքրման տարածության նվազագույն լայնությունը պետք է լինի 0.6...0.8 *ւ*, որով որոշվում են չափազանց բարակ հանքամարմինների հզորության վերին սահմանները:

Բարակ հանքամարմինների դեպքում շահագործական բլոկի նախապատրաստական փորվածքների անցկացման համար հիմնականում պահանջվում է պարփակող ապարների պոկում, իսկ հանքաքարի մաքրահանման ժամանակ պարփակող ապարների պոկում չի պահանջվում:

Չափազանց բարակ և բարակ հանքամարմինների շահագործումը, որպես կանոն, բնութագրվում է ցածր տեխնիկատնտեսական ցուցանիշներով. հանքախորշային բանվորի աշխատանքի փոքր արտադրողականություն, շահագործական բլոկի մշակման ցածր ինտենսիվություն և ընդերքից հանքաքարի կորզման ցածր որակաքանակական ցուցանիշներ [1]:

Հայաստանում չափազանց բարակ և բարակ զառիթափ հանքերակների որոշակի մասեր, որպես կանոն, մշակվել կամ մշակվում են համախառն հանույթ ապահովող համակարգերով, որոնց դեպքում առաջանում է բավականին մեծ՝ նվազագույնը 1.2...1.5 *ւ*, մաքրման տարածության լայնություն:

Մաքրման տարածության լայնության մեծացումը, ի հաշիվ կողային ապարների պոկման, հանգեցնում է արդյունահանման ժամանակ հանքաքարի գերադքատացման, որի հարուցած տնտեսական վնասը որոշակի պայմաններում կարող է գերազանցել աշխատանքի արտադրողականության բարձրացմամբ պայմանավորված հանքաքարի արդյունահանման կրճատվող ծախսերը:

Վերը շարադրվածի համատեքստում կարևորվում են համաշխարհային փորձի հետազոտումը և արդյունավետության բարձրացման ուղիների բացահայտումը:

**Ինդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը:** Չափազանց բարակ և բարակ հանքամարմինների շահագործման գործում հայտնի է արտադրական գործընթացների մեքենայացման երկու մոտեցում. շահագործական բլոկի նախապատրաս-

տական-կտրման ու մաքրման աշխատանքներում հորատման սարքավորումների և փոքրագաբարիտ բարձող-առբերող մեքենաների զուգակցում և ուղղաձիգ հանքախորշերով հանքամարմինների մշակման համար մաքրման մեքենայացված համալիրների օգտագործում [2]:

Փոքր հզորությամբ գառիթափ հանքամարմինների ստորգետնյա մշակման արդյունավետության բարձրացման ուղիների որոնման հարցերը մշտապես գտնվել են մեծ թվով հետազոտողների ուշադրության կենտրոնում, քանի որ այդպիսի հանքամարմիններն ունեն հանքաքարի փոքր պաշարներ, հաճախ բարդ մորֆոլոգիա (ձևաբանություն), փոփոխական հզորություն, տարածման երկարություն և անկման խորություն, ոչ հազվադեպ անկայուն հանքաքար և պարփակող ապարներ:

Օգտագործվել են խնդրին վերաբերող նյութերի հավաքագրման, համակարգման և վերլուծության մեթոդներ:

**Հետազոտության արդյունքները:** Մասնագիտական գրականության և գործնական տվյալների հավաքագրումը թույլ է տվել առանձնացնել վերոհիշյալ հարցին նվիրված մի շարք աշխատանքներ:

Մեքենայացված համալիրների և փոքրագաբարիտ ինքնագնաց սարքավորումների ներդրմամբ հանքաքարի կորզման արմատական կատարելագործման օրինակներ են բերված [3-9] աշխատանքներում:

Փոքր հզորությամբ հանքերակների շահագործման արդյունավետության բարձրացման համար ոչ պակաս կարևոր դեր ունեն կազմակերպչատեխնիկական և տնտեսական համալիր միջոցառումները [10-12]:

Չափազանց կարևորվում է հանքաքարի աղքատացման նվազեցմանն ուղղված տարաբնույթ միջոցառումների և առաջարկությունների կիրառումը [13-18]:

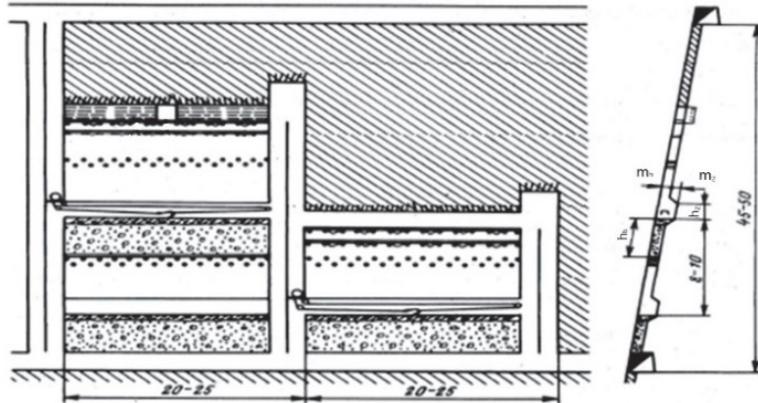
Բավականին ուշագրավ տեխնոլոգիական լուծումներ են տրված [19] աշխատանքում. դիտարկվել են «Ջուլիետա» ստորգետնյա հանքի փոքր՝ 0.8...3.5 մ հզորությամբ, 70...80° անկման անկյամբ ու բավականին կայուն հանքաքարով և պարփակող ապարներով ներկայացված հանքամարմինների մշակման համակարգերը (նկ. 1):

[19] աշխատանքի հեղինակները եկել են այն եզրակացության, որ առաջարկվող տեխնիկատեխնոլոգիական լուծումներն ապահովում են «Ջուլիետա» ոսկու հանքավայրի հանքամարմինների հանքաքարի պաշարների՝ ընդերքից կորզման օպտիմալ ցուցանիշներ և արդյունավետ յուրացում:

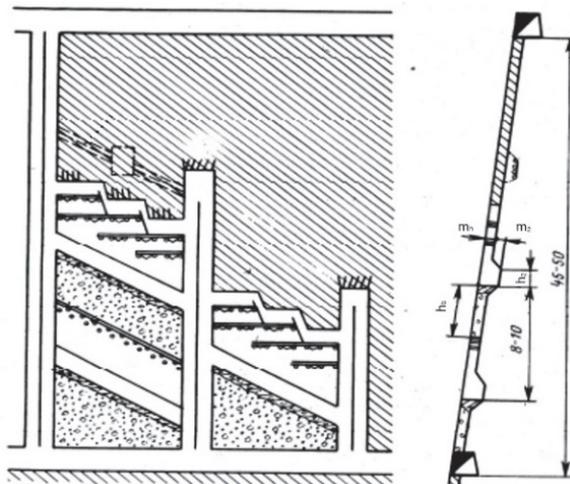
«Կաննինսկու» ոսկու հանքավայրը ներկայացված է 0,1-ից մինչև 1,1 մ հզորություն ունեցող բերեգիտային գոտում 75° անկմամբ չափազանց բարակ՝ 1-ից մինչև 7 մ հզորությամբ հանքամարմիններով, որոնցում ոսկու բաշխվածությունը չափազանց անհավասարաչափ է. աղքատ (պակաս 1 գ/տ-ից), միջին (1 գ/տ-ից մինչև 10 գ/տ), հարուստ (10 գ/տ-ից մինչև 100 գ/տ) և գերհարուստ [20]:



Հանքաքարի երկրորդային աղքատացման բացառմանն ուղղված հետազոտությանն է նվիրված [21] աշխատանքը, որտեղ բերված են հանքաքարի ենթահարկային հանույթով և պոկվող ապարներով մաքրման տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի տարբերակներ (նկ. 3 և 4):

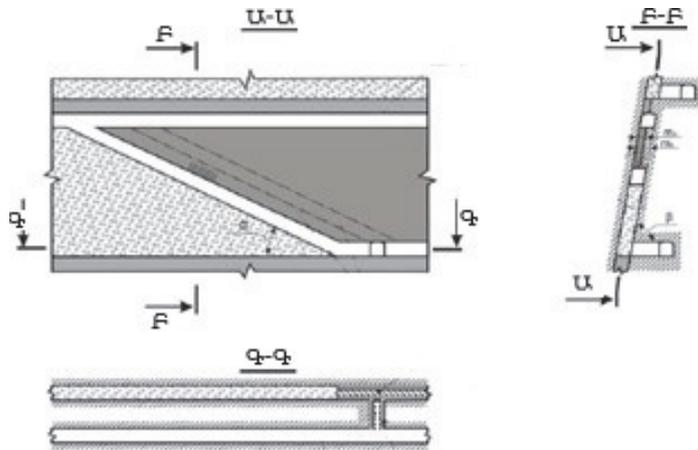


Նկ. 3. Հորիզոնական կողմնորոշված ենթահարկերով հանքաքարի հանույթով և պոկվող ապարներով մաքրման տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի տարբերակը



Նկ. 4. Թեք կողմնորոշված ենթահարկերով հանքաքարի հանույթով և պոկվող ապարներով մաքրման տարածության լցափակմամբ մշակման համակարգի տարբերակը

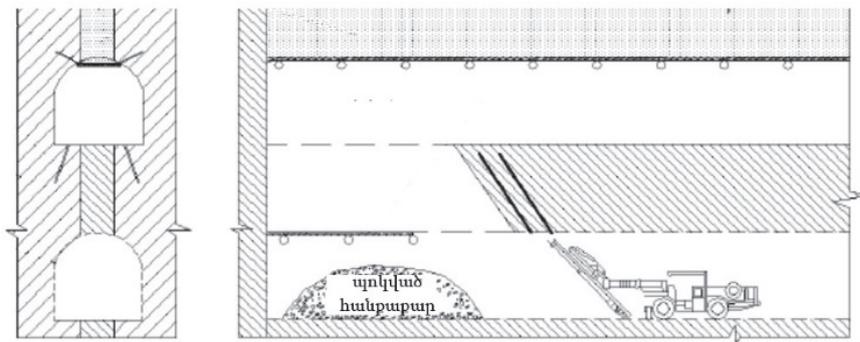
[22] աշխատանքներում ներկայացված է սակավաթեք շերտերի հանույթով և հանույթային տարածության լցափակմամբ համակարգի տարբերակներից մեկը, որը ի հայտ է եկել փոքրագաբարիտ ինքնագնաց լեռնային մեքենաների օգտագործման շնորհիվ (նկ. 5):



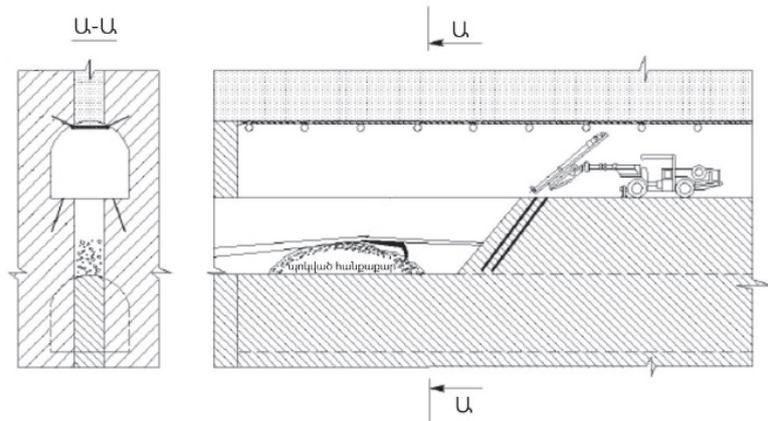
Նկ. 5. Փոքր հզորությամբ զտիթափ հանքամարմինների մշակման համակարգի տարբերակ՝ սակավաթեք շերտերի հանույթով, հանույթային տարածության լցափակմամբ և փոքրագարարիտ ինքնազնաց մեքենաների համալիրի կիրառմամբ

«Մերձարգունի արտադրական լեռնաքիմիական միավորում» ԲԲԸ ստորգետնյա հանքերում լայնորեն կիրառվում է վարընթաց շերտերի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ մշակման համակարգը [23] (նկ. 6):

Ստորին փորվածք պնդացող լցանյութի ձեղքման բացառման համար առաջարկվել է նկ. 7-ում ներկայացված տեխնոլոգիական սխեման:

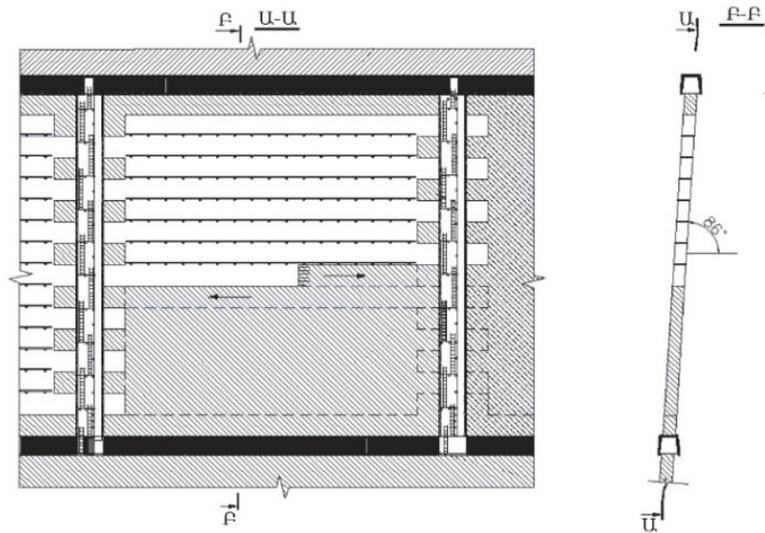


Նկ. 6. Վարընթաց երկշերտանի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ համակցված մշակման համակարգի տարբերակ



Նկ. 7. Վարրնթաց երկշերտանի հանույթով և պնդացող լցանյութով լցափակմամբ համակցված մշակման համակարգի կատարելագործված տարրերակ

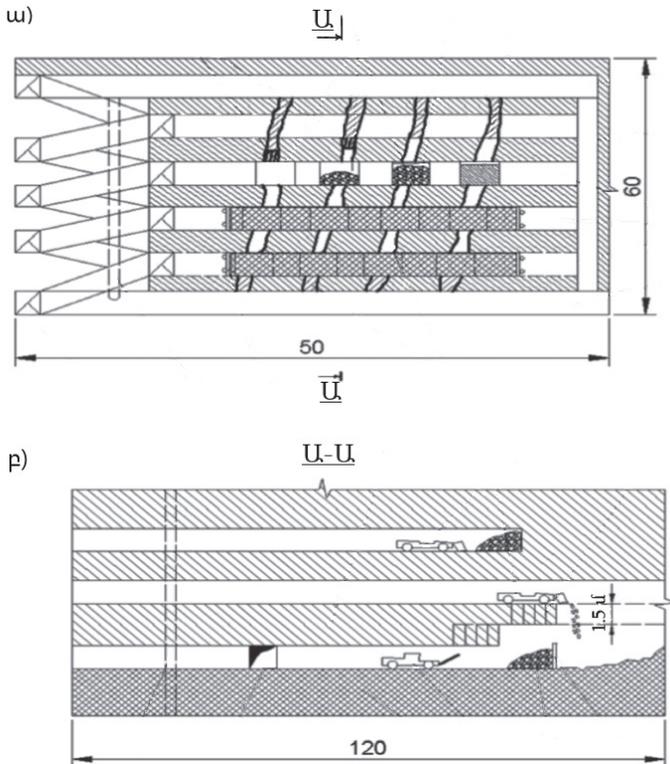
Անկայուն ապարահանքաքարային զանգվածի դեպքում փոքր հզորությամբ հանքամարմինների մշակման համար առաջարկվել է վարրնթաց շերտերի հանույթով և ամրակապմամբ համակարգը (նկ. 8), որը թույլ է տալիս նվազեցնել 1 *տ* ուրանային հանքաքարի արդյունահանման ինքնարժեքը՝ ի հաշիվ աշխատանքի արտադրողականության և հանքաքարի կորզման որակաքանակական ցուցանիշների մեծացման ու լցափակման ծախսերի նվազման:



Նկ. 8. Վարրնթաց շերտերի հանույթով և ամրակապմամբ մշակման համակարգ

«Ձերմիտանսկու» ոսկու հանքավայրի մոտիկացված հանքերակների մշակման համար, մի քանի համակարգերից բացի, առաջարկվել է հորիզոնական

շերտերի հանությունը և լցափակման մշակման համակարգը [24], որը ներառում է շահագործական բլոկների խմբային նախապատրաստում (նկ. 9):



Նկ. 9. Ձառիթափ փոքր հզորությամբ մոտիկացված հանքային մարմինների մշակման համակարգը՝ հորիզոնական շերտերի հանությամբ և լցափակմամբ. հանքային մարմինների տարածման խաչադիր ուղղությամբ կտրվածքը, կտրման փորվածքների և մաքրման մուտքափորվածքների անցկացումը (ա), հանքային մարմնի տարածման խաչադիր ուղղությամբ կտրվածքը, պայթանցքերի հորատում և պայթեցում, հանքաքարային զանգվածի բարձում, հանույթային տարածության մաքրում (բ)

Փոքր հզորությամբ հանքերակների մաքրման փորվածքի ընդլայնական կտրվածքի ազատ մակերեսի մեծացման և ինքնագնաց մեքենաների շարժունակության ավելացման նպատակով ստեղծվել են զանազան հարմարանքներ [25-27]:

Այսպիսով, փոքր հզորությամբ հանքամարմինների ստորգետնյա մշակման համակարգերի կիրառման արտասահմանյան փորձի վերլուծությունը ցույց է տալիս հանքաքարի պոկման պայթանցքային եղանակի ու հորատման և բարձրաառերող փոքրագաբարիտ սարքավորումների օգտագործման, հանքաքարի անջատ և տեսակավոր հանույթի ու հանույթային տարածության լցափակման իրականացման նպատակահարմարությունը:

**Եզրակացություն.** Չափազանց բարակ և բարակ զառիթափ հանքամարմինների ստորգետնյա եղանակով շահագործման արդյունավետության բարձրացումը պահանջում է հանքաքարի մաքրահանման արտադրական գործընթացներում հետևյալ մոտեցումների և միջոցառումների իրականացում.

1. Մեքենայացված համալիրների օգտագործում, որն ուղղված է ձեռքի աշխատանքի կրճատմանը և, բնականաբար, հանքախորշային բանվորի աշխատանքի արտադրողականության ու մշակման ինտենսիվության մեծացմանը:

2. Հանքաքարի մաքրահանման ժամանակ հորատման և բարձող-առբերող, ինչպես նաև օժանդակ աշխատանքներում փոքրագաբարիտ սարքավորումների օգտագործում, որն ուղղված է հանքաքարի աղքատացման կրճատմանը՝ ապահովելով արդյունահանված հանքաքարի որակի բարձրացում:

3. Բարձրարժեք հանքաքարի անջատ և տեսակավոր հանույթ թույլատրող մշակման համակարգերի կիրառում, ինչն ապահովում է օգտակար բաղադրիչի (ների) բարձր պարունակությամբ հանքաքարերի կորզում:

4. Հանույթային տարածության լցափակմամբ և հետագա լցափակմամբ մշակման համակարգերի կիրառում, ինչը բարձրարժեք հանքաքարի դեպքում ուղղված է բնամասերի տեսքով հանքաքարի կորուստների կրճատմանը՝ ապահովելով արդյունահանված հանքաքարի քանակի բարձրացում:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Пути совершенствования очистной выемки жильных месторождений / **М.Ф. Шнайдер и др.** // Цветная металлургия. – М., 1988. – №6. – С. 14-17.
2. **Наджарян А.М.** Основные пути совершенствования систем разработки маломощных рудных тел в сложных горно-геологических условиях // Пути повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых: Межвуз. сб. науч. трудов ЕрПИИ. – Ереван, 1989. – С. 32-39.
3. **Рафиенко Д.И.** Пути совершенствования технологии разработки жильных месторождений в сложных горно-геологических условиях // Повышение эффективности разработки жильных месторождений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1977. – С. 70–81.
4. **Рогизный В.Ф., Хромов В.М., Карпучина М.В.** Технологии селективной выемки маломощных рудных тел с применением малогабаритного самоходного оборудования // Горная промышленность. – М., 2020. – №1. – С. 69–90.
5. **Агошков М.И., Фузган М.Д.** Механизация технологических процессов - основа совершенствования систем разработки // Горный журнал. – М., 1963. – №7. – С. 3-8.
6. Методическое пособие для планирования показателей очистной добычи в зависимости от выемочной мощности при разработке жильных месторождений / **М.И. Агошков, В.А. Симаков и др.** – М.: Изд. ИГД, 1966. – 177 с.
7. **Агошков М.И.** Научные основы оценки экономических последствий потерь полезных ископаемых при разработке месторождений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1972. – 150 с.

8. Некоторые вопросы по нормированию трудовых затрат в зависимости от ширины очистного пространства при разработке тонких жил / **М.И. Агошков и др.** // Горный журнал. – М., 1963. – N7. – С. 25-29.
9. **Шестаков В.А., Яковлев М.А.** Совершенствование подземной разработки рудных месторождений. – Фрунзе: Изд. ИЛИМ, 1973. –106 с.
10. **Назарчик А.Ф.** Исследование эффективности разработки жильных месторождений. – М.: Недра, 1972. – 175 с.
11. **Панфилов Е.И.** О задачах исследований экономического стимулирования повышения производительности труда и показателей извлечения при разработке жильных месторождений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1977. – С. 115–128.
12. **Ляхов А.И.** Технология разработки жильных месторождений. – М.: Недра, 1974. – 201 с.
13. Substantiation of mining systems for steeply dipping low-thickness orebodies with controlled continuous stope extraction / **K. Rysbekov, et al** // Mining of Mineral Deposits. – 2022. – 2. – P. 64-72.
14. **Hyong Doo Jang.** Unplanned Dilution and Ore-Loss Optimisation in Underground Mines via Cooperative Neuro-Fuzzy Net-work: This thesis is presented for the Degree of Doctor of Philosophy of Curtin University. - Perth: Western Australia School of Mines, 2014. - 170 p.
15. **Marinin M., Marinina O., Wolniak R.** Assessing of Losses and Dilution Impact on the Cost Chain: Case Study of Gold Ore Deposits // Sustainability. - 2021. - Vol. 13, iss. 7, № 3830.
16. **Лизункин М.В., Рабольт А.Н., Гуров С.Г.** Результаты опытно-промышленных испытаний технологии отработки маломощных пологопадающих пластообразных рудных залежей расширенными заходками // Горный журнал. - 2019. - № 1. - С. 37-40.
17. **Павлов А.М., Васильев Д.С.** Совершенствование технологии подземной разработки тонких крутопадающих тел золоторудного месторождения Коневинского // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. - 2017. - Т. 40, № 2. - С. 88-94.
18. **Abdellah W.R.E., Hefni M.A., Ahmed H.M.** Factors Influencing Stope Hanging Wall Stability and Ore Dilution in Narrow-Vein Deposits: Part I // Geotechnical and Geological Engineering. - 2020. - Vol. 38. - P. 1451-1470.
19. **Соколов И.В., Смирнов А.А., Антипин Ю.Г., Барановский К.В.** Технология восходящей выемки золоторудного месторождения с применением сухой закладки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М., 2015 (9). – С. 14–19.
20. **Павлов А.М., Васильев Д.С.** Повышение эффективности подземной разработки тонких крутопадающих жил // Горная промышленность. – М., 2017. – N1 (131). – С. 86–87.

21. **Пакулов В.В.** Разработка маломощных крутопадающих жил: Анализ современного состояния // Вестник ЧитГУ. – Чита, 2012. – N8 (87). – С. 23–30.
22. **Пирогов Г.Г., Пакулов В.В.** Обоснование новой технологии разработки маломощных крутопадающих жил // Вестник ЧитГУ. – Чита, 2010. – N5 (62). – С. 106–110.
23. **Лизункин В.М., Медведев В.В., Матвеев А.Е.** Пути повышения эффективности отработки маломощных крутопадающих сближенных урановых жил в сложных горно-геологических и горно-технических условиях // Вестник Забайкальского государственного университета. – Чита, 2012. – N12 (91). – С. 29–34.
24. **Раимжанов Б.Р., Мухитдинов А.Т., Хасанов А.Р.** Повышение эффективности технологии разработки маломощных крутопадающих сближенных рудных тел в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2018. - № 10. - С. 67–78.
25. А.с. 1010274 (СССР). Е 21 С 41/06. Межслоевое перекрытие для нисходящей слоевой выемки рудных тел с твердеющей закладкой / **Е.Н. Щукин, В.В. Коршунов, Г.Г. Кузнецова и др.** – N3258432/22–03; Заяв. 07. 01. 81; Опубл. 07. 04. 83; Бюлл. N13.
26. **Хомяков В.И.** Зарубежный опыт закладки на рудниках. – М.: Недра, 1984. – 224 с.
27. **Cummins A.B., Given I.A.** SME Mining Engineering Handbook. - New York, 1973. - Vol. 1. – 123 p.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 08.04.2025:

**Л.С. МАИЛЯН**

#### **АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ КРУТОПАДАЮЩИХ МАЛОМОЩНЫХ ЖИЛ**

Основным направлением научно-технического прогресса при разработке маломощных крутопадающих рудных тел, как правило, считается механизация технологических процессов добычи руды и вспомогательных работ, а также широкое применение подземного самоходного горного и вибрационного оборудования.

Увеличение ширины очистного пространства за счет отбойки боковых пород, независимо от мощности рудного тела, приводит к снижению коэффициента изменения качества руды при добыче, экономический ущерб от которого при определенных условиях может превысить снижение затрат на добычу руды за счет повышения производительности труда. Если увеличение ширины очистного пространства обусловлено ростом мощности рудного тела, то появляется возможность улучшить не только условия труда, но и качественные показатели добычи руды. Поэтому задачу повышения степени механизации работ по очистной выемке руды, как основное направление совершенствования систем разработки, можно считать приемлемой в условиях сравнительно большой мощности рудного тела.

В связи с вышеизложенным важное значение имеет анализ мирового опыта применения систем подземной разработки маломощных крутопадающих рудных тел,

выявивший, с одной стороны, целесообразность использования малогабаритных механизированных комплексов, с другой - применение систем, позволяющих вести раздельную или селективную добычу, а также закладку выемочного пространства.

**Ключевые слова:** руда, система разработки, мощность, тонкая жила, малогабаритное оборудование, разубоживание.

**L.S. MAYILYAN**

#### **ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE IN USING UNDERGROUND SYSTEMS FOR MINING STEEPLY DIPPING LOW-THICKNESS VEINS**

The main direction of scientific and technical progress in the development of low-thickness steeply dipping ore bodies is, as a rule, considered to be the mechanization of technological processes of ore mining and auxiliary works, the widespread use of underground self-propelled mining and vibration equipment.

Increasing the width of the stope by breaking wall rocks, regardless of the thickness of the ore body, leads to a decrease in the coefficient of change in the quality of the ore during mining, the economic damage from which, under certain conditions, can exceed the reduction in ore mining costs due to increased labor productivity. If the increase in the width of the stope is due to an increase in the thickness of the ore body, it becomes possible to improve not only the working conditions, but also the quality indicators of the ore mining. Therefore, the task of increasing the degree of mechanization of the ore extraction work, as a priority main direction for improving the processing systems, can be considered clearly acceptable and possible in conditions of a relatively large ore body thickness.

In connection with the above, it is important to analyze the world experience of using systems for underground mining of low-thickness steeply dipping ore bodies, which revealed, on the one hand, the feasibility of using small-sized mechanized complexes, and on the other hand, the use of systems that allow separate or selective mining, as well as backfilling of the excavation space.

**Keywords:** vein, ore, processing system, thickness, thin, small-sized, dilution.

D.V. REVAZYAN

**APPLICATION OF SPECIALIZED POPULATIONS IN A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PLACEMENT OF INTEGRATED CIRCUIT COMPONENTS**

This paper proposes a modified genetic algorithm (GA) for the problem of placing integrated circuit (IC) components based on the idea of preliminary specialization of individual populations for the optimization of 1–2 parameters. Unlike classical approaches, where each individual's genotype encodes the entire solution, the proposed approach involves launching several independent populations, each initially evolving with a focus on 1–2 selected parameters (e.g., total connection length, thermal characteristics, occupied area). Once local optima are reached, inter-population crossover occurs: the best genetic solutions from different groups are combined for further global optimization, taking into account the full multi-criteria objective function. Experimental results demonstrate that this approach reduces the risk of getting trapped in local minima, accelerates algorithm convergence, and improves the final placement quality by 15–20% compared to classical GAs.

**Keyword:** genetic algorithms, specialized populations, IC placement, multiparametric optimization.

**Introduction.** The problem of optimal placement of components in integrated circuits (ICs) is one of the most critical challenges in electronic design (VLSI/ASIC/FPGA). The quality of the solution directly affects:

- Performance (critical delays, signal processing speed).
- Thermal characteristics (heat distribution, dissipation capability).
- Area (final chip size and production cost).
- Power consumption.

Traditional deterministic methods (including analytical and heuristic approaches) often become too complex as the number of objects  $N$  and the number of constraints increase. Genetic algorithms (GAs), which have proven effective in global optimization problems [1], are widely used for IC component placement. However, with the continuous increase in the complexity of designed objects, classical GAs faces the following challenges:

1. **High dimensionality.** As the number of objects and parameters increases (e.g., coordinates, mutual constraints, thermal and electrical requirements), the solution space expands dramatically.

2. **Tendency to local minima.** When all parameters are encoded within a single genotype, there is a high risk of getting "stuck" in local optima.

3. **High computational cost.** The evolutionary process requires significant resources to evaluate the multi-criteria objective function.

To overcome these challenges, the original multi-parameter problem is divided into subproblems, each containing 1–2 key parameters (e.g., total connection length and/or area; or thermal characteristics and/or delays). A specialized population is created for each subproblem, evolving based on a simplified objective function. Once stable local optima are reached, inter-population crossover occurs, where the best solutions from different groups are combined into a unified genotype that considers all parameters. Finally, a global optimization is performed using the original multi-criteria objective function.

## **LITERATURE REVIEW**

### **Classical Genetic Algorithms in IC Placement**

- Holland, 1975: A foundational work that laid the groundwork for evolutionary modeling.

- The application of GAs to VLSI problems has traditionally focused on global search using a single genotype that encodes the placement of all blocks [2]. However, as dimensionality increases, issues of scalability and convergence arise.

- There are hybrid methods that combine GAs with other heuristics (e.g., local search, simulated annealing, particle swarm optimization), but they do not fully solve the problem of high-dimensional solution spaces [3,4].

### **Cooperative Coevolutionary Algorithms (CCEA)**

The idea of cooperative coevolution is to divide the problem into independent subproblems followed by the integration of the obtained solutions. Several studies have shown that this approach improves convergence and reduces the risk of getting trapped in local optima [5,6].

- In VLSI problems, "node-based" or "region-based" optimization is often used, where each section of the chip is considered separately. However, this approach does not always account for different parameters (e.g., power consumption vs. delays) but primarily focuses on physical localization.

### **The difference of the proposed approach**

In the proposed method, specialization is not tied to the geographical division of the placement area, as in cooperative coevolutionary algorithms, but rather to the selection of a subset of parameters. This approach allows for the early-stage refinement of the best solutions based on individual criteria (e.g., minimizing connection length) and later integrates the best features from different subpopulations into a unified solution.

## PROBLEM STATEMENT

### Initial problem

Given a set of  $N$  objects (blocks, components, elements) that need to be placed within a designated IC substrate area while considering:

1. **Geometric constraints** (object sizes, minimum spacing).
2. **Timing constraints** (signal delays, critical paths).
3. **Area constraints** (total occupied area).
4. **Thermal constraints** (heat distribution, permissible temperature).

The goal of this study is to determine an optimal placement of elements, represented as a set of coordinates  $\{(x_i, y_i)\}$  for  $i = 1, \dots, N$ , that minimizes a given multi-criteria placement quality function.

### The objective function

Let  $\mathbf{X} = (x_1, y_1, \dots, x_N, y_N)$  be the vector of placement parameters. Then, the multi-objective additive quality function, consisting of three partial quality functions, is defined as:

$$F(\mathbf{X}) = w_1 \cdot F_1(\mathbf{X}) + w_2 \cdot F_2(\mathbf{X}) + w_3 \cdot F_3(\mathbf{X}),$$

where  $F_1(\mathbf{X})$  is the total connection length or the estimated routing length at the placement stage;  $F_2(\mathbf{X})$  the occupied area or placement density;  $F_3(\mathbf{X})$  a function reflecting thermal impact and/or maximum temperature;  $w_1, w_2, w_3$  the weights defining the priorities of the corresponding criteria.

### Limitations of the classical approach

In a standard GA, the genotype can represent either a permutation of objects or a complete set of coordinates. However, when the number of objects is large and multiple criteria are considered, the dimensionality of  $\mathbf{X}$  becomes excessively high. This leads to:

- Slower convergence.
- High probability of getting trapped in a local minimum.
- Increased computational cost per generation.

## THE PROPOSED METHODOLOGY

### The general framework of the proposed approach

The proposed approach operates in two major stages:

#### ▪ Population Specialization:

- There are several independent populations (e.g.  $P_1, P_2, \dots, P_k$ ), each of which optimizes a subset of parameters (1–2 criteria).
- For the population  $P_{(i)}$  a simplified  $\sim F_i(\mathbf{X}_{(i)})$  function is formulated considering only the corresponding criteria.

- A classical evolutionary process is carried out: initialization, fitness evaluation, selection, crossover, and mutation-but only within the parameter space relevant to the given population.

- Inter-Population Crossover and Global Optimization:

- After reaching local optima (or upon termination), the best individuals from each population are selected.

- These individuals are combined into a new set of genotypes, where the optimal parameter values from different groups are gathered.

- A global phase of the genetic algorithm is initiated using the full objective function  $F(X)$ , where evolutionary operators are applied again, but now for optimizing the complete set of parameters.

#### **Algorithm details**

#### **The phase of specialized populations**

##### **1. Initialization**

- Each subpopulation  $P_{(i)}$  is assigned its domain related to 1–2 parameters, and individuals are randomly generated within this domain.

##### **2. Fitness evaluation**

- The function  $\sim F_i(X_i)$  considers only the criteria (or part of them) for which the population  $P_i$ . For example, if the population specializes in minimizing the total connection length, we apply:  $\sim F_i(X_i) = F_1(X_i)$ .

##### **3. Selection, crossover, mutation**

- Standard genetic algorithm operators [2, 3] are applied, adapted to a lower-dimensional space.

- Higher mutation probabilities may be used in the early stages to accelerate the exploration of the space.

##### **4. Stopping**

- The process continues until a stopping criterion is met (e.g., a specified number of generations or no improvement over several iterations).

#### **Inter-population crossover**

##### **1. Selection of the best individuals**

- From each population, the top- $m$  individuals are selected (based on  $\sim F_i$ ).

##### **2. Formation of a unified genotype**

- For each parameter set (specialized group), the optimal values are taken from the corresponding subpopulation. Thus, a "hybrid" solution is formed, where, for example, the positions of elements affecting connection length are taken from the best solution in population  $P_1$ , while parameters influencing thermal characteristics are taken from population  $P_2$  and so on.

### 3. Creation of the combined population

- The new "hybrid" solutions form the initial (or additional) part of the combined population  $P_{\text{global}}$  which then undergoes classical evolutionary processes based on the full objective function  $F$ .

#### Final global optimization

##### 1. Global evaluation.

- Now, for each individual, the objective function  $F(X) = w_1 \cdot F_1(X) + w_2 \cdot F_2(X) + w_3 \cdot F_3(X)$ , where  $w_1, w_2, w_3$  are the weights that determine the priorities, and  $F_1(X), F_2(X)$  and  $F_3(X)$  are the quality functions for the corresponding criteria.

##### 2. Selection, crossover, mutation

- A multi-parameter evolution is performed, which "fine-tunes" the solution, taking into account all the interrelationships between the parameters.

##### 3. Output solutions

- The algorithm stops when the specified number of generations is reached or when the results stabilize.

- The best individual, according to the  $F$ -metric, is accepted as the final placement.

#### Advantages of the proposed approach and potential challenges

##### Advantages

- Reduced dimensionality in early stages: Each population operates on fewer parameters, accelerating evolution and reducing the risk of early stagnation.

- Avoidance of deep local optima: The likelihood of getting "stuck" in one area for all parameters at once is reduced, as specialization provides independent search zones.

- Faster convergence: Due to more effective local optimization, solutions become "good" in key criteria even before the global phase.

- Improved computational efficiency: The approach allows for parallel processing of information.

##### Potential challenges

- Selection of parameter groups: Incorrect selection and distribution of parameters across populations may lead to conflicts during the global integration.

- Functional or correlated dependency of parameters: If parameters are closely related, narrow specialization on 1–2 criteria may require a more complex synchronization mechanism.

- Fine-tuning of parameters: It is necessary to control the number of generations in each phase, the proportion of migrating individuals, mutation probability, etc.

## PRACTICAL IMPLEMENTATION

### Initial Data and Assumptions for Implementation

To test the effectiveness of the method, the problem of placing  $N$  objects on a rectangular IC substrate area was chosen, taking into account:

- Area constraints.
- Delays (critical paths).
- Thermal distribution.

Two approaches were compared:

1. Standard GA with a single population, where each individual encodes the full set of coordinates  $X$ .
2. Modified GA with specialized populations (2–3 groups), each of which initially optimized only a subset of criteria (e.g., routing length + density, or thermal + timing parameters).

### Experimental parameters

- **Size of each specialized population:** 50–100 individuals.
- **Number of generations for local (specialized) optimization:** 300.
- **Simplified functions:**
  - $\sim F_a$  - considers only the total connection length,
  - $\sim F_b$  - considers thermal criteria,
  - $\sim F_c$  considers delays (e.g., maximum critical path length).
- After stabilization of each population, inter-population crossover occurs, and a combined population of 200 individuals is created.
- **Final global optimization:** 500 generations, mutation probability 0.03, and the full objective function  $F(X) = w_1 \cdot F_1(X) + w_2 \cdot F_2(X) + w_3 \cdot F_3(X)$ .

### Evaluation metrics

- The total value of the objective function  $F$  after the algorithm completes.
- Convergence time (number of generations or total processing time).
- Solution stability (variance of results across multiple runs).

### Results

The Experiment showed:

1. The standard GA often got trapped in local minima and required more generations to achieve an acceptable result.
2. The modified GA reduced the final value of the objective function  $F$  by 15–20% and shortened the convergence time by 20–30% (compared to the classical algorithm).
3. The enhanced method demonstrated lower variance in solution quality across multiple runs, indicating more stable identification of "globally" good placements.

### **Discussion**

The results confirm that the preliminary specialization indeed helps in solving multi-parameter placement problems:

- Each subpopulation quickly "hones" specific criteria without being "burdened" by others.
- The solutions combined during inter-population crossover are more likely to simultaneously contain strengths across all parameters.
- Subsequent global optimization only slightly adjusts the found solutions, improving consistency among the criteria.

However, effectiveness largely depends on:

- Correct selection of criteria groups — it is important to combine parameters in one population that do not conflict strongly with each other.
- The number of local optimization iterations — if there are too few generations, subpopulations will not reach a quality local minimum; if there are too many, the risk of "overfitting" to individual criteria increases.

Promising directions for further research include:

- Adaptive distribution of parameters among subpopulations during evolution (e.g., based on current results).
- Hybridization with other heuristics (simulated annealing, local search) to fine-tune already "good" solutions.
- Integration with design rule checks and penalty system [7].

### **Conclusion**

This paper presents a new approach to the optimization of placement of integrated circuit components based on specialized populations in a genetic algorithm. The key features include:

1. Decomposition of the original multi-parameter problem into 1–2 parameters for each subpopulation.
2. Local optimization in a smaller parameter space at an early stage.
3. Inter-population crossover for integrating the best local solutions.
4. Final global optimization considering the full objective function.

Experiments show that this methodology provides a significant improvement (15–20% in the objective function) and a reduction in convergence time (up to 30%) compared to the classical GA, which is particularly important when solving large placement problems in VLSI. Specialization methods can be successfully complemented by cooperative coevolution, adaptive mutation operators, and other heuristics, expanding the capabilities of evolutionary IC design.

## REFERENCES

1. **Holland J.H.** Adaptation in Natural and Artificial Systems. - University of Michigan Press, 1975.
2. **Misra S., & Mukhopadhyay S.** Application of evolutionary computation techniques for VLSI physical design automation // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.-2002.-21(9).-P.1212-1223.
3. **Lum C., & Roli A.** Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison // ACM Computing Surveys.-2003.-35(3).-P.268–308.
4. **Qin A.K., & Suganthan P.N.** A Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer for Global Optimization of Multimodal Functions // IEEE Transactions on Evolutionary Computation.-2014.-18(3).-P.436–450.
5. **Wang L., & Gen M.** Particle swarm optimization with cooperative coevolution for large scale optimization problems // Soft Computing.-2006.-10(1).-P.67–84.
6. **Xie X., Yao X., & Liu Y.** Differential evolution with cooperative coevolution for large-scale optimization problems // Swarm and Evolutionary Computation.-2012.-1.-P.25–36.
7. Multiparametric optimization and penalty system in integrated circuit component placement / **V. Melikyan, D. Revazyan, & A. Harutyunyan, et al** // 2024 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs-2024).-2024.- no.21.-P.1-4.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 07.03.2025.

## Դ.Վ. ՌԵՎԱԶՅԱՆ

### ԻՆՏԵԳՐՎԱԾ ՇՂԹԱՅԻ ԲԱՐԱԴՐԻՉՆԵՐԻ ՏԵՂԱԴՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՄԱՍՆԱԳԻՏԱՑՎԱԾ ՊՈՊՈՒԼՅԱՑԻԱՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ԳԵՆԵՏԻԿԱԿԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄՈՒՄ

Առաջարկվում է փոփոխված գենետիկական ալգորիթմ (ԳԱ)՝ ինտեգրալ սխեմայի (ԻՄ) բաղադրիչների տեղադրման խնդրի համար՝ հիմնված անհատական պոպուլյացիաների նախնական մասնագիտացման գաղափարի վրա՝ 1...2 պարամետրերի օպտիմալացման դեպքում: Ի տարբերություն դասական մոտեցումների, երբ յուրաքանչյուր անհատի գենոտիպը կոդավորում է ամբողջ լուծումը, առաջարկվող մեթոդը ներառում է մի քանի անկախ պոպուլյացիաների գործարկում, որոնք նախնական փուլում զարգանում են՝ կենտրոնանալով 1...2 ընտրված պարամետրերի վրա (օրինակ՝ ընդհանուր միացման երկարությունը, ջերմային հատկությունները, զբաղեցված տարածքը): Տեղային օպտիմումներին հասնելուց հետո իրականացվում է միջպոպուլյացիոն խաչասերում. տարբեր խմբերից լավագույն գենետիկական լուծումները համակցվում են հետագա զրոբալ օպտիմալացման համար՝ հաշվի առնելով բազմապարամետրական օբյեկտիվ ֆունկցիան: Փորձարարական արդյունքները ցույց են տալիս, որ այս մոտեցումը նվազեցնում է տեղական մինիմումներում խրվելը, արագացնում է ալգորիթմի համախմբումը և բարելավում է վերջնական տեղադրման որակը 15...20%-ով՝ համեմատած դասական GA-ների հետ:

**Առանցքային բառեր.** գենետիկական ալգորիթմներ, մասնագիտացված պոպուլյացիա, ԻՄ տեղաբաշխում, բազմապարամետրական օպտիմալացում:

Д.В. РЕВАЗЯН

**ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ В  
ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ  
КОМПОНЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Предлагается модифицированный генетический алгоритм (ГА) для решения задачи размещения компонентов интегральных схем, основанный на предварительной специализации отдельных популяций для оптимизации 1...2 параметров. В отличие от классических подходов, где генотип каждого индивида кодирует всё решение целиком, предложенный метод включает запуск нескольких независимых популяций, каждая из которых на начальном этапе эволюционирует с фокусом на 1...2 выбранных параметра (например, общая длина соединений, тепловые характеристики, занимаемая площадь). После достижения локальных оптимумов происходит межпопуляционный кроссовер: лучшие генетические решения из разных групп объединяются для дальнейшей глобальной оптимизации с учётом полной многокритериальной целевой функции. Экспериментальные результаты показывают, что данный подход снижает риск попадания в локальные минимумы, ускоряет сходимость алгоритма и улучшает качество итогового размещения на 15...20% по сравнению с классическими ГА.

**Ключевые слова:** генетические алгоритмы, специализированные популяции, размещение интегральных схем, многопараметрическая оптимизация.

L.K. KARAPETIAN

**CURRENT STATUS AND FUNDAMENTALS OF MICROWAVE INTEGRATED CIRCUIT DESIGN WITH GaN HEMT TRANSISTORS**

Gallium nitride (GaN) high electron mobility transistors (HEMTs) are key parts of microwave integrated circuits (MICs) because of their high electron mobility, wide band gap, critical field, permittivity and exceptional thermal conductivity. These options allow GaN HEMTs to work at higher frequencies and power levels than traditional silicon-based transistors. For the RF and microwave systems, this gives them efficiency. The importance of GaN HEMTs in MICs can be listed as follows: higher power density, improved efficiency, wide frequency operation, thermal stability. These benefits make GaN HEMTs a crucial technology for communication systems today, defense and space technologies. Different proposed technologies of recent years on GaN HEMTs have been summarized and compared. The relatively commonly used GaN HEMT types are presented, including their models. 3 main sub-branches of GaN HEMT are discussed: types of transistors, transistor models and characteristics and MICs design. Each of them has its own advantages and disadvantages, depending on the problem, the most suitable one can be chosen. As a result, several important problems are highlighted, such as performance optimization, thermal management solutions, reliability and longevity, signal integrity and noise reduction, future research directions, etc.

**Keywords:** high electron mobility transistors, microwave integrated circuits, higher power density, improved efficiency, wide frequency operation, thermal stability.

**Introduction.** HEMTs are now the most used type of transistors for RF and microwave frequency applications, especially when large power outputs are needed [1]. GaN-based HEMTs show great potential for use in power electronics, largely because they offer superior breakdown voltages and power efficiency when compared to silicon-based devices. Key characteristics of HEMTs include factors like contact resistance, current density, capacitance, and breakdown voltage [2] and for these good qualities, GaN HEMTs are used for RF and power Devices [3,4], space applications [5], conventional housing-type power modules [6], etc. This article can be divided into 3 main categories.

▪ **Types of transistors [7-25]** – The term transistors and their relevance in electronics. Different types of transistors and how they are used in the design of MICs.

- **Transistor models and characteristics [26-28]** – The expanded description of each type’s characteristic regarding MICs design.

- **Microwave integrated circuit design [29,30]** – Definition and a close view of MICs. Modern approaches to the design of the modules, prospects for the development of the GaN HEMTs disadvantages and advantages in MICs.

### 1. Types of transistors

#### 1.1. Overview of transistors and their significance in electronics

In [7], basic information about transistors, their function of amplifying and switching electrical signals are presented. In radio technology, very faint signals that travel through the air are intensified before being output through speakers. Additionally, a transistor functions as a switch, activating only when it receives a specific signal. An integrated circuit (IC) or large-scale integration (LSI) is essentially a grouping of transistors that perform fundamental transistor functions. Recently, GaN HEMTs have become popular and are used in designing microwave integrated circuits, but their efficiency depends on several factors.

- What type of transistor was used?
- Which model of transistor was used?
- What method was used to design the microwave integrated circuit?

#### 1.2. Variety of transistors and their applications in MICs design

The GaN HEMT devices are available in various forms (Fig. 1), depending on their design, materials, and intended use. Below, we outline the most prevalent types, along with their respective advantages and disadvantages in relation to MICs design.

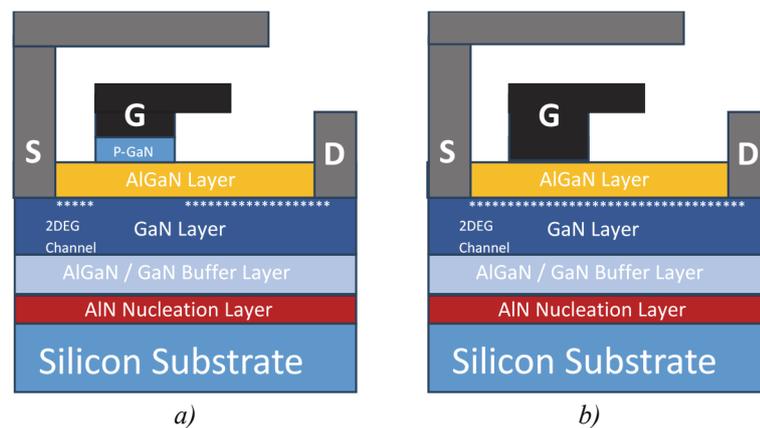


Fig. 1. Simplified device cross-sections of a) E-mode and b) D-mode HEMTs (Source: GaN Power International)

### 1.2.1. Enhancement-mode (E-mode) GaN HEMT

In [8], a way to improve E-mode GaN HEMTs is described (Fig. 2). The focus is on the p-type GaN layer below the two-dimensional electron gas (2DEG) layer, and the recessed Schottky gate above it. As a result, GaN HEMT is by default a normally-ON transistor. By employing a Schottky gate, such as Ni/Au on AlGaN/GaN, to deplete electrons in 2DEG at the applied negative gate bias  $V_{gate}$ , the HEMT can be disabled. This normally-ON HEMT is also known as a depletion-mode (D-mode) HEMT. This work begins with creating a usual OFF HEMT, where electrons in 2DEG are defaulted to be depleted at  $V_{gate} = 0 V$ . Because positive threshold voltage ( $V_T$ ) requires positive  $V_{gate}$  to activate the HEMT, this device is also known as an E-mode HEMT. For power converters, E-mode is always preferable to D-mode because it requires less static power and functions in a failsafe manner. Under the 2DEG layer, the recessed Schottky gate with a p-type GaN is the main emphasis. Two responses ( $V_{th}$ ,  $R_{on}$ ) were obtained from the design of the experiment three factors (AlGa<sub>N</sub>,  $L_{gate}$ , and p-type GaN) at four levels for technology computer-aided design (TCAD) simulation. The list of possible ideal E-mode GaN HEMTs was reduced by feeding 128 sets of observations into the analysis of variance (ANOVA) and artificial neural network (ANN) models. As a result, by analyzing all the variants the best device with AlGa<sub>N</sub> = 4 nm,  $L_{gate} = 2 \mu m$ , and p-type GaN =  $1.2 \times 10^{19} cm^{-3}$  is predicted  $V_{th} = 1.263 V$  and  $R_{ON} = 3.317 \Omega$ .  $V_{Th} = 1.224 V$  and  $R_{ON} = 3.235 \Omega$ , which are extremely like the ANOVA-ANN prediction, are obtained via the TCAD verification.

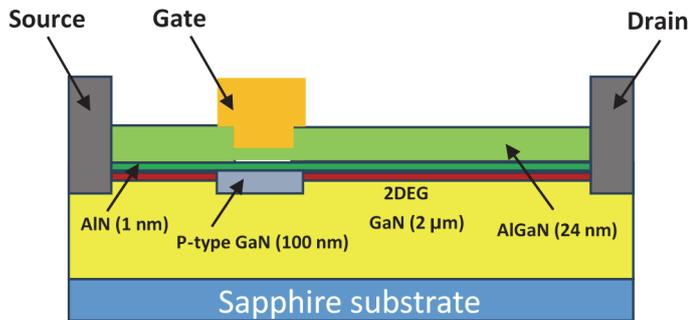


Fig. 2. Scheme of GaN HEMT to indicate the device components and their dimension

[9] presents under gate terminal p-GaN layer doping effect for enhancement-mode (E-mode) GaN HEMT. By simulations, optimal values for the following performance parameters  $R_{on}$  and  $Q_g$  are found. Once a higher doping method has been used, the device gives lower  $R_{on}$ , and can be used in lower switching schemes. For the lower doping method,  $Q_g$  is lower, which is the result of the device reaching a certain gate voltage faster.

The method in [10] focuses on switching energy losses determination for 2 types of GaN HEMTs cascode and E-mode. For comparison, 2 models TP65H035WS and GS66508T are used. As a result, for total switching energy losses E-mode HEMTs are preferable, because energy consumption is two - three times lower. The  $dv/dt$  value of E-mode HEMT became significantly bigger, specifically when the transistor was turned off (up to 150  $V/ns$ ).

### 1.2.2. Depletion-mode (D-mode) GaN HEMT

In [11], for D-mode AlGaN/GaN metal-insulator-semiconductor (MIS)-HEMT model on a Si substrate the temperature sensitivity was studied (Fig. 3). This work reports on the high-temperature (HT) operation around 25°C-400°C and temperature sensing mechanism of a D-mode AlGaN/GaN metal-insulator-semiconductor (MIS) D-mode GaN HEMT on silicon substrate. In the subthreshold functioning region of the transistor, most Si-based CMOS temperature sensors have little currents (*tens of picoamperes/mm*) but HT sensitivity. The conductivity of the 2DEG in the channel region of AlGaN/GaN HEMTs has been found to be influenced by donor-like traps at the GaN-cap/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> interface and acceptor-like traps in the GaN buffer layer. The data analysis presents the effect of these traps on the electron concentration in the 2DEG and the temperature sensitivity of the HEMT drain current. This is achieved by comparing HEMT  $I_D$ - $V_G$  measurements with the results of 2-D simulations. When the drain-source current ( $I_{DS}$ ) is 10  $\mu A/mm$ , the temperature sensitivity of the device under subthreshold operation is close to 8.73%/K. This is comparable to the stated values for silicon devices, but at far higher current densities and over a much larger temperature range.

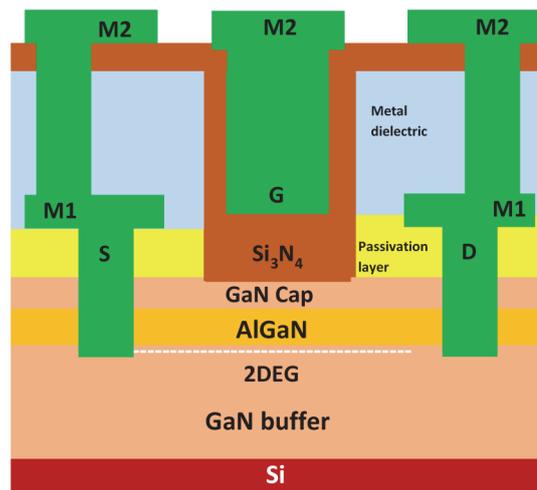


Fig. 3. Scheme of GaN HEMT to indicate the device components and their dimension

In [12], Si based D-mode GaN HEMT device for the high voltage operations is presented. The device worked over 200 V with an isolation resistance of  $4.68 \times 10^{10}$  Ohms/sq and shows a peak trans-conductance of 110 mS/mm. For device fabrication 650  $\mu\text{m}$  thick silicon substrate, was used for forming 2DEG in GaN HEMT device a GaN buffer layer of 3.9  $\mu\text{m}$  and AlGaN barrier layer (20 nm) over buffer layer was used. For fixing leakage currents a GaN cap layer of 2 nm thickness is grown over the barrier layer.

As mentioned in [13], the D-mode GaN HEMTs has been used for design monolithic high-efficiency buck converter. D-mode GaN HEMTs provide greater frequency and current density, making them suitable for Monolithic Microwave Integrated Circuits (MMICs) Power amplifier (PA) design. A monolithic GaN buck converter with integrated drive circuits and GaN switches is the most efficient strategy for minimizing parasitic and area in the envelope-tracking supply modulator (ETSM) systems. This buck reaches a peak efficiency of 90.7%, with a peak output power of 11.6 W at a 112.5-MHz switching frequency. PA efficiency was increased by 14.3% compared with the PA with fixed supply voltage.

### 1.2.3. GaN-on-Si HEMT

In [14], GaN HEMTs processed on a silicon substrate is used in this type (Fig. 4). It offers a cost advantage and is compatible with conventional silicon processing techniques. Source and drain (S/D) ohmic connections were made using Au-free Ta/Al metals that had recessed etching. The ohmic contact resistance may be decreased because of GaN or InGaN regeneration [15-17]. After establishing a rectangular gate with a  $L_G$  of 80 nm using electron beam lithography (EBL), Ti/Al (20 nm/60 nm) metallization was carried out. In the final stage, the devices' surface was passivated using 10-nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A Keysight B1505A semiconductor device analyzer was used for DC characteristics analysis, and a Keysight N5244A PNA-X network analyzer was used for RF small signal characteristics analysis. Large signal RF power characteristics were measured using the Maury load-pull technique. Ultimately, a metallization process compatible with CMOS was used to construct GaN-on-Si HEMTs with 80-nm rectangular gates. An exceptional  $f_{\text{MAX}}$  of 74 GHz, and  $I_{\text{dmax}}$  of 1.95 A/mm were received. With a mobile SoC-compatible supply voltage of 5 V, the device obtained  $P_{\text{out}} > 1$  W/mm and the gain of 16 dB at 2.5, 3.5, and 5 GHz. The outcomes show that GaN-on-Si HEMTs have the potential to be highly performing and reasonably priced RF in 5 G sub-6 GHz mobile SoC applications. As a result, it is figured out that the device is perfect for cost sensitive applications. GaN-on-Si HEMTs offer a balance of performance and cost, making them ideal for commercial microwave applications. However, there are a couple of issues with:

- *Lower thermal conductivity* - Silicon has a lower thermal conductivity than SiC, which may restrict its capacity to disperse heat and impact high-power microwave circuit performance;
- *Substrate-related losses* - The material characteristics of silicon can result in parasitic losses at high frequencies, which lowers the effectiveness of MICs that operate in the microwave spectrum.

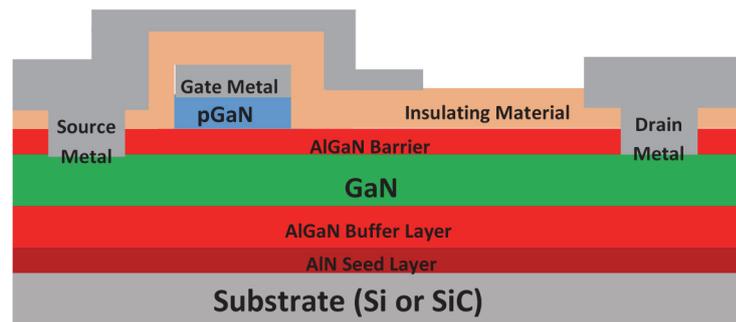


Fig. 4. By growing a p-type E-Mode GaN layer on top of the AlGaIn the 2DEG is depleted at zero volts on the gate on Si or SiC substrate

[18] presents 200 mm Si substrate E-mode GaN-on-Si HEMTs working on up to 100 V  $V_{DS}$  voltage for power electronics industry. The device presents an ultralow drain leakage current at maximum  $V_{DS}$  voltage. The dynamic  $R_{ds-on}$  behavior of the manufactured devices is measured using a resistive load test equipment. The 150  $\mu F$  capacitors and 5  $\Omega$  to 100  $\Omega$  load resistors were employed, with a stress  $V_{DS}$  range of 5 V to 100 V. As a result, a high reliability device based on Si substrate is presented.

The method in [19] focuses on developing E-mode GaN HEMT in GaN-on-Si material for 150 mm wafer. The final device structure characterized the breakdown behavior.  $V_{BR}$  values of up to 1000 V were reached through growth optimization of the GaN layer. As mentioned by the author for next research of the electrical characterization of the developed device will be presented.

#### 1.2.4. GaN-on-SiC HEMT

In [20], GaN-on-SiC HEMT technology examined in microwave oscillators implementation, instead of gallium arsenide (GaAs), indium phosphide (InP), or silicon germanium (SiGe) technology. By using GaN-on-SiC technology they avoid the use of additional power amplifiers for the correction of relatively low output power level. Depending on the field of use of the integrated oscillator, it can be divided into a voltage-controlled oscillator (VCO) or a fixed-frequency oscillator (FFO). In [21], the first VCO made with GaN HEMT technology is unveiled. It features a 10% frequency tuning range, an output power of more than

28 dBm, a phase noise (PN) of -92 dBc/Hz at an offset frequency of 100 kHz, and the ability to operate at 6 GHz. Other GaN VCOs which also operate at the C-band or X-band, as demonstrated in [22 - 24], have limited applications because of their comparatively low PN. The ultra-low PN integrated FFO described in this study was made using Cree's 0.25 μm GaN-on-SiC HEMT technology, and the die was connected to the PCB and heat sink for measurement. According to the measurements, the proposed FFO had an 8.6% DC-RF efficiency, 21 dBm power, and ran at 7.9 GHz. Additionally, PN is 113 dBc/Hz at 100 kHz and 135 dBc/Hz at 1 MHz offset frequency. In conclusion, that device is ideal for managing heat and high power, because of its excellent thermal characteristics and high-power handling, GaN-on-SiC HEMTs are typically the best option for high-power microwave applications, nevertheless, there are additional issues related to:

- *More costly* - SiC substrates are more costly than silicon, which raises the total cost of the device and circuit.
- *Complex processing* - GaN-on-SiC devices are more difficult to fabricate, which can restrict supply and make microwave circuit design more complicated.

As mentioned in [25], the GaN-on-SiC-based device has been presented with a high doped buffer layer. By the following options like a highly doped buffer region, AlN nucleation layer and SiC substrate under gate terminal a better 2DEG layer is formed. Compared with other variants on substrate materials SiC provides a better lattice mismatch, thermal resistance, etc. (Table).

Table

Some key properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC, and Si

Substrate	Crystal plane	Lattice spacing <i>Å</i>	Lattice mismatch %	Relative thermal expansion 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>	Thermal conductivity <i>W/cm*K</i>	Relative Cost
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(0001)	4.758	16.1	-1.9	0.42	Middle
SiC	(0001)	3.08	3.5	1.4	3.8	Highest
Si	(111)	3.84	-17	3	1.5	Lowest

It is necessary to evaluate certain trade-offs for each kind of GaN HEMT keeping in mind the specific needs of your microwave integrated circuit design; For example, how well-balanced are the designs for drivers and ICs, including power and control?

## 2. Transistor models and characteristics

Several manufacturers have produced GaN HEMT transistors and therefore several successful models aimed at different applications that are all available on the market. Such models are different in key parameters, such as power output; frequency band; applicable area, such as RF/microwave technology, power

electronics, etc. This is a comparative evaluation of the advantages and disadvantages of the different models of GaN HEMT from different manufacturers for their use in microwave integrated circuits.

### **2.1. Cree (Wolfspeed) GaN HEMT Model CCGH40045**

The model presented in paper [26] is a GaN HEMT model which is classified as  $-48\text{V}$  RF IC for microwave applications focused on bandwidth up to  $4\text{ GHz}$ . This device employs GaN technology, which is superior to silicon technology in terms of dielectric breakdown due to high electrical mobility enhancing electron density, rectifying and improving power efficiency. Special attention, regarding thermal management, is paid in the construction of CCGH40045 allowing it to remain functional at high operating conditions and ensuring a high degree of reliability against failure in harsh environments. Its compact design facilitates integration into smaller microwave systems, an essential attribute for applications with size limitations, such as radar and advanced communication systems, while maintaining performance integrity. Targeted for radar and communication applications, this device delivers high power output. Operating at 28 volts, the CGH40045 offers a broad solution that is suitable for microwave and RF applications. GaN HEMTs are highly efficient and provide a lot of gain and have a lot of bandwidth making this device CGH40045 useful noise blocks/linear and compressed amplifier circuits. For high-power, lower frequency MICs, models like the CGH40045 are ideal because they have a large power output, and good heat dissipation as a model type, this model also has some disadvantages such as:

- High degree of thermal power means there will be a requirement of more advanced cooling solutions whatsoever.
- In compact microwave integrated circuit designs a few models have relatively larger pack sizes, which can result in larger circuit size.

### **2.2. Ampleon GaN HEMT model CLF1G0035-50**

In [27], a study that explores the characteristics of a GaN HEMT model with particular focus on RF applications in the  $0.5$  to  $3.5\text{ GHz}$  range has been found. The model has compatibility with broadband wireless communication systems. The CLF1G0035-50 GaN HEMT is designed for instrumentation and base station applications which require high radio frequency ranging from  $0.5$  to  $3.5\text{ GHz}$  frequency band making it ideal for broadband wireless communication systems. This device makes use of GaN technology which has excellent thermal management properties and high breakdown voltage, so the choice depends on your specific MIC design requirements (frequency range, power output, cost, and thermal considerations).

- Limited to lower microwave frequencies, which can restrict its use in high-frequency MICs.
- These levels may be regarded as moderate, which rules out their use in cases requiring high power levels.

### **2.3. Qorvo GaN HEMT model TGF2935**

In [28], a general-purpose GaN HEMT for high-frequency applications is presented, which is up to 18 GHz. It is often employed in RF amplifiers for communications and defensive applications. The Qorvo TGF2935 model of GHz HEMT can be described as a wide-band high-power amplifier covering up to 18 GHz frequency range, a typical example being Qorvo's GaN HEMT TGF2935 model or Qorvo's GaN technology. This device has a wide bandwidth with good efficiency and is suitable for RF amplification in communication and defense systems. High power density and efficient thermal management which is inherent in GaN technology are necessary for reliable performance in harsh environmental conditions. Besides, the TGF2935 is built in such a way as to meet high linearity expectations, thus being beneficial in preventing signal losses across a large frequency range in multi usage broadband and broadband pulsed applications. For high-frequency MICs, models like TGF2935 are suitable for high-frequency microwave circuits loads such as radar and the communication of satellites, but this model has also some bad points like:

- It's more costly than other models which can be a problem in high power microwave circuits.
- At these power levels, thermal management becomes a major headache and requires the use of advanced cooling approaches.

## **3. Microwave integrated circuit design**

### **3.1. Basics of MICs**

In [29], foundational information is provided regarding the theoretical principles of MIC design, including the aspects related to transmission lines, modeling of linear networks, the definition of S parameters, and elements pertinent to microwave metrology and network design.

### **3.2. MICs design key methods**

#### **3.2.1. Monolithic and Hybrid Microwave Integrated Circuits**

In [30], MMICs and HMICs methods are proposed, which are based on single or multiple semiconductor dies, to provide standard RF capabilities in standardized packages. These two MMICs and HMICs for design methods for microwave integrated circuits are key methods in RF systems, but they provide different capabilities and functionalities. HMICs and MMICs are the two chief and integrated circuits used in microwave systems. Apparently, almost all new microwave components are touted to be MMICs. Their main differences tend to rest in the construction methods:

- MMICs consist of 1 single semiconductor die. A single base material is used to fabricate all circuits and components on the chip. This is done with standard planar processes, although future MMICs will be designed as 3D circuits using heterogeneous integration.

- HMICs consist of discrete, semiconductor or integrated circuit blocks. Devices are then connected with metalized wires and contacts, forming a modularized structure.

Both types of circuit are then encapsulated in epoxy or similar material. Such packages are generally standard IPC form factors such as QFN and SOT. Since these components function at microwave range frequencies, they are not normally through hole parts, through hole leads tend to cause high frequency signal integrity problems associated with stubs. When MMIC or HMIC devices do not come in custom packages they may look close to a Si integration.

### **3.2.2. GaN HEMTs in MICs design**

The GaN HEMT devices are considered a precious resource in MIC design because of their extremely high electron mobility, allowing these devices to amplify power efficiently at high frequencies. Thus, their application can be expanded to MMIC and distributed circuit designs. Still, there are challenges with regards to managing heat dissipation and integration costs, as these devices are quite costly to manufacture and dissipate a lot of heat when operated at high power levels. It remains important to deal with the above issues since this will enable the devices to be more effectively used in advanced microwave applications.

## **4. Results**

During the analysis, the following measures were indicated concerning the functioning of microwave integrated circuits with GaN HEMT transistors:

- Performance optimization – Tackling the limitations in the power efficiency and the frequency response of the microwave integrated circuits utilizing GaN HEMT transistors.

- Thermal management solutions - Presenting methods of achieving minimization of heat production and improvement of cooling techniques in GaN HEMT based circuits.

- Reliability and longevity – Discussing the subject of the increased tolerance and operational life of the microwave circuits populated with GaN HEMT transistors under high stress conditions.

- Cost-effective manufacturing - Investigating techniques which will lead to a decrease in the production cost of these circuits while at the same time improving the effectiveness of GaN HEMT transistors in these circuits.

- Signal integrity and noise reduction – Discussing methods designed for the reduction of signal loss and noise in microwave integrated circuits by using GaN HEMT transistor configuration.

▪ Future research directions – Recommending areas for further investigation such as advancing the materials or scaling techniques to further improve the capabilities of GaN HEMT transistors for microwave use.

**Conclusion.** GaN HEMTs have become a pivotal technology in the development of integrated circuits, especially in applications that demand high power and high-frequency capabilities. While offering improved electron mobility, a greater breakdown voltage and exceptionally good thermal conductivity, these devices have many more advantages over the traditional silicon-based transistors. Such capabilities help to transfer power effectively, reduce switching losses, and permit high frequency operation, making the GaN HEMTs ideally suited for RF amplifiers, power supplies of high efficiency and many other sophisticated electron systems. However, there are several other problems the GaN HEMT industry is facing. First and foremost is the high cost of the production that comes with GaN materials. GaN device production requires expensive substrates such as silicon carbide or sapphire as opposed to the silicon substrate which pushes up production costs. Additionally, GaN HEMTs inherently suffer from equipment thermal management problems because of their high-power density. Proper heat removal is critical for the designed basic reliability of the device particularly in the cases of high-power density and for the tightly packed integrated circuitry.

## REFERENCES

1. **Leuzzi G., Stornelli V., Ellinghaus P.** Simulation of GaN/AlGaIn heterostructures for a HEMT simulator // UNIVERSITY of L'AQUILA, Faculty of Engineering Department of Pure and Applied Mathematics, Master Thesis in Mathematical Engineering. - 2011. -P. 1 - 7.
2. **Liang X.** Characterization of GaN based HEMTs for power electronics // Degree project in engineering physics, second cycle, 30 credits.- Stockholm, Sweden, 2020. -P. 4.
3. ASM GaN: Industry Standard Model for GaN RF and Power Devices—Part 1: DC, CV, and RF Model / **Sourabh Khandelwal, Yogesh Singh Chauhan, Tor A. Fjeldly, Sudip Ghosh, et al** // IEEE Transactions on Electron Devices.- January, 2019. - Vol. 66, issue 1.-P. 80–86.
4. **Wu H., Fu X. and Hu S.** A 650V Enhancement Mode GaN HEMT Device with Field Plate for Power Electronic Applications// 2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE).- Kuala Lumpur, Malaysia, 2021. -P. 1-5.
5. Broadband GaN HEMT Microwave Integrated Circuit for Space Applications / **Ken Osawa, Hiroyuki Yoshikoshi, Akitada Kodama, Tsuneyuki Tanaka, et al** // SEI TECHNICAL REVIEW.- OCTOBER 2018. -N87.

6. **Kou L. and Lu J.** Applying GaN HEMTs in Conventional Housing-Type Power Modules // 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).- Detroit, MI, USA, 2020. -P. 4006-4011.
7. **Transistors Functions | Electronics Basics | ROHM**, Accessed: 10/16/2024.
8. Methodology to Optimize E-Mode GaN HEMT with P-Type Doping under 2DEG Layer / **M.F. Abdullah, N.A. Aziz and H.W. Lee, et al** // 2024 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE). - Kuala Lumpur, Malaysia, 2024. -P. 9-12.
9. **Mahajan D. and Khandelwal S.** Impact of p-GaN layer Doping on Switching Performance of Enhancement Mode GaN Devices // 2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). - Padua, Italy, 2018. -P. 1-4.
10. **Vukić V.D., Mrvić J. and Katić V.A.** Comparison of the Switching Energy Losses in Cascode and Enhancement-Mode GaN HEMTs// 2019 20th International Symposium on Power Electronics (Ee). - Novi Sad, Serbia, 2019. -P. 1-5.
11. High-Temperature Sensitivity of a Depletion-Mode AlGaIn/GaN MIS-HEMT / **Z. Mutsafi, K. Shimanovich, V. Kairys, R. Shima-Edelstein, et al** // In IEEE Transactions on Electron Devices.- Nov. 2021.- Vol. 68, no. 11. -P. 5695-5700.
12. 200 V-Depletion mode GaN HEMT on Si / **P. Kachhawa, S. Mishra, A.K. Jain, et al** // 2020 5th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE). - New Delhi, India, 2020. -P. 1-4.
13. A Monolithic D-Mode GaN-Based Buck Converter With Novel Resistor-Capacitor-Multiplexing Dead-Time Adjustment Structure for Envelope-Tracking Power Amplifier Application / **C. Bo, et al** // In IEEE Microwave and Wireless Technology Letters.- July 2025.- Vol. 35, no. 7. -P. 1065-1068.
14. GaN-on-Si HEMTs Fabricated with Si CMOS-Compatible Metallization for Power Amplifiers in Low-Power Mobile SoCs / **H. Xie, et al** // In IEEE Microwave and Wireless Components Letters.- Feb. 2021.- Vol. 31, no. 2. -P. 141-144.
15. GaN HEMTs on Si with regrown contacts and cutoff/maximum oscillation frequencies of 250/204 GHz / **L. Li, et al** // IEEE Electron Device Lett.- May 2020.- Vol. 41, no. 5. - P. 689-692.
16. 3D heterogeneous integration of high performance high-K metal gate GaN NMOS and Si PMOS transistors on 300 mm high-resistivity Si substrate for energy-efficient and compact power delivery RF (5G and beyond) and SoC applications / **H.W. Then, et al** // IEDM Tech. Dig.- Dec. 2019. -P. 17-1-17-3.
17. MBE-regrown ohmics in InAlN HEMTs with a regrowth interface resistance of  $0.05\text{-}\Omega\text{-mm}$  / **J. Guo, et al** // IEEE Electron Device Lett.- Apr. 2012.- Vol. 33, no. 4.- P. 525-527.
18. Reliability of 200mm E-mode GaN-on-Si Power HEMTs / **D.C. Zhou et al** // 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS).- Dallas, TX, USA, 2020. -P. 1-3.
19. HEMT test structure technology for fast on-wafer characterization of epitaxial GaN-on-Si material / **M. Schuster, et al** // 2013 International Semiconductor Conference Dresden - Grenoble (ISCDG).-Dresden, Germany, 2013.-P. 1-3.
20. Design of Ultra-Low Phase Noise and High-Power Integrated Oscillator in 0.25  $\mu\text{m}$  GaN-on-SiC HEMT Technology / **H. Liu, X. Zhu, C.C. Boon, X. Yi, et al** // In IEEE Microwave and Wireless Components Letters.- Feb. 2014.- Vol. 24, no. 2. -P. 120-122.

21. **Shealy J.B., Smart J.A., and Shealy J.R.** Low-phase noise AlGaIn/GaN FET-based voltage-controlled oscillators (VCOs) // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.- Jun. 2001.- Vol. 11, no. 6. -P. 244-245.
22. **Kaper V.S., Thompson R.M., Prunty T.R., and Shealy J.R.** Signal generation control and frequency conversion AlGaIn/GaN HEMT MMICs // IEEE Trans. Microw. Theory Tech.- Jan. 2005.- Vol. 53, no. 1. -P. 55-65.
23. A low phase-noise X-band MMIC VCO using high-linearity and low-noise composite-channel HEMTs / **Z.Q. Cheng, Y. Cai, J. Liu, Y. Zhou, et al** // IEEE Trans. Microw. Theory Tech.- Jan. 2007.- Vol. 55, no. 1. -P. 23-29.
24. A monolithic AlGaIn/GaN HEMT VCO using BST thin-film varactor / **C. Kong, H. Li, X. Chen, S. Jiang, et al** // IEEE Trans. Microw. Theory Tech.- Nov. 2012.- Vol. 60, no. 11. -P. 3413-3419.
25. Investigation of Single Event Transients in Buffer-Free GaN-on-SiC HEMT / **S. Raut, K. Sehra, M. Mishra, D.S. Rawal, et al** // 2020 5th IEEE International Conference on Emerging Electronics (ICEE).- New Delhi, India, 2020. -P. 1-4.
26. Cree, Wolfspeed, CGH40045, 45 W, DC - 4 GHz, GaN HEMT - Accessed: 06/08/2025.
27. **CLF1G0035-50\_1G0035S-50.fm** - Accessed: 06/08/2025.
28. **Important Notice - Qorvo** - Accessed: 06/08/2025.
29. **L'vov A.A., Semezhev N., Solopekina A.A., and Meschanov V.P.** A theoretical basics of microwave networks for software defined radio systems // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE).- Saratov, Russia, 2016. -P. 1-5.
30. **Monolithic and Hybrid Microwave Integrated Circuits: What's the Difference?** - Accessed: 06/08/2025.

Yerevan State University. The material is received on 06.09.2025.

#### Լ.Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

#### **GaN HEMT ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐՆԵՐՈՎ ՄԻԿՐՈՍԼԻՔԱՑԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԻԿՐՈՍԿԵՄԱՆ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՌԿԱ ՎԻՃԱԿԸ ԵՎ ՀԻՄՆԱՀԱՐՑԵՐԸ**

Գալիումի նիտրիդի (GaN) բարձր էլեկտրոնային շարժունակությամբ տրանզիստորները (HEMT) միկրոալիքային ինտեգրալ սխեմաների (MIC) հիմնական մասերն են՝ իրենց բարձր էլեկտրոնային շարժունակության, լայն արգելման գոտու, կրիտիկական դաշտի, թափանցելիության և բացառիկ ջերմահաղորդականության շնորհիվ: Այս տարբերակները թույլ են տալիս GaN HEMT-ներին՝ աշխատել ու ավելի բարձր հաճախականություններով և հզորության մակարդակներով, քան ավանդական սիլիցիումային տրանզիստորները: Ռադիոհաճախականության և միկրոալիքային համակարգերի դեպքում դա նրանց ապահովում է արդյունավետություն: GaN HEMT-ների կարևորությունը MIC-ներում կարելի է թվարկել հետևյալ կերպ՝ ավելի բարձր հզորությամբ խտություն, բարելավված արդյունավետություն, լայն հաճախականությամբ աշխատանք, ջերմային կայունություն: Այս առավել-

լուծումները GaN HEMT-ները դարձնում են կարևորագույն տեխնոլոգիա այսօրվա կապի համակարգերի, պաշտպանական և տիեզերական տեխնոլոգիաների ոլորտներում: Վերջին տարիներին GaN HEMT-ների վերաբերյալ առաջարկվող տարբեր տեխնոլոգիաներ ամփոփվել և համեմատվել են: Ներկայացվում են համեմատաբար հաճախ օգտագործվող GaN HEMT-ների տեսակները, ներառյալ դրանց մոդելները: Քննարկվում են GaN HEMT-ի 3 հիմնական ենթաճյուղեր՝ տրանզիստորների տեսակները, տրանզիստորների մոդելներն ու բնութագրերը և MIC-ների նախագծումը: Դրանցից յուրաքանչյուրն ունի իր առավելություններն ու թերությունները, և կախված խնդրից՝ կարելի է ընտրել ամենահարմարը: Արդյունքում, ընդգծվում են մի քանի կարևոր խնդիրներ, ինչպիսիք են՝ աշխատանքի օպտիմալացումը, ջերմային կառավարման լուծումները, հուսալիությունը և երկարակեցությունը, ազդանշանի ամբողջականությունը և աղմուկի նվազեցումը, ապագա հետազոտությունների ուղղությունները և այլն:

*Առանցքային բառեր.* բարձր էլեկտրոնային շարժունակությամբ տրանզիստորներ, միկրոալիքային ինտեգրալ սխեմաներ, ավելի մեծ հզորությամբ խտություն, բարելավված արդյունավետություն, լայն հաճախականության գործարկում, ջերմային կայունություն:

**Л.К. КАРАПЕТЯН**

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ТРАНЗИСТОРАМИ GaN HEMT**

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе нитрида галлия (GaN) являются ключевыми частями микроволновых интегральных схем (MIC) из-за их высокой подвижности электронов, широкой запрещенной зоны, критического поля, диэлектрической проницаемости и исключительной теплопроводности. Эти опции позволяют GaN HEMT работать на более высоких частотах и уровнях мощности, чем традиционные кремниевые транзисторы. Для радиочастотных и микроволновых систем это обеспечивает им эффективность. Важность GaN HEMT в MIC заключается в следующем: более высокая плотность мощности, улучшенная эффективность, работа в широком диапазоне частот, термостабильность. Эти преимущества делают GaN HEMT важнейшей технологией для современных систем связи, оборонных и космических технологий. В работе обобщены и сравнены различные предлагаемые в последние годы технологии GaN HEMT. Представлены относительно часто используемые типы GaN HEMT, включая их модели. Обсуждаются три основные подветви GaN HEMT: типы транзисторов, модели и характеристики транзисторов и конструкция MIC. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки, в зависимости от проблемы можно выбрать наиболее подходящую подветвь. В результате было выделено несколько важных проблем, таких как оптимизация производительности, решения по управлению температурным режимом, надежность и долговечность, целостность сигнала и снижение шума, будущие направления исследований и т.д.

*Ключевые слова:* транзисторы с высокой подвижностью электронов, микроволновые интегральные схемы, более высокая плотность мощности, улучшенная эффективность, работа в широком диапазоне частот, термостабильность.

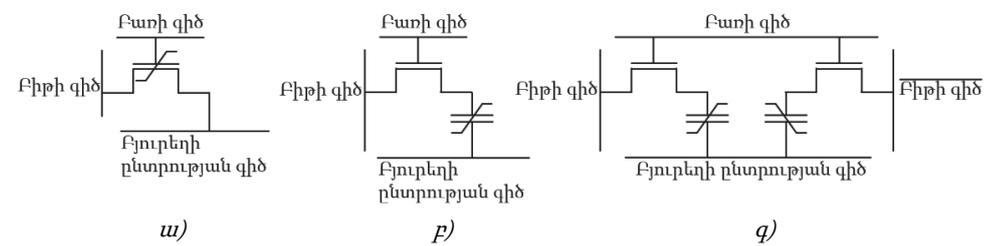
**Դ.Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ**

**BiFe<sub>0.7</sub>Mn<sub>0.3</sub>O<sub>3</sub> ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՍՏԱՑՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

BiFe<sub>0.7</sub>Mn<sub>0.3</sub>O<sub>3</sub> կերամիկական թիրախներից իմպուլսային լազերային փոշեցրման տեխնոլոգիայի միջոցով մասնային կառուցվածքով և ոսկե էլեկտրոդներով քվարցե հարթակի վրա ստացվել են նանոթաղանթներ: Ուսումնասիրվել են ստացված նանոթաղանթների բևեռացման վեկտորի և կիրառված էլեկտրական դաշտի լարվածության կախվածությունները՝ տարբեր հաճախությունների դեպքում, ինչպես նաև բևեռացման վեկտորի և էլեկտրական դաշտի լարվածության կախվածությունները՝ արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ և առանց դրա:

**Առանցքային բառեր.** մուլտիֆերոէլեկտրիկ, նանոթաղանթ, իմպուլսային լազերային փոշեցրում, օպերացիոն հիշող սարք, մագնիսական դաշտ, բևեռացման վեկտոր:

**Ներածություն:** Մուլտիֆերոէլեկտրիկները, շնորհիվ իրենց հատկությունների, համարվում են հեռանկարային նյութեր և կիրառվում են հետևյալ ոլորտներում՝ բարձր խտությամբ էներգաանկախ օպերացիոն հիշող սարքեր, կարգաբերելի ինդուկտորներ ու գոխչներ, մագնիսական դաշտի սենսորներ, փուլը շրջող/շեղող սարքեր և այլն [1-9]: Էներգաանկախ օպերացիոն հիշող սարքերի (ՕՀՍ) կառուցման համար առկա է մի քանի հիմնական ճարտարապետություն՝ մեկ տրանզիստորային (1T), տրանզիստորակոնդենսատորային (1T-1C), կրկնակի տրանզիստորակոնդենսատորային (2T-2C), որոնց բջիջների էլեկտրական սխեմաները բերված են նկ.1-ում [10]:



Նկ. 1. Էներգաանկախ օպերացիոն հիշող սարքերի բջիջների էլեկտրական սխեմաները.  
 ա) 1T, բ) 1T-1C, գ) 2T-2C

Ի տարբերություն ավանդական ՕՀՄ բջջի՝ էներգաանկախ ՕՀՄ բջջում կուտակիչ ունակության կամ տրանզիստորի փականի էլեկտրոդի և հաղորդիչ հոսքուղու միջև գտնվող դիէլեկտրիկ նյութի փոխարեն կիրառվում են մուլտիֆերոէլեկտրա-կան նյութեր [10]:

Ֆերոէլեկտրական և ֆերոմագնիսական հատկությունների միաժամանակյա առկայությամբ պայմանավորված՝ մուլտիֆերոէլեկտրական նյութերին բնորոշ առանձնահատկություն է մագնիսաէլեկտրական կապը, որը հնարավորություն է տալիս սենյակային ջերմաստիճանի պայմաններում արտաքին էլեկտրական/մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ փոխել նյութի մագնիսական/էլեկտրական հատկությունները [4-7]: Շնորհիվ այս առանձնահատկության՝ մուլտիֆերո-էլեկտրիկների հիման վրա պատրաստված էներգաանկախ ՕՀՄ-ներին բնորոշ են ինչպես ֆերոէլեկտրական, այնպես էլ ֆերոմագնիսական ՕՀՄ-ների առավելությունները, որոնցից է տվյալների գրանցում/ընթերցում գործառնությունների բարձր արագությունը, ինչպես նաև՝ էներգիայի փոքր ծախսը [11]:

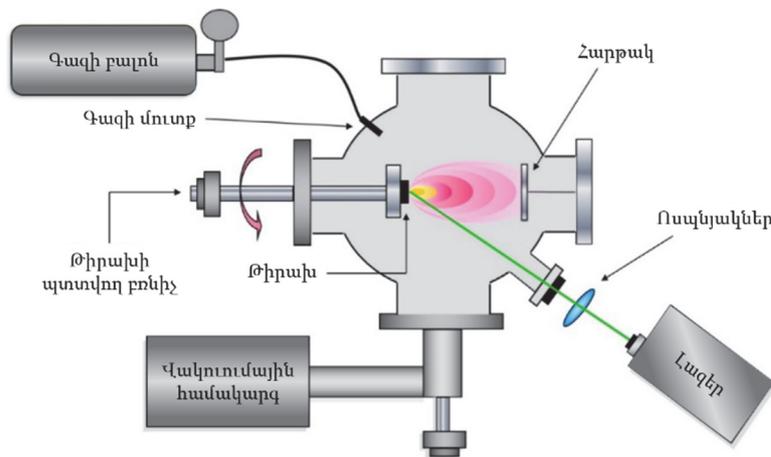
Մուլտիֆերոէլեկտրիկները երկու տեսակ են՝ միաֆազ և կոմպոզիտային: Որպես միաֆազ մուլտիֆերոէլեկտրիկ լայն տարածում է գտել բիսմութ ֆերիտը՝  $\text{BiFeO}_3$  (BFO), որը բյուրեղային կառուցվածքով պերովսկիտ նյութ է [3, 7]: Բիսմութ ֆերիտը օգտագործման համար հեռանկարային նյութ է և մեծ ուշադրության է արժանացել՝ շնորհիվ Կյուրիի և Նիլի բարձր ջերմաստիճանների ( $T_C=830$  °C,  $T_N=370$ °C), ինչպես նաև բարձր մնացորդային բևեռացման ( $P_s=90-100$  մկԿ/սմ<sup>2</sup>) հատկանիշների [2, 4-7, 9, 12]: Այնուամենայնիվ, բիսմութ ֆերիտին բնութագրական են թույլ մագնիսաէլեկտրական կապը և կորստի մեծ հոսանքը, որոնք դիտարկվում են որպես նյութի թերություններ, ընդ որում, այս թերությունները կարելի է բարելավել՝ նյութի իոնների մի մասը փոխարինելով մեկ այլ նյութի իոններով, պահպանելով նյութի ստեխիոչափությունը, ինչպես նաև՝ այլ պերովսկիտ նյութի հետ խառնելու մեթոդներով [1, 4-7, 13]:

Նախորդ աշխատանքում մշակվել է մանգանի հավելումով բիսմութ ֆերիտի կերամիկական նմուշների ստացման տեխնոլոգիան, ինքնատարածվող բարձր ջերմաստիճանային սինթեզի տեխնոլոգիայով կատարվել է  $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$  նյութի սինթեզը, ուսումնասիրվել են այրման ջերմաստիճանի և այրման ճակատի տարածման արագության կախվածությունները բովախառնուրդում վառելիքի քանակից, նպատակային նյութի սինթեզման աստիճանը պարզելու համար կատարվել է սինթեզված նյութի ռենտգենաֆազային վերլուծություն, որից հետո պարզ է դարձել, որ նպատակային նյութը սինթեզվում է անհրաժեշտ ֆազով, երբ ելանյութերի խառնուրդում վառելիքի քանակությունը 9...12 % է: Այնուհետև իրականացվել է սինթեզված նյութի մշակում (մանրացում, մամլում և թրծում), հետազոտվել են նմուշների դիէլեկտրական թափանցելիության և կորուստների անկյան տանգենսի կախ-

վածությունները հաճախությունից, ինչպես նաև վոլտամպերային բնութագրերը [14]:

**Աշխատանքի նպատակը:** Պատրաստված  $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$  կերամիկական թիրախներից իմպուլսային լազերային փոշեցրման տեխնոլոգիայով անհրաժեշտ է ստանալ նանոթաղանթներ և իրականացնել դրանց հատկությունների հետազոտություն:

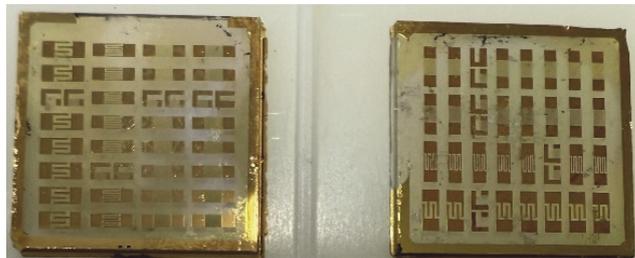
**Փորձնական մաս:** Նախորդ աշխատանքի արդյունքում [14] պատրաստված կերամիկական թիրախներից նանոթաղանթներ ստանալու նպատակով դրանք ենթարկվել են իմպուլսային լազերային փոշեցրման (ԻԼՓ): ԻԼՓ տեխնոլոգիան նանոթաղանթների վակուումային նստեցման տեխնոլոգիա է, երբ վակուումային խցիկում դեպի կերամիկական թիրախ ուղղված մեծ ինտենսիվությամբ իմպուլսային լազերի փնջի միջոցով նյութը փոշիանում է թիրախից և, նյութի ստեխիոչափությունը պահպանելով՝ նստեցվում է հարթակի վրա՝ որպես նանոթաղանթ: Այս գործընթացը տեղի է ունենում խոր վակուումում կամ գազային նյութի միջավայրում, ինչը հաճախ կիրառվում է կոմպոզիցիոն նյութերի նստեցման ժամանակ [15]: Ավանդական այլ տեխնոլոգիաների համեմատ՝ ԻԼՓ տեխնոլոգիայի կառուցվածքը բավականին պարզ է, որը սխեմատիկորեն ներկայացված է նկ.2-ում [16]:



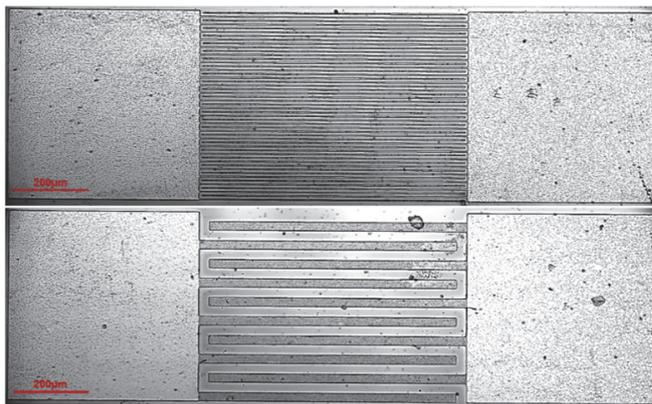
Նկ. 2. ԻԼՓ սարքավորման կառուցվածք

Կերամիկական թիրախը և քվարցե հարթակը տեղադրվել են վակուումային համակարգի խցիկում գտնվող թիրախի և հարթակի բռնիչների մեջ: Հարթակի երկրաչափական չափերն են. երկարությունը՝ 10 մմ, լայնությունը՝ 10 մմ, բարձրությունը՝ 1 մմ: Հարթակի բռնիչն ունի տաքացման հնարավորություն, իսկ թիրախի բռնիչը՝ պտտման հնարավորություն: Գազի հոսքը կարգավորող սարքի միջոցով թթվածինը բալոնից մատակարարվել է վակուումային համակարգի խցիկին,

որտեղ ստեղծվել է 0.01 մրար ճնշմամբ թթվածնային միջավայր: Այնուհետև KrF excimer իմպուլսային լազերի աղբյուրից ստացված մեծ ինտենսիվությամբ լազերի փունջը, որի ալիքի երկարությունը՝  $\lambda = 248$  նմ, իմպուլսի տևողությունը՝  $\tau = 30$  նվ, էներգիայի խտությունը 1.5 Ջ/սմ<sup>2</sup> է, և լազերն աշխատում է 10 Հց հաճախությամբ, հայելիների և ոսպնյակների միջոցով ուղղվել է կերամիկական թիրախի վրա 45° անկյան տակ, իսկ հարթակը տեղադրվել է թիրախի ուղիղ դիմացը, որի արդյունքում թիրախի նյութը փռշիացել և նստեցվել է մատնային կառուցվածքով և ոսկե էլեկտրոդներով քվարցե հարթակի վրա որպես նանոթաղանթ [15, 16]: Քվարցե հարթակի կիրառման նպատակահարմարությունը պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ այն ինտեգրելի է սիլիցիումային հարթակների հետ, որոնք լայնորեն կիրառվում են կիսահաղորդչային տեխնիկայում, ինչպես նաև սիլիցիումից հեշտորեն կարելի է ստանալ սիլիցիումի օքսիդ, որը համարժեք է քվարցին: Կերամիկական թիրախների ԻԼՓ-ի միջոցով ստացվել են մի քանի նմուշներ, որոնք պատրաստվել են հարթակի տարբեր ջերմաստիճանների պայմաններում (550...650 °C ջերմաստիճանային սահմանում): Ստացված նմուշները բերված են նկ.3-ում, իսկ նմուշների մատնային կառուցվածքները՝ նկ.4-ում:



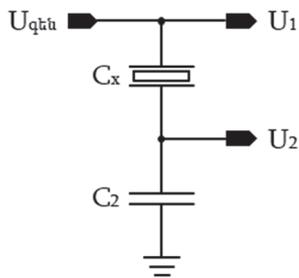
Նկ. 3. Կերամիկական թիրախների ԻԼՓ-ի միջոցով ստացված նմուշներ



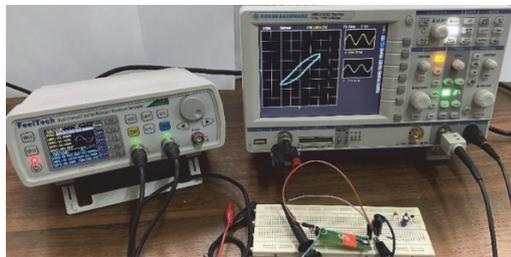
Նկ. 4.  $BiFe_{0.7}Mn_{0.3}O_3$  հենքով նանոկառուցվածքների օպտիկական միկրոսկոպով (ZEISS Axio Observer) արված նկարներ

Նմուշների մատնային կառուցվածքը կազմում են քվարցե հարթակի վրա նստեցված ոսկե էլեկտրոդներ (նանթաղանթի էլեկտրական հատկությունների հետազոտման համար), որոնց ամբողջ մակերեսով նստեցվել է նանթաղանթը: Նանթաղանթի հաստությունը 200 նմ է (չափվել է ZEISS EVO 10 մոդելի տեսաձրող էլեկտրոնային միկրոսկոպով), մատների լայնությունը՝ 20 մկմ, մատների միջև հեռավորությունը՝ 30 մկմ, իսկ մատների երկարությունը՝ 700 մկմ:

Կատարվել են պատրաստված նմուշների բևեռացման վեկտորի ուսումնասիրություններ ազդանշանի գեներատորի և օսցիլոգրաֆի միջոցով: Չափումները կատարվել են նկ.5-ում բերված սխեմայի հիման վրա, որտեղ ազդանշանի գեներատորի էլքում ստացված սինուսոիդային ազդանշանը փոխանցվում է մուլտիֆերոէլեկտրիկ նանթաղանթով նմուշին ( $C_x$ ) և հայտնի ունակությամբ կոնդենսատորին ( $C_2$ ): Ընդ որում,  $C_2$  կոնդենսատորն ընտրվում է այնպես, որ դրա ունակությունն ավելի մեծ լինի  $C_x$  նմուշի ունակությունից, որպեսզի ազդանշանի գեներատորի էլքի սինուսոիդային ազդանշանի լարման գերակշիռ մասը կիրառվի  $C_x$  նմուշին: Օսցիլոգրաֆի  $U_1$  մուտքը միացվում է ազդանշանի գեներատորի էլքին, իսկ  $U_2$  մուտքը՝  $C_x$  նմուշի և  $C_2$  կոնդենսատորի ընդհանուր կետին: Տվյալ սխեմայի հիման վրա կատարվել են բազմաթիվ չափումներ գեներատորի էլքում ստացված ազդանշանի տարբեր հաճախությունների դեպքում՝ առանց արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցության և նաև՝ դրա ազդեցությամբ: Նկ. 6-ում բերված է փորձարկումների կատարման համար հավաքված համակարգի նկարը:

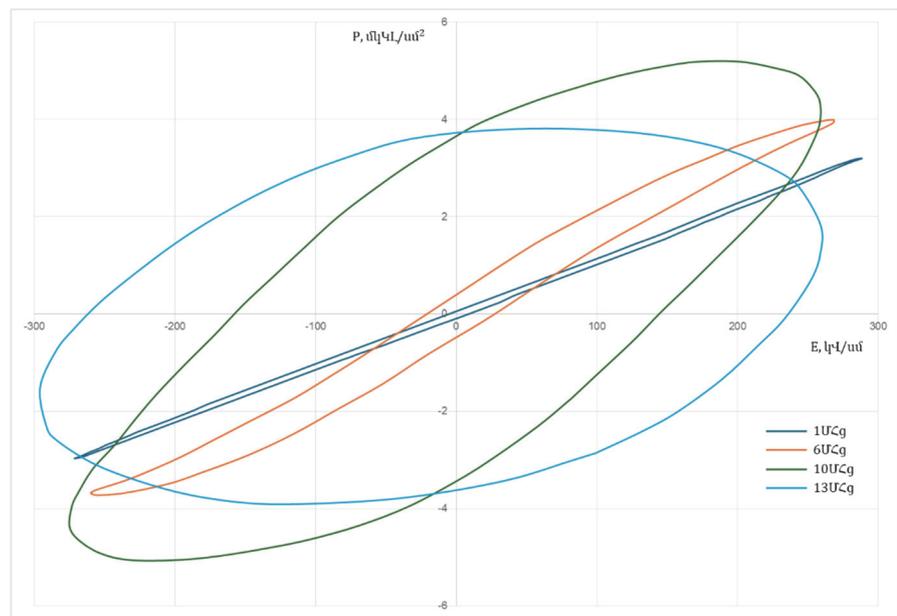


Նկ. 5. Նմուշի էլեկտրական հատկությունների ուսումնասիրման սխեմա



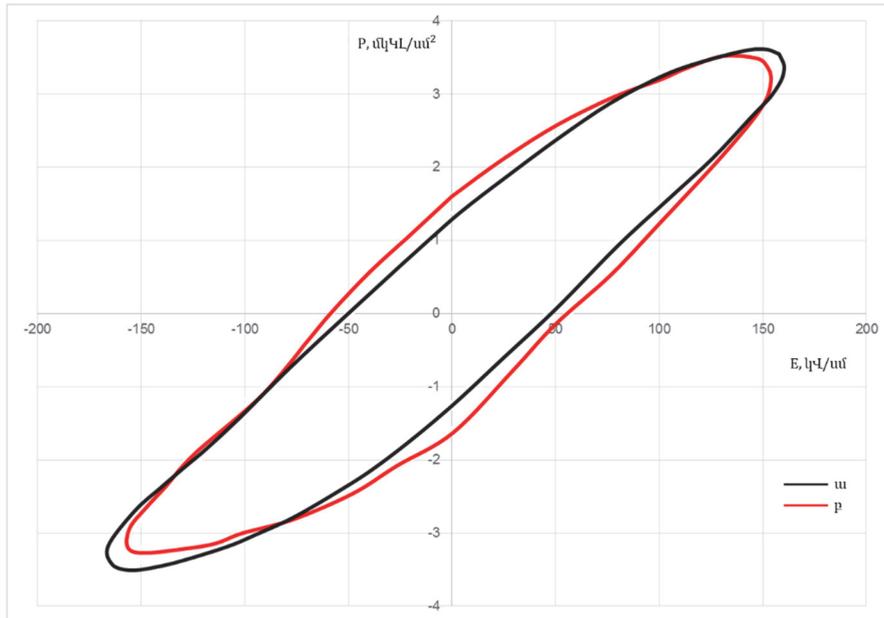
Նկ. 6. Փորձարկումների համար հավաքված համակարգը

Հետազոտվել են մուլտիֆերոէլեկտրիկ նանոթադանթով նմուշների բևեռացման վեկտորի և կիրառված էլեկտրական դաշտի լարվածության կախվածությունները գեներատորի էլքային սինուսոիդային ազդանշանի տարբեր հաճախությունների դեպքում (1 ՄՀց, 6 ՄՀց, 10 ՄՀց, 13 ՄՀց), երբ բոլոր դեպքերում ազդանշանի լարման ամպլիտուդը պահպանվել է 20 Վ: Ստացված բնութագրերը բերված են նկ. 7-ում:



Նկ. 7. Նմուշների բևեռացման վեկտորի և կիրառված էլեկտրական դաշտի լարվածության կախվածությունները տարբեր հաճախությունների դեպքում

Ուսումնասիրվել են նաև նմուշների բևեռացման վեկտորի և կիրառված էլեկտրական դաշտի լարվածության կախվածությունները արտաքին մագնիսական դաշտի առկայության դեպքում և առանց դրա: Սկզբում չափումը կատարվել է առանց արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցության ( $\omega$ ), որից հետո նմուշը տեղադրվել է մագնիսական դաշտի ազդեցության տակ, որի մագնիսական դաշտի ինդուկցիան 0.8 Տ է, և կատարվել է չափում ( $\rho$ ): Ստացված բնութագրերը բերված են նկ. 8-ում, որոնց վերլուծությունից պարզ է դառնում, որ արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ նմուշի բևեռացման վեկտորը փոփոխվում է առավելագույնը 26%-ով:



Նկ. 8. Արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությունը նմուշի բևեռացման վեկտորի վրա.  
 ա) առանց մագնիսական դաշտի ազդեցության, բ) մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ

**Եզրակացություն:**  $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$  կերամիկական թիրախներից ԻԼՓ-ի միջոցով ստացվել են կերամիկական նանոկառուցվածքներ: Հետազոտության արդյունքում ստացվել են նմուշների բևեռացման վեկտորի և կիրառված էլեկտրական դաշտի լարվածության կախվածությունները ազդանշանի 1 ՄՀց, 6 ՄՀց, 10 ՄՀց, 13 ՄՀց հաճախությունների դեպքում՝ պահպանելով ազդանշանի լարման ամպլիտուդը 20 Վ:

Ստացված նմուշների բևեռացման վեկտորի՝ էլեկտրական դաշտի լարվածությունից կախվածությունների հետազոտությունները ցույց են տվել, որ 0.8 ՏՀ մագնիսական դաշտի ինդուկցիայով արտաքին մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ բևեռացման վեկտորը փոփոխվում է առավելագույնը 26 %-ով:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. The Multiferroic Properties of  $\text{BiFeO}_3\text{-Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$  Solid Solution Ceramics / **Zhenyu Xu, Lirong Luo, Maocheng He, Kai Shen, et al** // IEEE Transactions on Magnetics. - 2015. - Vol. 51, issue 11. - P. 1-4, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2438954>.
2. Multiferroic properties of  $\text{BiFeO}_3\text{-BaTiO}_3$  based ceramics / **Tomoaki Futakuchi, Tatsunori Kakuda, Yuichi Sakai, et al** // Journal of the Ceramic Society of Japan. - 2014. - Vol. 122, issue 1426. - P. 464-468, <https://doi.org/10.2109/jcersj2.122.464>.

3. Magnetic properties of BiFeO<sub>3</sub> – BaTiO<sub>3</sub> ceramics in the morphotropic phase boundary: a role of crystal structure and structural parameters / **D.V. Karpinsky, M.V. Silibin, D.V. Zhaludkevich, S.I. Latushka, et al** // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2021. - Vol. 539, article 168409. - P. 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168409>.
4. Enhanced dielectric and multiferroic properties in BaTiO<sub>3</sub> doped Bi<sub>0.85</sub>Nd<sub>0.15</sub>Fe<sub>0.98</sub>Mn<sub>0.02</sub>O<sub>3</sub> ceramics / **Haoting Zhao, Ruxia Yang, Yang Li, Gang Liu, et al** // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2020. - Vol. 494, article 165779. - P. 1-6, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165779>.
5. Ferroelectrically tunable magnetism in BiFeO<sub>3</sub>/BaTiO<sub>3</sub> heterostructure revealed by the first-principles calculations / **Wenxuan Wang, Wei Sun, Guangbiao Zhang, Fengzhu Ren, et al** // Journal of Advanced Research. - 2020. - Vol. 24. - P. 371-377, <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.04.012>.
6. Enhanced ferroelectric, magnetic and magnetoelectric properties of multiferroic BiFeO<sub>3</sub>–BaTiO<sub>3</sub>–LaFeO<sub>3</sub> ceramics / **Min Zhang, Xiaoyan Zhang, Xiwei Qi, Hongen Zhu, et al** // Ceramics International. - 2018. - Vol. 44, issue 17. - P. 21269-21276, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.175>.
7. Control of Multiferroic properties in BiFeO<sub>3</sub> nanoparticles / **Diego Carranza-Celis, Alexander Cardona-Rodríguez, Jackeline Narváez, Oscar Moscoso-Londono, et al** // Scientific Reports. - 2019. - Vol. 9, article 3182. - P. 1-9, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39517-3>.
8. Enhanced Electric and Magnetic Properties of the Epitaxial (Ba<sub>0.5</sub>Sr<sub>0.5</sub>)TiO<sub>3</sub>/BiFeO<sub>3</sub> Multiferroic Heterostructure / **Y. Chen, J. Miao, X. Zhang, F. Weng, et al** // IEEE Transactions on Magnetics. - 2012. - Vol. 48, issue 11. - P. 3418-3421, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2200459>.
9. Ferroelectric and Magnetic Properties of Multiferroic BiFeO<sub>3</sub>-Based Composite Films / **Hiroshi Naganuma, Tomosato Okubo, Kenji Kamishima, Koichi Kakizaki, et al** // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. - 2008. - Vol. 55, issue 5. - P. 1051-1055, <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.755>.
10. **Raiter Kamlesh R., Cockburn Bruce F.** An investigation into three-level ferroelectric memory // IEEE International Workshop on Memory Technology, Design, and Testing. - 2005. - P. 1-6, <https://doi.org/10.1109/MTDT.2005.17>.
11. **Amritendu Roy, Rajeev Gupta, Ashish Garg.** Multiferroic Memories // Multiferroic Magnetoelectric Composites and their Applications. - 2012. - Vol. 2012, article ID 926290. - P. 1-12, <https://doi.org/10.1155/2012/926290>.
12. Pure perovskite BiFeO<sub>3</sub>–BaTiO<sub>3</sub> ceramics prepared by reaction flash sintering of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–BaTiO<sub>3</sub> mixed powders / **Ahmed Taibi, Salem Chaguetmi, Pedro E. Sanchez-Jimenez, Antonio Perejon, et al** // Ceramics International. - 2021. - Vol. 47, issue 19. - P. 26947-26954, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.108>.
13. Synthesis and Characterization of 0.7BiFeO<sub>3</sub>-0.3BaTiO<sub>3</sub> Crystallites by the Hydrothermal Method / **T. Tong, J.G. Chen, J. Jian, D.R. Jin, and J.R. Cheng** // IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF). - 2014. - P. 1-4, <https://doi.org/10.1109/ISAF.2014.6923014>.

14. Մանգանի հավելումով բիսմութ ֆերիտի կերամիկական նմուշների ստացումը և հատկությունների ուսումնասիրությունը / **Ն.Վ. Մարտիրոսյան, Դ.Ս. Մարտիրոսյան, Մ.Ա.Խ. Արաղի, Տ.Վ. Վանդունց և ուրիշներ** // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղ. Տեխն. գիտ. սերիա. - 2023. - Ն. 76, N 4. - Է. 421-435, <https://doi.org/10.53297/0002306X-2023.v76.4-421>.
15. **Ma Chunrui, Chen Chonglin.** Pulsed Laser Deposition for Complex Oxide Thin Film and Nanostructure // Advanced Nano Deposition Methods. - First Edition. - 2016. - Ch. 1. - P. 1-31, <https://doi.org/10.1002/9783527696406.ch1>.
16. **Angela De Bonis, Roberto Teghil.** Ultra-Short Pulsed Laser Deposition of Oxides, Borides and Carbides of Transition Elements // Surface Function Enhancement Film and Coating Technology. - 2020. - P. 1-25, <https://doi.org/10.3390/coatings10050501>.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.03.2025:

**Д.С. МАРТИРОСЯН**

#### **ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОПЛЕНОК $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$**

Методом импульсного лазерного осаждения на кремниевой подложке с пальчиковой структурой и Au-электродами получены нанопленки из керамических мишеней  $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ . Изучены зависимости вектора поляризации полученных тонких пленок от напряженности приложенного электрического поля на различных частотах, а также исследованы зависимости вектора поляризации от напряженности электрического поля при наличии и отсутствии воздействия внешнего магнитного поля.

**Ключевые слова:** мультиферроэлектрик, нанопленка, импульсное лазерное осаждение, оперативное запоминающее устройство, магнитное поле, вектор поляризации.

**D.S. MARTIROSYAN**

#### **OBTAINING AND STUDYING PROPERTIES OF $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ THIN FILMS**

Thin films are obtained from  $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$  ceramic targets using pulsed laser deposition technique on a silicon substrate with a finger structure and Au electrodes. The dependences of the polarization vector of the obtained thin films on the applied electric field strength at different frequencies are studied, and the dependences of the polarization vector on the electric field strength with and without the influence of an external magnetic field are also studied.

**Keywords:** multiferroelectric, thin film, pulsed laser deposition, operational memory device, magnetic field, polarization vector.

UDC 621.3.049

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.4-482

L.D. HAKOBYAN

**THE CLOCK DUTY-CYCLE CORRECTION CALBRATION METHOD  
FOR HIGH-SPEED TRANSMITTERS**

In modern high-speed SerDes systems, maintaining optimal clock quality is critical for ensuring data integrity and system reliability. This paper presents the TX delay-loop line (DLL) clock duty-cycle correction calibration method intended to respond to challenges coming from increased data rates and high-frequency clocks. The proposed method calibrates the duty cycle of the transmitted clock, minimizing jitter and skew that can lead to duty-cycle distortion (DCD), inter-symbol interference (ISI) and greater bit error rates (BER). Through several simulation tests and validations, it is shown that the method effectively improves the clock quality, particularly the duty-cycle, thereby enhancing the signal integrity and system performance in demanding high-speed communication environments. This work underscores the importance of precise clock duty-cycle correction in achieving robust and efficient SerDes operation at gigabit and beyond data rates. The proposed method covers roughly  $\pm 6.5\%$  of the duty-cycle correction range. Through simulation results we encounter horizontal eye-opening improvement at transmitter differential output by  $\sim 5ps$  for the 64 Gb/s data rate. The proposed method leads to 3.8% area increase.

**Keywords:** duty-cycle, calibration, eye opening, comparator, ISI, BER.

**Introduction.** There's continual push for higher data rates for the current high-speed serial links to support modern applications like 5G, cloud computing and data centers. As data rates increase, various challenges occur, such as power efficiency, noise immunity and signal integrity. To keep up with the pace and have the higher data rates within the same bandwidth range, the current trends use Pulse Amplitude Modulation (PAM4) over the Non-Return to Zero (NRZ) signaling. Since PAM4 can transmit more data over existing channels without requiring additional bandwidth, it maximizes the utilization of available channels, which is critical in environments where bandwidth is limited. It also provides higher efficiency, less loss at high frequencies, and enables to use slower clock rates than regular binary communication. Despite these advantages, it's worth noting that PAM4 also brings to table some challenges, such as increased sensitivity to noise and reduced signal-to-noise ratio (SNR) due to limited distance between levels. Additionally, the design of the transmitters and receivers' circuitries are significantly more complex for the PAM4 than for binary signals. Fig.1 illustrates

the block diagram of the high-speed SerDes systems [1]. Transmitters must generate multiple voltage levels and maintain signal integrity to avoid introducing distortion. On the other hand, receivers side need more advanced circuitry to accurately detect and differentiate between closely spaced amplitude levels. Advanced equalization techniques are to have to fight against inter-symbol interference (ISI). In the receiver side the most common blocks for this purpose are the continuous-time linear equalizer (CTLE) and decision feedback equalizer (DFE). CTLE is useful in canceling both pre-cursor and long-tail inter-symbol interference (ISI), but CTLE amplifiers must be designed with sufficient bandwidth and linearity to support PAM4 modulation [2]. DFE is highly effective against ISI and effectively cancels it out by using previous decisions about transmitted symbols to predict and subtract their effects on the current symbol. By mitigating ISI, DFE can improve the effective SNR which leads to reduced bit error rates (BER).

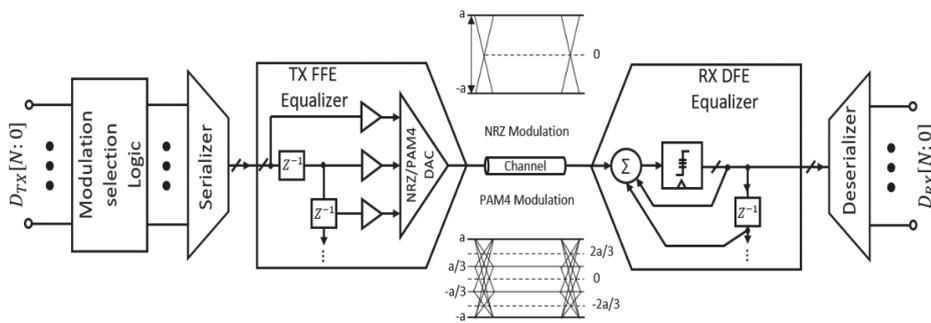


Fig.1. The block diagram of the high speed SerDes system

The TX architecture can be generally categorized by a voltage mode driver (SST) or a current mode driver (CML). Although SST driver's power consumption is substantially smaller than CML driver's power, the data path and clocking power may not show meaningful difference between the two architectures, especially for a high data rate systems such as 112 Gb/s. The SST architecture is more preferred under a limited supply level  $\leq 1V$ , since the data path can be fully CMOS [3]. The quarter-rate 4:1 multiplexer (MUX) is popular for the last serialization stage due to its relaxation on the timing constraint and low-power consumption in the clock path than the half-rate structure [4].

For that purpose, input clocks for the 4:1 MUX should be accurately skewed by 1UI from each other. To generate the required phases, delay a line loop (DLL) is used which receives differential clocks from the phase-locked loop (PLL) and generates the required phases for the driver and serializer. In advanced modulation schemes like PAM4, where signal levels are closely spaced, any timing error can

lead to significant data errors. A precise clock path is essential for ensuring the correct sampling of the digital signal levels. For that purpose, in this article we are going to introduce a calibration method of the duty-cycle correction for the DLL clocks, which can significantly improve the transmitters ISI and BER consequently.

**Problem description.** As discussed previously, a good clock path quality is an essential attribute for the high-speed data transfer in the modern serial link's transmitter (Fig.2). As the clocks are being generated from the PLL and being transferred to the TX through the routes and multiple logic circuitry, the degradation of its quality is unavoidable. Additionally, PVT (process-voltage-temperature) variations make it harder to maintain the desired merit consistent.

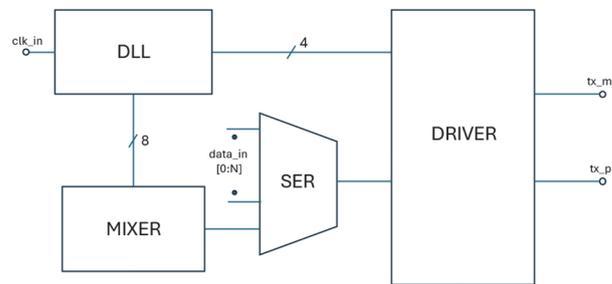


Fig.2. The transmitter's simplified block diagram

Such imperfections coming from circuitry and PVT variations lead to duty-cycle-distortion of the clocks (DCD). Its impact even more crucial for the high-speed clocks (7/8/10 GHz, depends on the data rate). Moreover, as the frequency of the clock increases so does the jitter coming from the different noise sources, such as: thermal, shot and especially switching noise.

A distorted clock at the driver stage can potentially lead to the data/bit errors. The impact of the stated can be measured in a different way, but the most straightforward and applicable way is to look at the eye opening in the two most critical points of the data path. The first one is the output of the 4:1 sterilizer in the driver, and the second one is the output of the driver itself. The impact would be instantly noticeable at the 4:1 MUX output where the data sent can be disrupted to the point of no return. It is because the data alignment is being done inside the MUX at the highest clock frequency (and the output data after this stage is in the Nyquist frequency). The second point of the measure, the driver's output, gives more general understanding of the system performance, where not only clock path delivers its enormous impact, but also part of the quality is being determined by the transmission channel, output impedance termination, and applied equalization. Thus, the impact of the proposed improvements will be measured in the two points discussed.

**The proposed architecture.** PLL and DLL are the two major blocks delivering the required clocks with the needed phases and frequencies. On the DLL-to-driver path an additional buffer tree is inserted to ensure proper drivability and CMOS level clocks at the input of the 4:1 MUX's.

The basic DLL loop consists of a controlled delay line, a phase detector (PD) and a low-pass filter. To control the duty-cycle of the clocks at the output of the delay line, the analog inverters are being inserted into the loop (Fig.3).

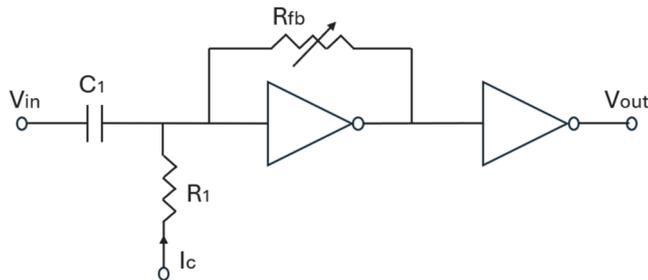


Fig. 3. Duty-cycle correction circuit based on analog inverter

The  $I_c$  current is inserted into the inverters input feedback node, in order to control its transition time, hence affecting duty cycle at the output. The required currents are generated through the current DACs. The proposed method helps choose the required codes for the DACs.

**The proposed method.** So far, we have the DCC correction block (analog feedback inverter) and the current DACs to control the required insertion input currents for the inverters. To have a detection/decision making loop, we need a feedback loop which will adjust the DAC codes. The block-diagram of the loop is shown below (Fig. 4).

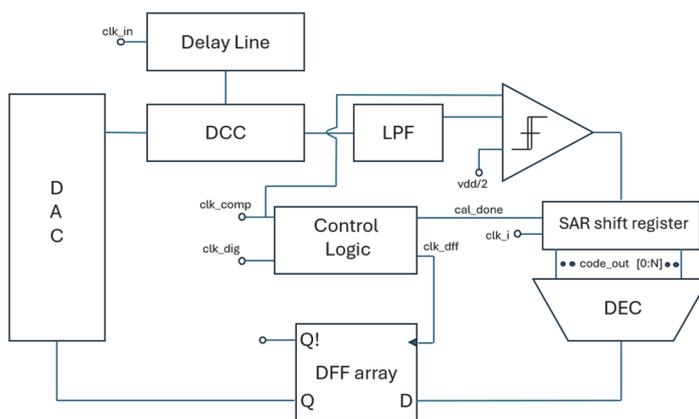
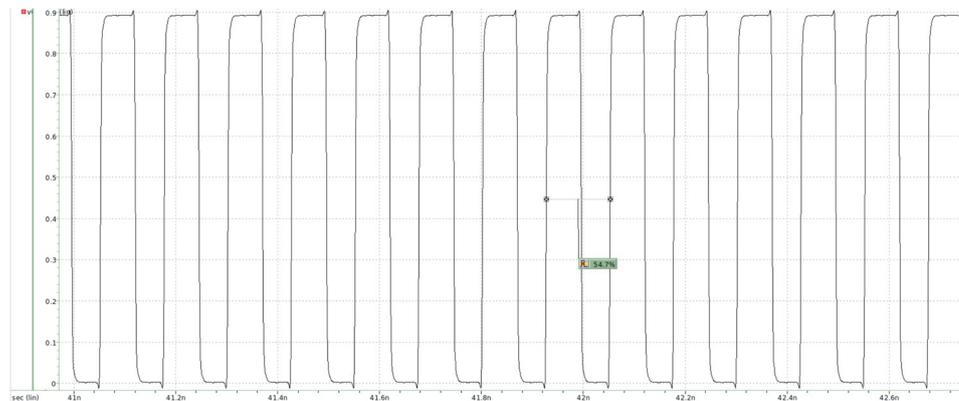


Fig. 4. The block diagram of the duty-cycle correction calibration method

At the output of the DCC inverters, a low-pass filter is placed. It integrates the clocks and sends the obtained voltage levels ( $V_{DD}/2$ ) to the comparator. The comparator's reference node is being connected to the  $V_{DD}/2$ , which is being generated through a precise DAC, serving as a reference for the system's various calibration and adaptation algorithms. A 10-bit current DAC is used for the calibration.

After the comparison is done, the results are saved in the 10-bit SAR shift register. We start the calibration from the DAC's middle code, thus, the register's starting position should be 512. It is the most convenient starting point for calibration in order to keep the number of repetitions to a minimum. The output of the register will be decoded and returned to the DAC. The output of the register will be decoded and sent back to the DAC. We also need to close the loop once the calibration is complete. For this purpose, each clock cycle of the comparator is counted, and once the required cycle step is completed, the "cal\_done" signal is sent to the digital control block, which controls all the PHY's calibration and adaptation processes. The calibration process ends when the "cal\_done" signal equals "1".

**Results.** To verify the impact of the proposed method, three different tests were performed. The first and most straightforward test measures the DLL output clock duty-cycle before and after the calibration process. Fig. 5 shows the duty-cycle before the calibration process, and it is equal to 54.7%.



*Fig. 5. The clock's duty-cycle before calibration*

After implying calibration, the duty-cycle is being improved by 4.8%, resulting in 49.9% (Fig. 6).

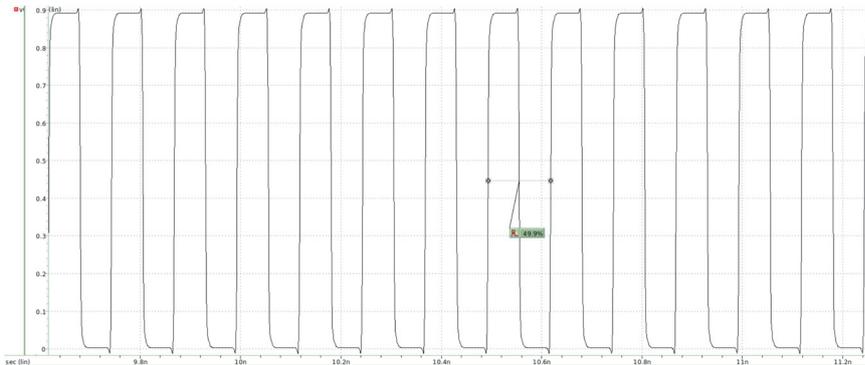


Fig. 6. The clock's duty-cycle after calibration

Overall, DACs (calibration) cover roughly  $\pm 6.5\%$  duty-cycle correction range.

As stated, the clock quality will greatly impact on the final 4:1 serialization. Thus, the next verification is a transient simulation where we can see the data eye diagram after 4:1 MUX serialization (Fig. 7).

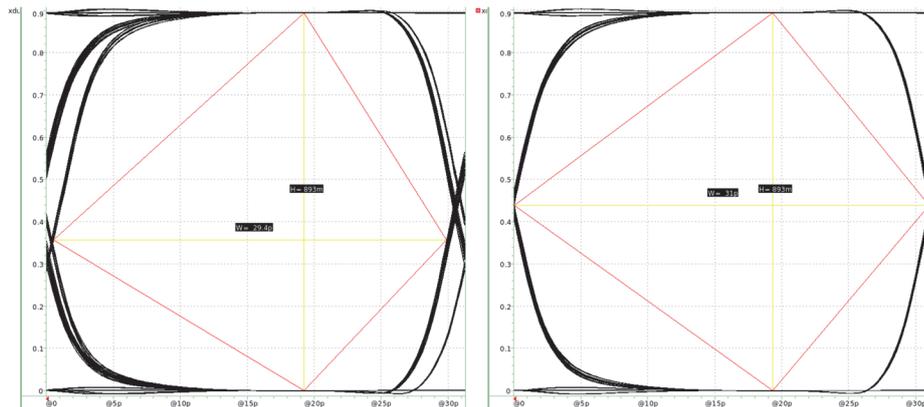


Fig. 7. 4:1 MUX output eye diagrams before and after calibration

The left diagram is the eye before the calibration and the right one, after. Before the calibration, due to distorted duty-cycle of the clock, the eye diagram is “jittery”, resulting in double crossing points and relatively closed horizontal opening (29.4ps). After the calibration, the eye quality improves in terms of jitter and horizontal opening (31ps).

Finally, TX differential output eye openings were obtained to understand the impact in the final stage (Fig. 8).

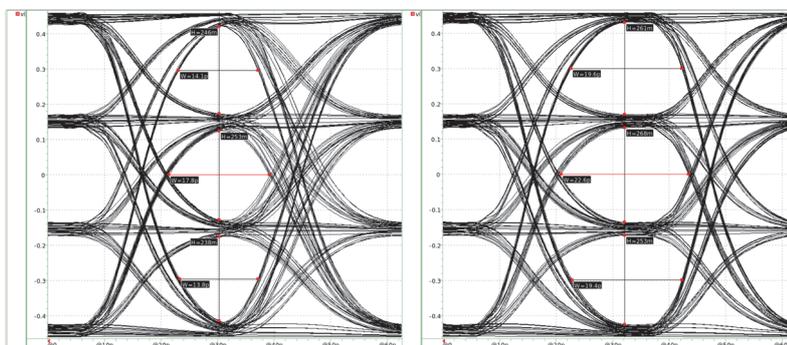


Fig. 8. TX output eye diagrams before and after calibration

We can see that the “jittery” eye diagram shown in Fig. 7 results in the poor quality of the eyes in the TX output. The horizontal eye openings are smaller by almost  $5ps$  for all three eye openings compared to the obtained diagrams after calibration.

The added circuitry increases area by 3.8%. However, the comparator and DACs are regarded as general-purpose devices in the PHY. They are used for a variety of calibrations and PHY adaptation.

**Conclusion.** The TX DLL duty-cycle correction calibration method has been described. The method improves the duty-cycle of the clocks and allows calibration/correction in a  $\pm 6.5\%$  range. The simulation results show that after the calibration, for the typical test case scenario, the duty-cycle is improved by 4.8%. This results in significant improvements in both the 4:1 MUX output stage and the TX output stage. MUX output horizontal eye is improved by  $1.6 ps$ . TX differential output has been tested for the PAM4 modulation at  $64 Gb/s$  data rate. Horizontal openings are improved by approximately  $5 ps$  for all three eyes. Schematic updates result in a 3.8% area increase. The proposed method can be used in modern high speed TX designs.

## REFERENCES

1. **Roshan-Zamir A., Elhadidy O., Yang H., Palmero S.** A reconfigurable 16/32 Gb/s Dual-Mode NRZ-PAM4 SerDes in 65nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. - September 2017. – Vol. 52, issue 9. - P. 2430-2447.
2. A 56-Gb/s PAM4 Wireline Transceiver Using a 32-Way Time-Interleaved SAR ADC in 16-nm FinFET / **Y. Frans, et al** // IEEE Journal of Solid-State Circuits.- April 2017. - Vol. 52, no. 4. - P. 1101-1110.
3. 56/112Gbps Wireline Transceivers for Next Generation Data Centers on 7nm FINFET CMOS Technology / **T. Ali, M. Abdullatif, H. Park, Ehung Chen, et al** // IEEE CICC 2021/ Session 11: Advanced Electrical and Optical Communication Circuits and Systems.- 2021. - Paper 11-1.

4. Peng P., Chen Y., Lai Sh., Huang H. A 112-Gb/s PAM-4 Voltage-Mode Transmitter With Four-Tap Two-Step FFE and Automatic Phase Alignment Techniques in 40-nm CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits.- July 2021.– Vol. 56, issue 7. - P. 2123-2131.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 18.06.2025.

## Լ.Ղ. ՀԱԿՈՒՅԱՆ

### ՏԱԿՏԱՎՈՐՄԱՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՑԻԿԼԻ ՀԱՄԱՄԱՍՆՈՒԹՅԱՆ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱԼԻԲՐԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ ԱՐԱԳԱԳՈՐԾ ՀԱՂՈՐԴԻՉ ՀԱՆԳՈՒՑՑՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Ժամանակակից արագագործ SerDes համակարգերում տակտային ազդանշանի որակի պահպանումը կարևոր նշանակություն ունի տվյալների ամբողջականության և համակարգի հուսալիության ապահովման համար: Ներկայացված է հաղորդիչ հանգույցի հապաղման գծի տակտային ազդանշանի կարգավորման կալիբրացման մեթոդ, որը նախատեսված է՝ արձագանքելու մշտապես աճող տվյալների փոխանցման արագության և բարձրահաճախական տակտային ազդանշանին առնչվող խնդիրներին: Առաջարկվող մեթոդը կատարում է տակտային ազդանշանի ցիկլի համամասնության կալիբրացում՝ նվազեցնելով ազդանշանի թրթռոցը և շեղումը, որոնք կարող են հանգեցնել ցիկլի համամասնության խեղաթյուրման, միջնիշային միջամտության (ՄՆՄ) և բիթային սխալանքի: Միմուլյացիոն թեստերի և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքում երևում է, որ մեթոդն էականորեն բարձրաձայնվում է տակտային ազդանշանի որակը, մասնավորապես՝ ցիկլի համամասնությունը, դրանով իսկ բարելավելով ազդանշանի ամբողջականությունն ու համակարգի կատարողականությունը բարձր արագագործությամբ հաղորդակցման հանգույցներում: Աշխատանքում ընդգծվում է տակտային ազդանշանի ցիկլի համամասնության ճշգրիտ կարգավորման դերը՝ զիգաբիթ և ավելի բարձր տվյալների փոխանցման արագությունների դեպքում հուսալի և արդյունավետ հաղորդիչ-ընդունիչ հանգույցի աշխատանքի համար: Մեթոդն ապահովում է մոտավորապես  $\pm 6.5\%$  ցիկլի համամասնության կարգավորման տիրույթ: Փորձերի արդյունքների համաձայն՝ հաղորդիչ հանգույցի ելքային դիֆերենցիալ աչքի հորիզոնական բացվածքը բարելավվել է 5պվ-ով՝ 64 Գբ/վ տվյալների փոխանցման արագության դեպքում: Առաջարկվող մեթոդը հանգեցնում է մակերեսի 3.8% մեծացման:

**Առանցքային բառեր.** ցիկլի համամասնություն, կալիբրացում, աչքի բացվածք, համեմատիչ, ՄՆՄ, բիթային սխալանք:

Л.Д. АКОПЯН

**МЕТОД КАЛИБРОВКИ КОРРЕКЦИИ ДИСБАЛАНСА ПО  
ДЛИТЕЛЬНОСТИ ТАКТОВОГО СИГНАЛА ДЛЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ**

В современных системах высокоскоростных SerDes (Serializer/Deserializer) поддержание оптимального качества тактирования является критически важным для обеспечения целостности данных и надежности системы. В данной работе представлен метод калибровки с использованием задержки по линии (DLL) для коррекции формы сигнала тактового сигнала с учетом дисбаланса по длительности импульсов, предназначенный для реагирования на вызовы, связанные с ростом скоростей передачи данных и высокочастотными тактовыми сигналами. Предложенный метод нацелен на коррекцию коэффициента заполнения тактового сигнала, минимизацию джиттера и смещения, которые могут привести к искажению формы сигнала (DCD), межсимвольным помехам (ISI) и увеличению ошибок передачи (BER). На основе нескольких тестов и проверок с помощью моделирования показано, что данный метод эффективно улучшает качество тактирования, особенно коэффициент заполнения, тем самым повышая целостность сигнала и производительность системы в условиях высокоскоростной передачи данных. Подчеркивается важность точной коррекции дисбаланса по длительности импульсов для достижения надежной и эффективной работы SerDes на скоростях в гигабитах и выше. Предложенный метод охватывает примерно диапазон коррекции  $\pm 6,5\%$  от полного диапазона. В результате моделирования зафиксировано улучшение горизонтального раскрытия глаза (eye-opening) примерно на  $5\text{ пс}$  при передаче данных со скоростью  $64\text{ Гбит/с}$ . Реализация данного метода приводит к увеличению площади на  $3,8\%$ .

**Ключевые слова:** длительность импульса, калибровка, раскрытие глаза, компаратор, ISI, BER.

UDC 621.3.0149

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.4-491

S.A. KHACHATRYAN

**THE LINEARITY IMPROVEMENT METHOD IN CONTINUOUS TIME LINEAR EQUALIZERS**

Nowadays, the usage of high-speed SERDES systems has increased, and the requirements for specific components have also risen. Data rates and clock frequencies have escalated to 224 *Gbps* and 16 *GHz*, respectively, leading to stringent requirements and greater challenges in their implementation.

One of the significant challenges is the system linearity. The SERDES system data path consists of a Serializer and Driver from the transceiver side, along with channels that connect the transceiver to the receiver. In the receiver, there is an Analog Front End (AFE) that includes a Continuous Time Linear Equalizer (CTLE) and an Analog-to-Digital Converter (ADC) for the final conversion to digital signals. Along this path, signal degradation occurs, depending on the signal frequency and channel losses. To address these issues, AFEs are employed, which typically consist of an attenuator, Continuous Time Linear Equalizers, and, in some cases, variable gain amplifiers.

It is important to address the linearity problems encountered within the AFE and ADC blocks. Linearity degradation, or poor linearity, can result in significant issues within the system, including incorrect data conversion and an decreasing Bit Error Rate (BER).

This paper addresses linearity issues within the Analog Front End (AFE), with a particular focus on the Continuous Time Linear Equalizer (CTLE). The primary nonlinear behavior stems from the CTLE, largely due to the utilization of various reactive components.

**Keywords:** continuous time linear equalizer, linearity, Serdes system, Analog Front End, Transmitter, Receiver, Transceiver.

**Introduction.** In modern high-speed SerDes systems, it is crucial to employ an Analog Front End (AFE) that equalizes the signal and mitigates losses incurred from the channel. AFEs typically comprise both passive and active components [1]. Passive components are utilized for signal attenuation, whereas active components, which often include a Continuous Time Linear Equalizer (CTLE), are employed for signal equalization [2]. The CTLE plays a pivotal role in compensating for signal degradation and enhancing overall system performance. The basic architecture of an AFE is illustrated in Fig. 1.



The basic architecture of a Continuous Time Linear Equalizer (CTLE) is illustrated in Fig. 2 [5].

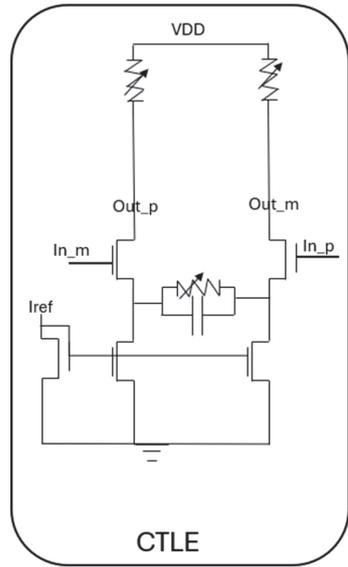


Fig. 2. Basic continuous time liner equalizer architecture

**Problem description.** Continuous Time Linear Equalizer with nmos input transistors (Fig.3) has been designed by SAED14 nm FinFet technology [6], and HSPICE simulations have been performed.

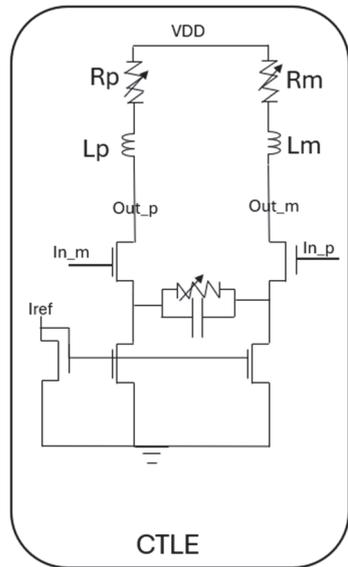


Fig. 3. The designed continuous time liner equalizer architecture

AC analyses were performed to determine the gain and bandwidth characteristics of the Continuous Time Linear Equalizer (CTLE), and the results are presented in Fig. 4.

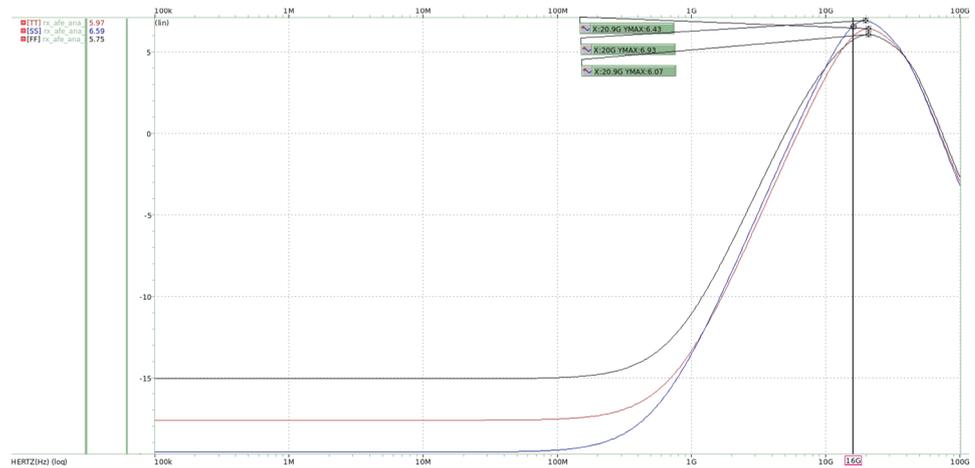


Fig. 4. CTLE AC analyses curves

Transient analyses were conducted to evaluate the linearity of the Continuous Time Linear Equalizer (CTLE). The applied signal frequency was set to be three times lower than the Nyquist frequency. Initially, the target design frequency for the circuit was established at 16 GHz, which is in accordance with PCIe 6 standards [7]. These analyses are crucial for understanding the dynamic behavior of the CTLE and ensuring that it performs effectively under varying signal conditions. By setting the target frequency at 16 GHz, the design aims to meet the stringent requirements of high-speed data transmission standards, thereby ensuring robust and reliable communication. The results of the transient analysis are depicted in Fig. 5, which illustrates the small-signal gain and linearity characteristics when the gain is 1 dB lower than its maximum value. This method is a common approach for measuring circuit linearity in SerDes systems. By analyzing the small-signal gain and linearity at this specific point, we can gain valuable insights into the performance and reliability of the CTLE under real-world operating conditions. Ensuring that the gain remains consistent and linear is essential for maintaining signal integrity and minimizing errors in high-speed data transmission.

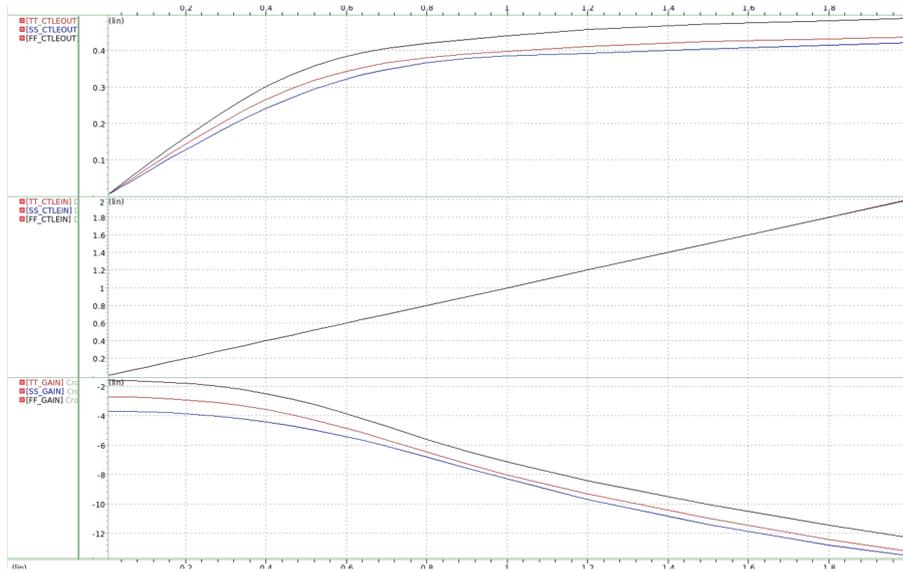


Fig. 5. CTLE Linearity curves, transient analysis results

It is essential to mention that both AC and transient analyses were conducted for the typical (TT), fast (FF), and slow (SS) corners. These analyses were performed with supply voltages of 1.2 V, 1.32 V, and 1.08 V, and at temperatures of 25°C, 125°C, and -40°C, respectively. This comprehensive approach ensures that the CTLE's performance is evaluated under various process, voltage, and temperature (PVT) conditions, providing a thorough understanding of its behavior across different scenarios. A summary of the AC and transient analyses for these three PVT conditions is provided in Table 1.

Table 1

The main parameters of CTLE

Measurement	SS	TT	FF
Peak frequency (GHz)	20	20.9	20.9
Gain_at_Nyquist (dB)	6.59	5.97	5.75
Peak_Gain (dB)	6.93	6.43	6.07
Gain at low frequency (dB)	-19.6	-17.6	-15.1
Output Linearity (mV)	269	276	311

Degeneration resistors are commonly employed to enhance linearity, which is a standard approach for amplifiers and equalizers [8]. However, based on the linearity numbers presented in Table 1, it is evident that linearity varies across corners by up to 10%, which is unacceptable for modern systems. Even with a supply voltage of 1.2 V, maintaining good linearity across all PVT corners is

challenging due to the small saturation margin of the input devices. This issue is more pronounced in the slow (SS) corners and other slow conditions. Ensuring consistent linearity across different process, voltage, and temperature conditions is crucial for the reliable performance of high-speed SerDes systems. Addressing these variations is essential to meet the stringent requirements of modern communication standards.

**The proposed solution.** One of the solutions proposed at the Irish Signals and Systems Conference involves replacing current source transistors with polyresistors. Additionally, a replica path was added to control the current through the CTLE, along with a 4-bit R2R digital-to-analog converter (DAC). The proposed solution has improved the linearity problem. However, it is not applicable to contemporary chips, as it increases the area of the CTLE by using resistors and adding the replica path with the R2R DAC [9].

The proposed solution do not include as many changes and additions to the CTLE. The proposed changes and solution are as follows. An additional transistor is incorporated into the main signal path m1 and m2, with its gates connected to the common mode voltage of the main data path signal, typically originating from the attenuator. The source of this transistors is connected to a current source, while the drain is connected to the outputs of the Continuous Time Linear Equalizer (CTLE). Furthermore, a new circuit has been added, consisting of controllable current mirrors and current sources [10]. This component can be any circuit that is independent or exhibits low variation across PVT conditions, such as a constant current source circuit. The basic circuit diagram of the updated scheme is shown in Fig. 6.

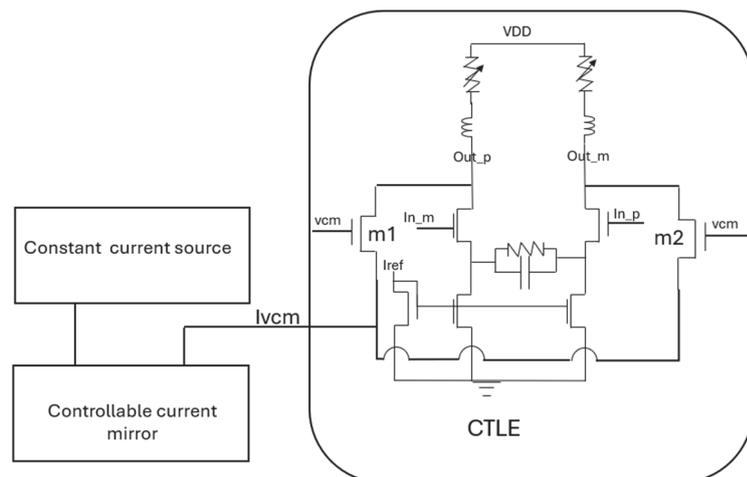


Fig. 6. The proposed circuit diagram

The newly added transistors in the differential paths, along with the programmable current mirrors, offer the capability of adjusting the current value through the main CTLE path. This adjustment results in a change in the drain voltage of the input devices, thereby increasing the saturation margin and enhancing the linearity values. This technique can also be employed to mitigate the linearity issues in cases of excessively high values, ensuring optimal CTLE performance without the noise associated with high-amplitude signals. By fine-tuning the current through the CTLE path, the design achieves improved signal integrity and reliability, which is crucial for high-speed data transmission systems. A controllable current mirror designed for three thermometric bits is utilized to cover a wide current range. This design allows for precise control over the current flowing through the CTLE path, enhancing the flexibility and performance of the equalizer. Additionally, the transistors connected to the CTLE outputs are chosen to be 20 times smaller to prevent any bandwidth degradation caused by device capacitance and metal connections. Figure 7 presents the implementation of the controllable current mirror at the transistor level.

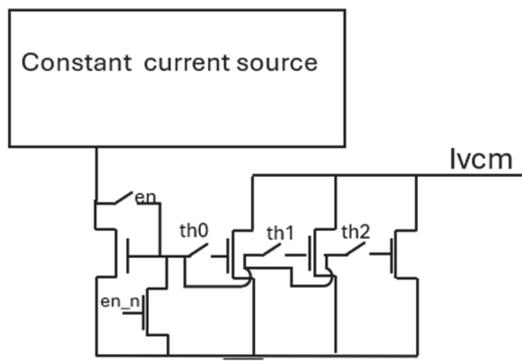


Fig. 7. Controllable current mirror

**Results.** In the initial step of the method verification, HSPICE simulations were conducted, and AC analysis was performed to assess the impact of the newly added transistors on the frequency response, particularly concerning bandwidth. Based on the results shown in Fig. 8, the impact of the newly added device is negligible, with the bandwidth degradation due to the device capacitance being less than 1%.

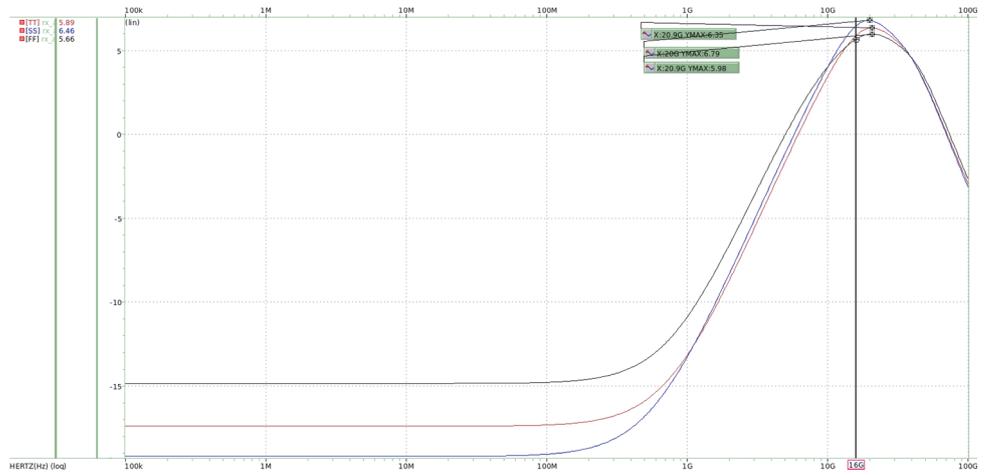


Fig. 8. CTLE AC response with the proposed method

In the next step, transient simulations were performed to identify the impact of linearity values with minimum and maximum current levels, which were controlled through three thermometric bits in the current mirror. Figure 9 shows the linearity curves for the SS corner, while the linearity values for the other two corners are presented in Table 2, along with other important parameters measured during the AC simulation.

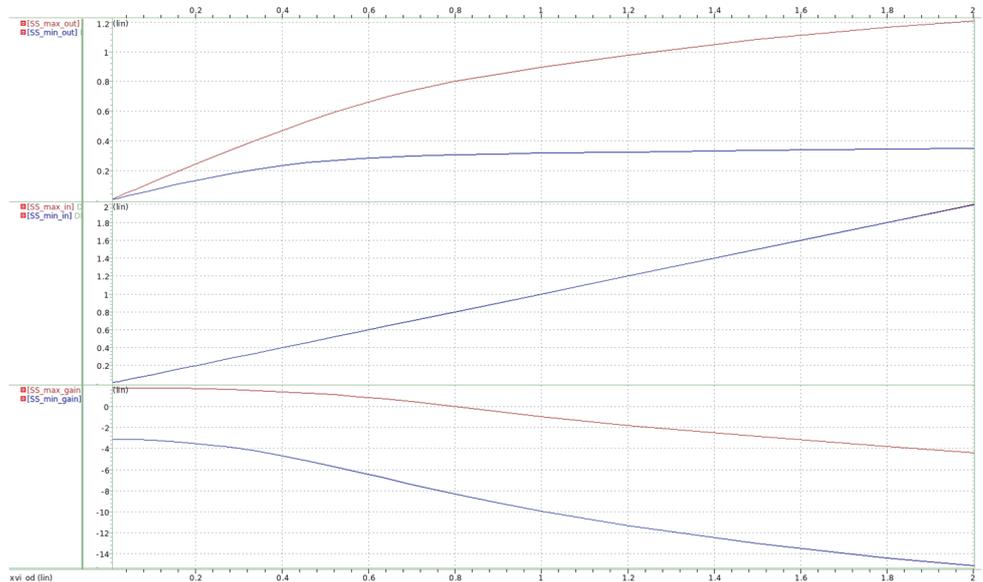


Fig. 9. Linearity curves for SS corner with minimum and maximum codes

Table 2.

The main parameters of CTLE with the proposed design

Measurement	SS	TT	FF
Peak frequency (GHz)	20	20.9	20.9
Gain_at_Nyquist (dB)	6.46	5.89	5.66
Peak_Gain (dB)	6.79	6.35	5.98
Gain at low frequency (dB)	-19.5	-17.4	-15.2
Output Linearity with minimum code (mV)	269	276	311
Output Linearity with Maximum code (mV)	680	698	731

Based on the results shown in Fig. 9 and Table 2, it is evident that the proposed solution addresses the linearity problems and increases the linearity values for the SS corner by up to 680 mV.

**Conclusion.** Continuous Time Linear Equalizer has been designed with the SAED 14nm FinFet technology. Poor linearity numbers are observed.

An architectural update has been proposed to enhance the linearity of the Continuous Time Linear Equalizer (CTLE). The results indicate that the linearity values for the worst corner are improved by up to 680 mV. Compared to other solutions, the proposed solution shows a 23% higher improvement. Although there is a slight increase in the circuit area and power consumption due to addition of transistors in the differential path and the implementation of a programmable current mirror, this increase is considered acceptable given the significant improvements achieved in linearity performance.

The SAED14 nm FinFet technology libraries have been used during the HSPICE simulations, and outputs have been exported by Galaxy Custom Designer tool.

## REFERENCES

1. **Jang S., Lee J., Choi Y., Kim D.** Recent Advances in Ultrahigh-Speed Wireline Receivers With ADC-DSP-Based Equalizers // In IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society.-2024.- Vol. 4.-P 290-304, doi: 10.1109/OJSSCS.2024.3506692 <https://ieeexplore.ieee.org/document/10767763>
2. A 16Gbps Programmable CTLE Design with Adjustable Gain / **J. Zheng, T. Shi, J. Wang, et al** // 2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS).- Changchun, China, 2023.- P. 220–225, doi: 10.1109/EIECS59936.2023.10435457
3. **Zhang C., Wang Y., Xie M., Zhang D.** A 20Gbps CTLE with Active Inductor// 2022 7th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM).- Xi'an, China, 2.- P. 485–489, doi: 10.1109/ICICM56102.2022.10011348

4. **Zhang C., Xu Y., Zhang X., Wang H.** 50Gb/s High-Speed Serial Interface Receiver CTLE Equalization Circuit Design // 2023 8th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM).- Nanjing, China, 2023.- P. 417–421, doi: 10.1109/ICICM59499.2023.10365997
5. **Razavi B.** Design Techniques for CMOS Wireline NRZ Receivers Up To 56 Gb/s // IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society.-2023.- Vol. 3.- P. 118–133, doi: 10.1109/OJSSCS.2023.3290551
6. **Melikyan V., Martirosyan M., Piliposyan G.** 14 nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future // Small Systems Simulation Symposium.- Yerevan State University, 2018.- P. 37–41.
7. **López-Araiza K.G., Rangel-Patiño F.E., Ascencio-Blancarte J.E., Vega-Ochoa E.** A Multi-Stage CTLE Design and Optimization for PCI Express Gen6.0 Link Equalization // 2023 IEEE Latin American Electron Devices Conference (LAEDC).- Puebla, Mexico, 2023.- P. 1–4, doi: 10.1109/LAEDC58183.2023.10209113
8. **Han F., Yan J.** A Low-Power Receiver Equalization Circuit Based on Source Degeneration Structure // 2024 4th International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Communication (EIECC).- Wuhan, China, 24.- P. 142–145, doi: 10.1109/EIECC64539.2024.10929589
9. **Singh P., Walia R., Nagulapalli R., Sakare M.** A Linearity Improved Equalizers for Short-Channel Communication Links, // 2024 35th Irish Signals and Systems Conference (ISSC).- Belfast, United Kingdom, 2024.- P. 1–5, doi: 10.1109/ISSC61953.2024.10603313
10. A Current DAC Based Current Generator with Fourth-Order Current-Mode Filter for Electrical Impedance Tomography / **J. Li, Y. Wu, D. Jiang et al** // 2024 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS).-Singapore, 2024.- P. 1–4, doi: 10.1109/ISCAS58744.2024.10558679

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 18.06.2025.

## Մ.Ա. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ

### ԱՆԸՆԴՀԱՏ ԳԾԱՅԻՆ ՀԱՄԱՀԱՐԹԵՑՄԱՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՈՒՄ ԳԾԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ԼԱՎԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈՂ

Ներկայումս բարձր արագությամբ SERDES համակարգերը լայնորեն օգտագործվում են, և դրանց բաղադրիչներին առաջադրվող պահանջները խստացել են: Տվյալների փոխանցման արագությունները և տակտային ազդանշանների հաճախությունները հասել են 224 *Գբիթ/վրկ* և 16 *ԳՀց*-ի համապատասխանաբար, որը հանգեցնում է սահմանափակումների խստացման և մեծ մարտահրավերների առաջացման դրանց իրականացման գործընթացում: Կարևոր մարտահրավերներից մեկը համակարգի գծայնությունն է: SERDES համակարգի տվյալների ուղին բաղկացած է հաջորդականացնող հանգույցից, ելքային տանող հանգույցից և հաղորդիչ հանգույցից, ինչպես նաև հոսքուղիներից, որոնք կապում են հաղորդիչ համակարգը ընդունիչ համակարգի հետ: Ընդունիչում տվյալներն անցում են ընդունիչ հանգույցով (AFE), որը կազմված է անընդհատ գծային համահարթեցնող հանգույցից (CTLE) և

անալոգաթվային կերպափոխիչից (ADC)՝ վերջնական թվային ազդանշանների փոխակերպման համար: Այս ուղու ընթացքում ազդանշանի վատթարացում է տեղի ունենում՝ կախված ազդանշանի հաճախությունից և հոսքուղու պատճառով առաջացած կորուստներից: Այդ խնդիրները լուծելու համար օգտագործվում են ընդունիչ հանգույցները, որոնք սովորաբար բաղկացած են ճնշիչ հանգույցից, անընդհատ գծային համահարթեցնող հանգույցից և, որոշ դեպքերում, փոփոխական ուժեղացման գործակցով ուժեղարարներից: Կարևոր է անդրադառնալ ընդունիչ հանգույցում և անալոգաթվային կերպափոխիչում հանդիպող գծայնության խնդիրներին: Գծայնության վատթարացումը կամ վատ գծայնությունը կարող են հանգեցնել համակարգում նշանակալի խնդիրների, ներառյալ տվյալների սխալ փոխակերպման և բիթի սխալի տեմպի (BER) նվազման: Անդրադարձ է կատարվել ընդունիչ հանգույցի գծայնության խնդիրներին, հատկապես առաջացող անընդհատ գծային համահարթեցնող հանգույցի պատճառով: Հիմնական ոչ գծային վարքագիծն առաջանում է անընդհատ գծային համահարթեցնող հանգույցում, հիմնականում տարբեր ռեակտիվ բաղադրիչների օգտագործման պատճառով:

**Առանցքային բաներ.** Անընդհատ գծային համահարթեցնող հանգույց, գծայնություն, Serdes համակարգ, ընդունիչ հանգույց, Հաղորդիչ համակարգ, ընդունիչ համակարգ, հաղորդիչ-ընդունիչ:

**С.А. ХАЧАТРЯН**

#### **МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЛИНЕЙНОСТИ В ЛИНЕЙНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ВРЕМЕНИ**

В настоящее время наряду с широким использованием высокоскоростных систем SERDES увеличились также требования к конкретным компонентам. Скорости передачи данных и частоты тактового сигнала достигли  $224 \text{ Гбит/с}$  и  $16 \text{ ГГц}$  соответственно, что привело к большим вызовам при их реализации. Одной из значительных проблем является линейность системы. Путь данных системы SERDES состоит из сериализатора и драйвера со стороны передатчика, а также каналов, которые соединяют передатчик с приемником. В приемнике находится аналоговый фронт-энд (AFE), который включает в себя линейный эквалайзер непрерывного времени (CTLE) и аналого-цифровой преобразователь (ADC) для окончательного преобразования в цифровые сигналы. На этом пути происходит деградация сигнала, зависящая от частоты сигнала и потерь в канале. Для решения этих проблем используются AFE, которые обычно состоят из аттенюатора, линейных эквалайзеров непрерывного времени и, в некоторых случаях, усилителей с переменным коэффициентом усиления. Важно решить проблемы линейности, возникающие в блоках AFE и ADC. Деградация линейности, или плохая линейность, может привести к значительным проблемам в системе, включая неправильное преобразование данных и снижение коэффициента ошибок битов (BER). В данной статье рассматриваются проблемы линейности в аналоговом фронт-энде (AFE) с особым акцентом на линейный эквалайзер непрерывного времени (CTLE). Основное нелинейное поведение возникает из-за CTLE, главным образом из-за использования различных реактивных компонентов.

**Ключевые слова:** линейный эквалайзер непрерывного времени, линейность, система Serdes, аналоговая входная часть, передатчик, приемник, трансивер.

UDC 621.3.049

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.4-502

A.Kh. GEVORGYAN

**THE LATENCY IMPROVEMENT METHOD FOR HIGH-SPEED SERDES  
CLOCK-DATA RECOVERY LOOP**

High-speed serializer/deserializer (SerDes) systems are essential for enabling rapid and reliable data transfer in modern digital communication interfaces. Central to their operation is the clock and data recovery (CDR) circuit, which reconstructs a clean sampling clock from incoming serial data streams to ensure accurate data interpretation. Among various architectures, dual-loop CDRs combining both frequency and phase tracking loops have become prominent for their ability to handle frequency offsets and maintain precise phase alignment. The timing characteristics within these CDR loops, including synchronization between digital control signals and clock domains, play a critical role in overall performance. Improper timing management can introduce jitter, glitches, or metastability, directly impacting the bit error rate and reliability of high-speed links. Thus, careful attention to timing such as the use of synchronizing elements like D-latches is vital for robust, low-jitter CDR operation in high-speed SerDes applications. While a D-latch is commonly employed to synchronize and stabilize the transfer of digital control codes from the CDR loop to the phase mixer (PMIX), its use introduces certain drawbacks like timing errors in the loop. This is the potential cause of BER degradation which is a crucial parameter to meet the industry compliance standards. The usage of the proposed method improves jitter tolerance resulting in an additional design logic and in a negligible area increase.

**Keywords:** SerDes, latency, jitter, phase mixer, BER, receiver, D-latch.

**Introduction.** High-speed electrical serial links are at the core of modern data center and server architectures, enabling the massive data throughput required for energy-proportional computing. As the demand for bandwidth grows, contemporary systems increasingly rely on serializer/deserializer (SerDes) architectures that support per-lane data rates reaching multi-gigabit per second operation speeds leading the clocking scheme to become the dominant factor of power consumption in high-speed transceivers [1]. In a typical SerDes setup, the transmitter (Tx) converts parallel data into a high-speed serial stream using a clock generated by a phase-locked loop (PLL). This serial data traverses a lossy backplane or copper channel, where it suffers from signal degradation and inter-symbol interference (ISI). At the receiver (Rx) in high-speed SerDes systems, the critical stages for ensuring reliable data transmission are the blocks responsible for data equalization such as CTLE

(Continuous time linear equalizer), FFE, DFE and clock and data recovery (CDR) circuit. Data equalization is responsible for compensating for the channel-induced losses and inter-symbol interference (ISI) that occur as the signal travels through the backplane or copper cable. This process restores the integrity of the received waveform, opening the eye diagram and making the signal suitable for further digital processing. Following equalization, the CDR block extracts a clean sampling clock and recovers the transmitted data from the equalized but still potentially noisy signal. The performance of these stages directly impacts the overall bit error rate (BER) and timing accuracy of the SerDes link, as any residual distortion or timing misalignment can lead to data errors or increased jitter in the recovered clock.

Fig. 1 shows a block diagram of a typical high-speed serial-link (SerDes) [2] consisting of the main building blocks mentioned earlier.

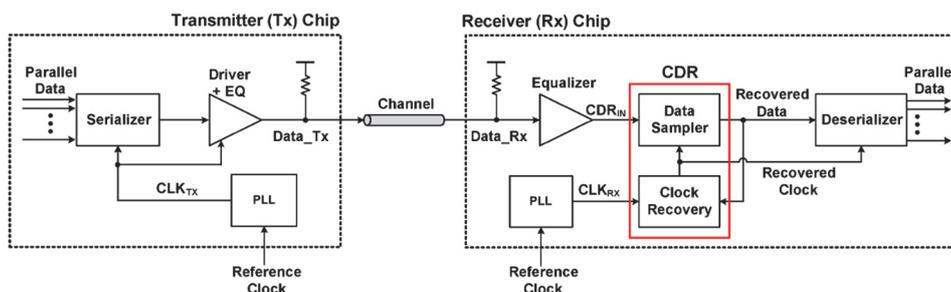


Fig. 1. Typical high-speed serial-link SerDes architecture

In modern high-speed SerDes receivers, digital CDR architectures are widely adopted to achieve robust clock recovery under multi-gigabit operation. In these digital approaches, the CDR is composed of two feedback paths: a frequency loop, which corrects long-term frequency offset between the transmitter and receiver clocks, and a phase loop, which provides fine-grained phase alignment to the incoming data stream.

The phase and frequency error signals are typically processed through digital proportional and integral accumulators, whose outputs reflect the necessary clock corrections. To interface with the analog domain, the filtered digital control word is converted to an analog signal by a current-steering digital-to-analog converter (IDAC). This analog signal directly controls the phase interpolator (PI) or phase mixer circuit (PMIX), which adjusts the phase of the recovered clock with high resolution. The PI thus acts as a finely tunable delay element, enabling precise clock alignment required for reliable data recovery at multi-gigabit rates.

This digital-to-analog signal path from the digital CDR logic, through the IDAC, to the PI/PMIX not only provides flexibility in loop design and programmability,

but also enables low-jitter, high-speed operation essential for contemporary data center and server applications.

The digital CDR model (Fig. 2) [3] consists of digital bang-bang phase detector, a frequency integrator, a phase integrator and a phase interpolator.

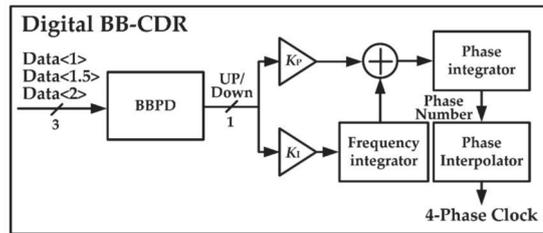


Fig. 2. The block diagram of the digital CDR

**The CDR design.** When designing such CDRs (Clock Data Recovery circuits), the D-latch placed at the output serves several important purposes that are crucial for ensuring reliable and stable operation. Primarily, the D-latch acts as a synchronization element, capturing the control signals generated within the loop at precise moments aligned with the system clock. This synchronization helps prevent glitches and transient disturbances from propagating downstream, which is especially vital at the high data rates characteristic of modern SerDes systems. Additionally, the latch provides a stable, consistent control input to the phase adjustment circuitry, thereby enhancing overall loop stability. By isolating the digital control logic from the analog domain, the D-latch also contributes to improved noise immunity and timing predictability.

The CDR loop presented along with the analog clock path (PMIX, ILO, ADC) in Fig. 3 consists of bang-bang phase detector, followed by D-latch feeding through the phase and frequency tracking loops, which are isolated from the analog clock path by using D-latch to avoid glitches when large code fluctuations occur resulting overall loop stability. Then the IDAC is used to pass the codes to the analog clocking.

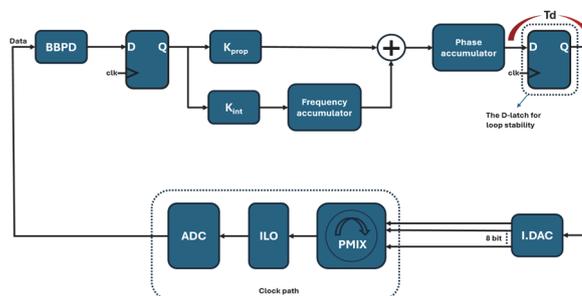


Fig. 3. CDR loop design

**Problem description.** By the use of D-latches the latency is introduced due to time-interleaved sampling [4] to the overall CDR loop. Therefore, it is important to consider certain trade-offs, such as potential added jitter and timing complexity because of additional latency introduced ( $T_d$ ), which can impact the performance of the overall clock recovery system especially in high speed SerDes systems.

**The proposed method.** To address the additional jitter and latency problem introduced by the D-latch, the selective-latch method is proposed (Fig. 4).

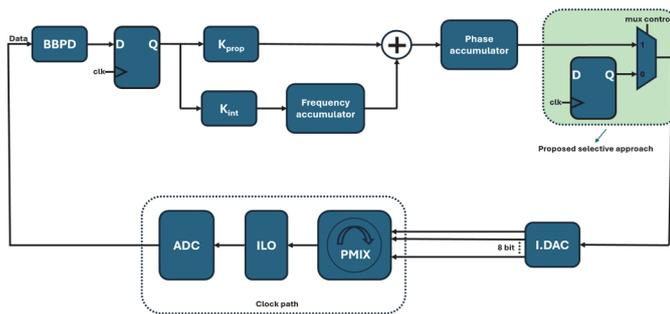


Fig. 4. The CDR loop with the proposed solution

This will allow us to remove a D-latch, hence its negative impact on the CDR loop when it is necessary.

In Fig. 5 we can see that the CDR needs to be locked at first when starting up and its output codes should be settled to some small code range. At this point we can say that the CDR is locked and all the BER and other measurements will be performed after that time point for reasonable results. And since the D-latch mainly filters large fluctuations as they occur at the beginning of the process, it we will have an option with the proposed solution to enable the D-latch path at the output to improve the loop stability and avoid large settling times.

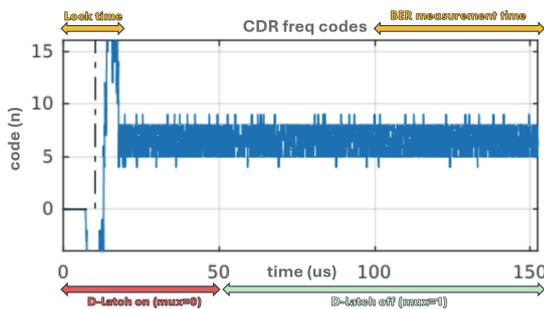


Fig. 5. The CDR output frequency codes

**Simulation Results.** To check the proposed method's impact on the system performance, the Matlab simulation is performed using the designed simulink

model of the system consisting of an approximated data transmitter and receiver (TX/RX) circuits and the designed CDR circuit, which also provides the ability to select between different channel models. This model allows to perform 20 times faster simulations resulting in 10% accuracy degradation.

The jitter tolerance (JTOL) measurements are performed to be able to evaluate the difference between the two approaches. The jitter tolerance is examined and the maximum input jitter at a given frequency that a CDR loop can tolerate is predicted [5].

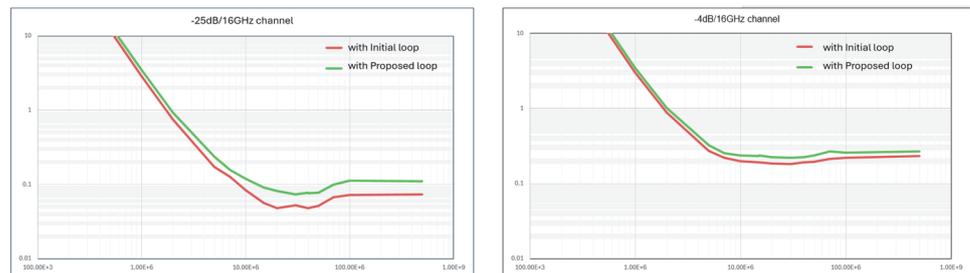


Fig. 6. The JTOL curve comparison for long and short channel cases

The JTOL curve comparison (Fig. 6) shows that disabling the D-latch after the CDR is locked results in an overall better curve. The simulations were performed with the long(-25dB) and short(-5dB) channel models to have a more broader picture of the improvement.

**Conclusion.** A CDR with controllable output path is proposed. The method improves the latency when the BER is measured, meanwhile allowing the use of the initial version to isolate the large code fluctuations at the CDR output with the D-latch while locking phase. This results in improvement in BER which translates to better jitter tolerance. The usage of the proposed method results in additional design logic change which causes a negligible area increase(<0.5%). The proposed method can be used in modern high speed SerDes systems where digital clock-data recovery is supported.

## REFERENCES

1. 103 fJ/b/dB, 10–26 Gb/s Receiver With a Dual Feedback Nested Loop CDR for Wide Bandwidth Jitter Tolerance Enhancement / Y. -C. Liu, W. -Z. Chen, Y. -S. Lee, Y. -H. Chen, et al // IEEE Journal of Solid-State Circuits.- Oct. 2023.- Vol. 58, no. 10. -P. 2801-2811.
2. Heejae Hwang and Jongsun Kim. A 100 Gb/s Quad-Lane SerDes Receiver with a PI-Based Quarter-Rate All-Digital CDR // Electronics.-2020.-9(7).-1113, <https://doi.org/10.3390/electronics9071113>
3. A Digital Bang-Bang Clock and Data Recovery Circuit Combined with ADC-Based Wireline Receiver / Youzhi Gu, Xinjie Feng, Runze Chi, Jiangfeng Wu and Yongzhen Chen // Electronics.- 2022.-11(21).-3489, <https://doi.org/10.3390/electronics11213489>

4. **Kunal Yadav, Ping-Hsuan Hsieh and Aanthony Chan Carusone.** Loop Dynamics Analysis of PAM-4 Mueller–Muller Clock and Data Recovery System // 2022 IEEE Open Journal of Circuits and Systems.-2022.-Vol. 3.-P. 216-227.
5. **Hong D. and Cheng K. -T.** Bit-Error Rate Estimation for Bang-Bang Clock and Data Recovery Circuit in High-Speed Serial Links // 26th IEEE VLSI Test Symposium (vts 2008).-San Diego, CA, USA, 2008.-P. 17-22.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 18.06.2025.

### Ա.Խ. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ

#### ԱՐԱԳԱԳՈՐԾ SERDES ՀԱՍՄԿԱՐԳԵՐՈՒՄ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ԵՎ ՏԱԿՏԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ՇՂԹԱՅԻ ՀԱՊԱՂՄԱՆ ԲԱՐԵԼԱՎՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Արագագործ սերիալացնող/ապասերիալացնող (SerDes) համակարգերի դերը կարևոր է՝ ժամանակակից թվային հաղորդակցությունների ինտեգրացիայի արագ և հուսալի տվյալների փոխանցումն ապահովելու համար: Դրանց աշխատանքում գլխավոր դեր է կատարում տվյալների և տակտային ազդանշանի վերականգնման (CDR) շղթան, որը վերականգնում է մաքուր տակտային ազդանշան մուտքագրվող հաջորդական տվյալների հոսքերից՝ տվյալների ճշգրիտ ընթերցումն ապահովելու համար: Մի շարք տարբեր կառուցվածքներով շղթաներից առանձնանում է երկուղի CDR-ը, որն ունի և հաճախության, և փուլի փոփոխություններին հետևող առանձին ուղիներ, ինչը թույլ է տալիս շտկել հաճախության և փուլի շեղումները: Այս տիպի շղթաների ժամանակային պարամետրերը պահանջում են համապատասխանություն թվային կառավարման ազդանշանների և տակտային ազդանշանի միջև, ինչի հետևանքով կարևորվում է նրանց դերը ամբողջ շղթայի աշխատանքի արդյունավետության բարձրացման գործում: Ոչ ճշգրիտ ժամանակային կառավարումը կարող է առաջացնել ազդանշանի թրթռոցներ, շեղումներ կամ ոչ կայուն վիճակ, որոնք ուղղակիորեն ազդում են բիթային սխալանքի և արագագործ համակարգերի հուսալիության վրա: Ուստի ճշգրիտ ժամանակային կառավարումն իրականացվում է սինխրոնացնող տարրերի՝ Դ-սևեռիչի օգտագործմամբ, ինչը կարևոր է կայուն և փոքր թվով ազդանշանի թրթռոցներով CDR շղթայի աշխատանքի համար արագագործ SerDes համակարգերում: Դ-սևեռիչը սովորաբար կիրառվում է թվային կառավարման ազդանշանների սինխրոնացման և կայունության համար՝ փոխանցելով տվյալները CDR շղթայից փուլային խառնիչին (PMIX), սակայն դրա օգտագործումը կարող է առաջացնել որոշ թերություններ, ինչպիսիք են ժամանակային սխալները: Սա կարող է հանգեցնել բիթային սխալանքի վատթարացման, որը կարևոր չափանիշ է արդյունաբերության համապատասխանության ստանդարտների տեսանկյունից: Առաջարկվող մեթոդի կիրառումը բարելավում է ազդանշանի թրթռոցի թույլատրելի սահմանը, որի իրագործման համար պահանջվում է հավելյալ տրամաբանական տարրի օգտագործում՝ հանգեցնելով աննշան մակերեսի մեծացման:

**Առանցքային բառեր.** SerDes, հապաղում, ազդանշանի թրթռոց, փուլային խառնիչ, բիթային սխալանք, ընդունիչ հանգույց, Դ-սևեռիչ:

А.Х. ГЕВОРГЯН

**МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ КОНТУРА ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ТАКТОВЫХ ДАННЫХ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ SERDES СИСТЕМАХ**

Высокоскоростные serializer/deserializer (SerDes) системы необходимы для обеспечения быстрого и надежного обмена данными в современных цифровых коммуникационных интерфейсах. В центре их работы находится контур восстановления тактовых данных (CDR), который восстанавливает чистый тактовый сигнал из входящих последовательных потоков данных для обеспечения точной интерпретации данных. Среди различных архитектур особое место занимают двухконтурные CDR-схемы, объединяющие контур отслеживания частоты и контур отслеживания фазы благодаря своей способности справляться с частотными смещениями и поддерживать точное фазовое выравнивание. Временные характеристики в этих CDR-схемах, включая синхронизацию между цифровыми управляющими сигналами и тактовым сигналом, играют критическую роль в общей производительности. Неправильное управление временем может привести к дрожанию сигнала, глюкам или метастабильности, что напрямую влияет на ошибки передачи (BER) и надежность высокоскоростных систем. Поэтому особое отношение к таймингу, например, использование синхронизирующих элементов, таких как Д-триггеров, является важным для стабильной работы CDR-схем с низким дрожанием сигнала в приложениях высокоскоростных SerDes. Хотя Д-триггеры обычно используются для синхронизации и стабилизации передачи цифровых управляющих кодов от CDR к фазовому миксеру (PMIX), это вводит определённые недостатки, такие как временные ошибки в контуре. Это может стать причиной ухудшения BER, что является важным параметром для соответствия отраслевым стандартам. Использование предлагаемого метода повышает толерантность к дрожанию сигнала, что приводит к добавлению логики в дизайн и к незначительному увеличению площади.

**Ключевые слова:** SerDes, задержка, дрожание сигнала, фазовый миксер, BER, приемный узел, Д-триггер.

V.S. POGHOSYAN

**LATTICE MODELS OF SELF-ORGANIZED CRITICALITY AND FULL INFORMATION DISSEMINATION SCHEMES: APPLICATIONS IN UAV SWARM SYSTEMS**

This paper presents a comprehensive review of self-organized systems and gossip-based communication schemes, with a particular focus on applications in UAV swarm coordination and communication algorithms. The proposed UAV coordination strategy employs dynamics of special quasi-random walks to achieve scalable and balanced swarm behavior without centralized control. The developed tool for designing optimal communication schemes, Graph Plotter, supports verification of gossip properties and fault-tolerance. Validated by simulations, a decentralized UAV swarm system has been constructed.

**Keywords:** exactly solvable lattice models, non-equilibrium systems, self-organized criticality, gossip problem.

**Introduction.** The relevance of complex self-organizing systems and communication schemes based on lattice models of both non-equilibrium and equilibrium statistical mechanics arises from their widespread applicability in the modeling of complex dynamical processes.

Lattice models have been extensively studied in the context of statistical mechanics, including the Potts spin model, the densely packed dimer model, the totally asymmetric simple exclusion process (TASEP), the Abelian sandpile model, the  $O(n)$  loop model, the rotor-router model, and other related systems. Among the combinatorial analytical methods employed are the Bethe Ansatz approach and the enumeration of spanning trees based on generalized Kirchhoff theorem. The analytical results and proposed hypotheses have been validated through simulations using a two-dimensional frontal cellular automata algorithm and the Monte Carlo method. Uniformly distributed spanning trees were generated using Wilson's algorithm, which is based on loop-erased random walks.

The developed methods and algorithms for optimal fault-tolerant schemes of full information exchange have been adapted to construct decentralized, multi-agent, and self-organizing systems, in which potential communication failures caused by external factors are effectively neutralized. To support the design and analysis of such systems, the simulation tool Graph Plotter has been developed, enabling verification of classical gossip properties, broadcast robustness, and  $k$ -fault tolerance under various network configurations.

Unmanned aerial vehicle (UAV) swarms represent a promising frontier in autonomous systems, offering a wide range of applications in surveillance, mapping, search and rescue, and environmental monitoring. The effective coordination of such swarms demands robust mathematical models capable of capturing their inherently decentralized and dynamic behavior. The approach presented in this work is grounded in self-organized criticality (SOC) and lattice-based models, such as the Abelian sandpile and rotor-router models, which naturally embody principles of local interaction, robustness, and emergent global structure. The proposed decentralized coordination strategy for UAV swarms is based on the Eulerian properties of rotor-router model. According to this model, UAVs follow quasi-random trajectories within dynamically defined sub-areas, ensuring deterministic yet uniformly distributed coverage. The rotor-router mechanism enables self-organized swarm behavior, eliminates the need for centralized control, and supports balanced task allocation across the operational area. This coordination approach is particularly suited for scalable and resilient multi-agent systems operating in dynamic environments.

**Theory of self-organized criticality: review of results.** In [1], the  $q$ -state Potts spin model defined on anisotropic ladder graphs (lattices) is investigated. Assuming thermodynamic equilibrium, the representation of the partition function (probability generating function) as a sum over all subgraphs of the lattice has been studied. In particular, by using the well-known contraction-deletion property of graph edges for computation, a system of linear recurrent equations (a fixed-size transfer matrix) has been constructed. By solving this system, the exact partition function has been computed, and the Fisher zeros have been constructed in the complex plane. This result generalizes the results of the work [2].

In [3], the totally asymmetric simple exclusion process (TASEP) with a fixed number of particles and discrete time has been considered on finite rings (one-dimensional lattices with periodic boundary conditions). As an example, the backward-ordered sequential update rule has been chosen, which is invariant under parallel translation for periodic boundary conditions. It has been proven that the state update defined in this way leads to a stationary state in which all possible configurations of particles have equal probability. The generating functions of the conditional probability distributions for transitions between states over a time interval  $T$  have been calculated, along with the mean velocity of particle flow and the diffusion coefficient at all stages of the evolution. An exact and explicit expression has been obtained for the stationary velocity of TASEP on rings of arbitrary size and particle density. The evolution of small systems toward the stationary state has been clearly demonstrated. By interpreting the generating

function as the partition function of a thermodynamic system, the distribution of its zeros in the complex plane has been studied.

In [4], a generalized form of the TASEP model with particle-dependent jump probabilities is considered. Using the Bethe ansatz combinatorial approach, determinant-form expressions have been obtained for the transition probabilities between non-stationary states over a discrete time interval  $T$ . Keeping the number of particles fixed, in the continuous-time and infinite-lattice limit, this result converges to the one presented in the work [5].

In [6], the TASEP model is presented on a ring with discrete time and particle-dependent jump probabilities. The mean flow velocity per particle has been exactly calculated for different types of dynamics at all stages of the evolution, and the relaxation to the stationary state has been explicitly demonstrated. These results constitute generalizations and extensions of the findings presented in the works [7-10].

In [11], the fully packed dimer model (domino tiling) on a two-dimensional square lattice with a single empty site at the center has been analytically studied. By generalizing the spanning tree representation to a spanning webs representation, determinant expressions have been obtained for the random variables describing the mobility of dimers. In the thermodynamic limit of large lattices, these expressions are reduced to the evaluation of Toeplitz determinants and their minors. The probability that the empty site is fully jammed, as well as other characteristics of diffusion, have been exactly calculated. Their values agree with the numerical results and proposed hypotheses presented in work [12].

In [13-17], the probability distribution of height variables in the Abelian sandpile model on a two-dimensional square lattice [18,19], as well as the asymptotic expressions for their two-point correlation functions, have been analytically calculated. The obtained asymptotic expressions exhibit logarithmic behavior, as previously predicted by logarithmic conformal field theory. It has been shown that the probability distribution of site heights in the Abelian sandpile model is directly related to the probability that the trajectory of a loop-erased random walk (LERW) passes through a given neighboring vertex of the starting position (return probability). This fact has been proven through a mapping onto the local monomer-dimer model. The exact values of the listed quantities had remained at the level of conjecture for many years, despite the development of computational methods, their optimizations, high-precision numerical approximations, and numerical simulations, as reported in [20-23].

In [24], the fixed-energy sandpile model on a square lattice with conservative sites (closed boundaries) is considered, and a connection is established between its threshold density  $\rho_{th}(h_0)$  and the stationary density  $\rho_s = 2.125$  of the Abelian

sandpile model with open boundaries (absorbing dissipative sites). Considering the empty-field initial state ( $h_0 = 0$ ), a slight difference ( $\rho_{\{th\}}(0) = 2.125288 \dots$ ) was observed in the works by A. Fey et al [25,26]. In [24], by generalizing the set of initial states, negative initial heights have been considered. A hypothesis was proposed that the difference  $\rho_{th}(h_0) - \rho_s$  sharply tends to zero as the initial negative height increases in absolute value ( $h_0 \rightarrow -\infty$ ). This hypothesis is proved in the mathematical work by L. Levine [27], where a formal theory is developed and a more general theorem is proved.

In [28], the correlation function of  $k$  loop-erased random walk (LERW) paths with starting and ending points grouped at two locations separated by a fixed distance  $r$  has been studied. Using combinatorial methods, an asymptotic expression containing a logarithmic factor has been obtained and compared with the corresponding quantities in other models. A connection has also been established with the corresponding conformal field theory.

In [29], exact values of boundary correlations have been obtained on the two-dimensional half-plane for the percolation model ( $O(1)$  loop model) and the spanning tree model ( $O(0)$  loop model).

In [30], the dense dimer covering model defined on a square lattice placed on a cylindrical surface has been studied. Using the Temperley–Lieb transfer matrix formalism, and by adapting the transfer matrix to classify arrow configurations into different classes according to the number of non-contractible loops arising from the considered topology, the partition functions (probability generating functions) have been calculated. To reveal the occurrence of Jordan cells in the transfer matrix, an extended transfer matrix has been introduced, which not only retains information about the positions of the dimers but also generates colors propagating along the branches of the associated trees.

The rotor-router model (model of multi-Eulerian walkers [31]), which represents a quasirandom walk process of a particle (or information), has been investigated. In [32], certain properties of particle behavior have been studied within a recurrent state environment without absorbing sites. In particular, the correlation between emerging dimers (cycles of length 2) and contours (cycles containing more than 2 vertices), as well as the mean value of the difference in their numbers, has been analytically calculated. The diffusion properties of the particle have also been studied on the infinite square lattice. In [33], a loop reversibility theorem has been proven for the rotor-router model. The model defined on semi-infinite cylindrical lattice is investigated in [34]. The set of labeled vertices on the lattice that generate closed loops through rotor dynamics has been examined in [35]. For these vertices, a hypothesis is proposed that the trajectory

formed by their order of appearance asymptotically takes the shape of an Archimedean spiral. We have shown that this property is directly related to the tree-like structures that describe the evolution of vertex clusters visited during the walk. In the case of the square lattice, we have obtained that the average number of visits to the origin,  $\langle n_0(t) \rangle$  at time  $t \gg 1$  satisfies  $\langle n_0(t) \rangle = 4\langle n(t) \rangle + O(1)$ , where  $\langle n(t) \rangle$  is the average number of spiral turns.

A comprehensive analysis and the relations between constants obtained explicitly in uniform spanning trees are presented in [36]. The enumeration of spanning trees is employed in the investigation of Abelian sandpile, rotor-router and dimer models.

**Optimal information dissemination gossip schemes: review of results.**

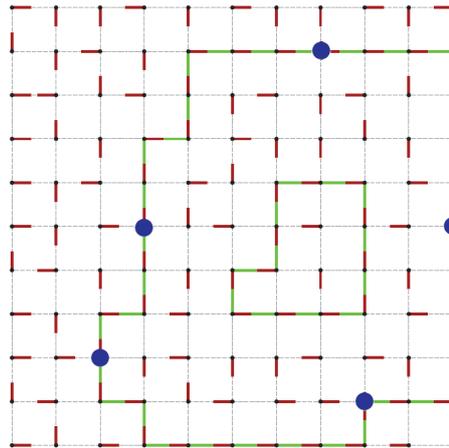
Research has been conducted on the design of network-optimal schemes for full information exchange in multiprocessor systems, as well as on the analytical derivation of formulas for the minimal values of their key characteristics (number of links, number of calls, execution time) [37-41]. To ensure the system's fault tolerance at a given level, several theorems have been proven [42,43]. In particular, the previously obtained upper bounds for the minimal number of calls in such schemes have been significantly improved. Additionally, an exact value has been obtained for the implementation time of k-fault-tolerant gossip schemes with an even number of vertices under minimal time.

A software toolkit (Graph Plotter) has been developed for the design, editing, and analysis of gossip schemes [44]. This tool allows users to verify various characteristics and properties of the constructed schemes. These include: classical gossip property, k-fault tolerance, broadcast, NOHO, NoDup, validation of broadcast schemes in three Messy models, the ability to detect disjoint paths and broadcast sub-schemes, and more.

Using a self-organization model, the well-known problem of minimizing energy consumption in computer networks has been reformulated [45-47]. For certain partial cases of this problem, new algorithms have been developed and implemented for the dynamic optimal distribution of user programs (tasks).

**Applications in UAV Swarm Systems.** UAV swarm movement is modeled as a multi-particle walk over the mission graph (representing the surveyed area), with the rotor-router deterministic mechanism applied [48]. Based on this approach, a coordination algorithm is designed to ensure the multi-Eulerian property, that is, each directed edge of the mission graph is visited by exactly one UAV (see Fig.). This algorithm satisfies essential self-organization requirements, including decentralized control, resilience to node failure, equitable task distribution, and verifiability of swarm membership [49-51]. Our results on gossip

schemes provide analytic guarantees for the optimality of communication, enabling secure and efficient full information exchange within the swarm, even in the presence of environmental obstacles or disruptions. UAVs exchange not only coordination data but also captured images. Further, the implemented fault-tolerant schemes dynamically adapt the swarm structure in response to UAV loss or interference [52].



*Fig. Demonstration of the multi-Eulerian property in a rotor-router-based UAV swarm on a square lattice. Each edge represents two directed edges, one in each direction. Blue dots represent UAVs navigating the graph deterministically. The external clockwise cycle, highlighted in green, is actively traversed by the UAVs. All (bidirected) edges within this cycle are eventually traversed in both directions, with each direction covered by a unique UAV. While the specific edge traversal patterns are not predetermined for individual UAVs, the system collectively ensures full directional coverage. The interior of the inner anticlockwise cycle (also highlighted in green) remains entirely unvisited, illustrating selective coverage and deterministic exclusion of certain regions*

The theoretical foundation developed through spanning tree correspondences and information dissemination theorems has enabled the construction of distributed software-hardware platforms for real-time swarm management. These platforms support encrypted communication [53], navigation along obstacle-aware paths, and automated workload balancing to optimize imaging coverage and minimize mission time. The result is a highly reliable, scalable system architecture suitable for real-world deployment in mission-oriented UAV swarm applications.

### **Acknowledgements**

This work was supported by the RA Science Committee, in the frames of the research projects 21AG-1B052 and 24DP-1B016.

## REFERENCES

1. **Poghosyan V.S.** Exact partition functions and Fisher zeroes for anisotropic spin and gauge Potts models // *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*. - 2005. - Vol. 40, part 4. - P. 1-4.
2. **Shrock R.** Exact Potts model partition functions on ladder graphs // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. - 2000. - 283. - P. 388-446.
3. **Brankov J.G., Papoyan V.I., Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** The totally asymmetric exclusion process on a ring: Exact relaxation dynamics and associated model of clustering transition // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. - 2006. - 368, issue 2. - P. 471-480.
4. **Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** Determinant solution for the TASEP with particle-dependent hopping probabilities on a ring // *Markov Processes and Related Fields*. - 2008. - 14, issue 2. - P. 233-254.
5. **Rákos A., Schütz G.M.** Bethe ansatz and current distribution in the ASEP with particle-dependent hopping rates // *Markov Processes and Related Fields*. - 2006. - 12. - P. 323-334.
6. **Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** The relaxation dynamics of the TASEP with particle-dependent hopping probabilities on a ring // *Reports on Mathematical Physics*. - 2008. - 61, No. 2. - P. 237-244.
7. **Evans M.R.** Phase transitions in one-dimensional nonequilibrium systems // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. - 1997. - 30. - P. 5669-5685.
8. **Priezzhev V.B.** Exact Nonstationary Probabilities in the Asymmetric Exclusion Process on a Ring // *Physical Review Letters*. - 2003. - 91. - P. 050601.
9. **Povolotsky A.M. and Priezzhev V.B.** Determinant solution for the totally asymmetric exclusion process with parallel update // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. - 2006. - P. P07002.
10. **Povolotsky A.M. and Mendes J.F.F.** Bethe ansatz solution of discrete time stochastic processes with fully parallel update // *Journal of Statistical Physics*. - 2006. - 123. - P. 125-166.
11. **Poghosyan V.S., Priezzhev V.B. and Ruelle P.** Jamming probabilities for a vacancy in the dimer model // *Physical Review E*. - 2008. - 77. - P. 041130.
12. Random walks, geometry, and irreversibility in square dimer tilings / **J. Bouttier, M.J. Bowick, M. Falcioni, P.Di Francesco, et al** // *Physical Review E*. - 2007. - 76. - P. 041140.
13. **Grigorev S.Y., Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** Three-leg correlations in the two-component spanning tree on the upper half-plane // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. - 2009. - P09008.
14. **Poghosyan V.S., Grigorev S.Y., Priezzhev V.B. and Ruelle P.** Pair correlations in sandpile model: A check of logarithmic conformal field theory // *Physics Letters B*. - 2008. - Vol. 659, issue 3. - P. 768-772.

15. **Poghosyan V.S., Grigorev S.Y., Priezzhev V.B. and Ruelle P.** Logarithmic two-point correlators in the Abelian sandpile model // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. - 2010. - P07025.
16. **Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** The problem of predecessors on spanning trees // *Acta Polytechnica*. - 2011. - Vol. 51, No. 1. - P. 59-62.
17. **Poghosyan V.S., Priezzhev V.B. and Ruelle P.** Return probability for the loop-erased random walk and mean height in the Abelian sandpile model: a proof // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. - 2011. - P10004.
18. **Dhar D.** Self-organized critical state of sandpile automaton models // *Physical Review Letters*. - 1990. - Vol. 64, No. 14. - P. 1613-1616.
19. **Priezzhev V.B.** Structure of two-dimensional sandpile. I: Height probabilities // *Journal of Statistical Physics*. - 1994. - 74. - P. 955-979.
20. **Piroux G. and Ruelle P.** Logarithmic scaling in the Abelian sandpile model // *Physics Letters B*. - 2005. - 607. - P. 188-196.
21. **Jeng M., Piroux G. and Ruelle P.** Height variables in the Abelian sandpile model: Scaling fields and correlations // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. - 2006. - P10015.
22. **Dhar D.** Theoretical studies of self-organized criticality // *Physica A*. - 2006. - Vol. 369, No. 1. - P. 29-70.
23. **Grassberger P. and Manna S.S.** Some more sandpiles // *Journal de Physique France*. - 1990. - 51. - P. 1077-1098.
24. **Poghosyan Su.S., Poghosyan V.S., Priezzhev V.B. and Ruelle P.** Numerical study of the correspondence between the dissipative and fixed energy Abelian sandpile models // *Physical Review E*. - 2011. - 84. - P. 066119.
25. **Fey A., Levine L. and Wilson D.B.** Critical densities in sandpile models with multiple topplings // *Physical Review Letters*. - 2010. - 104. - P. 145703.
26. **Fey A., Levine L. and Wilson D.B.** Approach to criticality in the Abelian sandpile model // *Physical Review E*. - 2010. - 82. - P. 031121.
27. **Levine L.** Threshold state and a conjecture of Poghosyan, Poghosyan, Priezzhev and Ruelle // *Communications in Mathematical Physics*. - 2015. - 335. - P. 1003-1017.
28. **Gorsky A., Nechaev S., Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** From elongated spanning trees to vicious random walks // *Nuclear Physics B*. - 2013. - Vol. 870, No. 1. - P. 55-77.
29. **Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** Correlations in the  $n \rightarrow 0$  limit of the dense  $O(n)$  loop model // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. - 2013. - 46. - P. 145002.
30. **Brankov J.G., Poghosyan V.S., Priezzhev V.B. and Ruelle P.** Transfer matrix for spanning trees, webs and colored forests // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. - 2014. - P. P09031.
31. **Priezzhev V.B., Dhar D., Dhar A. and Krishnamurthy S.** Eulerian walkers as a model of self-organized criticality // *Physical Review Letters*. - 1996. - 77. - P. 5079-5082.
32. **Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** Euler tours and unicycles in the rotor-router model // *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. - 2014. - P. P06003.

33. **Papoyan V.I., Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** A loop reversibility of the rotor-router walk // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. - 2015. - 48. - P. 285203.
34. **Papoyan V.I., Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** Rotor-router walk on a semi-infinite cylinder // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. - 2016. - P. 073209.
35. **Papoyan V.I., Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** Spiral structures in the rotor-router walk // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. - 2016. - P. 043207.
36. **Poghosyan V.S. and Priezzhev V.B.** Fundamental constants in the theory of two-dimensional uniform spanning trees // Theoretical and Mathematical Physics. - 2016. - Vol. 187, No. 3. - P. 952-963.
37. **Hovnanyan V.H., Poghosyan S.S. and Poghosyan V.S.** New methods of construction of fault-tolerant gossip graphs // IEEE CSIT, Revised Selected Papers. - 2013. - Vol. 1, No. 5. - P. 23-27.
38. **Hovnanyan V.H., Poghosyan S.S. and Poghosyan V.S.** Method of local interchange for the investigation of gossip problems // Mathematical Problems of Computer Science. - 2013. - 40. - P. 5-12.
39. **Hovnanyan V.H., Poghosyan S.S. and Poghosyan V.S.** Method of local interchange for the investigation of gossip problems: part 2 // Mathematical Problems of Computer Science. - 2014. - 41. - P. 15-22.
40. **Hovnanyan V., Poghosyan S. and Poghosyan V.** Gossiping properties of the edge-permuted Knödel graphs // CSIT. - 2017. - P.1-4.
41. **Poghosyan S.S. and Poghosyan V.S.** Rumor spreading and invasion percolation // Mathematical Problems of Computer Science. - 2019. - 56. - P. 30-42.
42. **Hovnanyan V.H., Poghosyan S.S. and Poghosyan V.S.** Fault-tolerant gossip graphs based on wheel graphs // Mathematical Problems of Computer Science. - 2014. - 42. - P. 43-53.
43. **Hovnanyan V., Poghosyan S. and Poghosyan V.** Open problems in gossip/broadcast schemes and the possible application of the method of local interchange // CSIT. - 2015. - P.66-70.
44. **Hovnanyan V.H., Poghosyan S.S. and Poghosyan V.S.** Graph Plotter: a software tool for the investigation of fault-tolerant gossip graphs // CSIT, Revised Selected Papers. - 2013. - Vol. 1, No. 5. - P. 20-22.
45. **Poghosyan H.R. and Poghosyan V.S.** Frontal cellular automata for the study of non-equilibrium lattice models // CSIT. - 2015. - P.44-46.
46. **Nahapetyan H.E., Poghosyan S.S. and Poghosyan V.S.** The investigation of models of self-organized systems by parallel programming methods based on the example of an Abelian sandpile model // CSIT. - 2013. - P. 260-262.
47. **Nahapetyan H.E., Poghosyan S.S., Poghosyan V.S. and Shoukourian Y.H.** The parallel simulation method for d-dimensional Abelian sandpile automata // Mathematical Problems of Computer Science. - 2016. - 46. - P. 117-125.

48. Cloud-based mathematical models for self-organizing swarms of UAVs: design and analysis / **S. Poghosyan, V. Poghosyan, S. Abrahamyan, A. Lazyan, et al** // Drone Systems and Applications. - 2024. - 12. - P.1–12.
49. Self-organizing multi-user UAV swarm simulation platform / **V. Poghosyan, S. Poghosyan, A. Lazyan, A. Atashyan, et al** // Programming and Computer Software. - 2023. - 49(S1). - P.S7–S15.
50. Mission preparation for self-organizing UAV swarms on multiuser platform / **A. Atashyan, A. Lazyan, D. Hayrapetyan, H. Astsatryan, et al** // Programming and Computer Software. - 2024. - 50(S1). - P. S39–S46.
51. **S. Poghosyan, Y. Alaverdyan, V. Poghosyan, A. Lazyan, et al.** Algorithms for operating self-organizing swarms of UAVs implementing full exchange of information // AIP Conference Proceedings. - 2023. - Vol. 2757, No. 1. - P. 070003.
52. Certain methods for investigating epidemics and preventing the spread of viruses in self-organizing systems / **S. Poghosyan, Y. Alaverdyan, V. Poghosyan, S. Abrahamyan, et al** // AIP Conference Proceedings. - 2023. - Vol. 2757, No. 1. - P. 070002.
53. **Alaverdyan Y., Poghosyan S. and Poghosyan V.** Confidential computing in edge-cloud hierarchy // International Journal of Computer Science & Information Technology. - 2023. - 15(3). - P.21.

Institute for Informatics and Automation Problems NAS RA. The material as is received on 01.06.2025.

#### **Վ.Ս. ՊՈՂՈՍՅԱՆ**

### **ԻՆՔՆԱԿԱԶՄԱԿԵՐՊՎԱԾ ԿՐԻՏԻԿԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆՑԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼՆԵՐ ՈՒ ԼՐԻՎ ԻՆՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ՄԽԵՄԱՆԵՐ՝ ԿԻՐԱՌՈՒՄՆԵՐ ԱԹՍ-ՆԵՐԻ ԵՐԱՄԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ**

Ներկայացված է ինքնակազմակերպված համակարգերի և GOSSIP հիմքով հաղորդակցման օպտիմալ սխեմաների համապարփակ ակնարկ՝ հատուկ ուշադրություն դարձնելով դրանց կիրառություններին ԱԹՍ-ների երամի համակարգման և հաղորդակցման ալգորիթմների մեջ: ԱԹՍ-ների համակարգման առաջարկվող ռազմավարությունը հիմնված է հատուկ քվադի-պատահական դեգերման դինամիկայի վրա՝ առանց կենտրոնացված կառավարմամբ երամի մասշտաբավորվող և հավասարակշռված վարքն ապահովելու համար: Հաղորդակցման օպտիմալ սխեմաների նախագծման համար ստեղծվել է Graph Plotter գործիքը, որը հնարավորություն է տալիս ստուգելու gossip հատկությունները և վթարակայունությունը: Միմուլյացիաներով հաստատված ԱԹՍ-ների երամի ապակենտրոն համակարգը նախագծվել և կառուցվել է:

**Առանցքային բառեր.** ճշգրիտ լուծվող ցանցային մոդելներ, ոչ հավասարակշիռ համակարգեր, ինքնակազմակերպված կրիտիկականություն, GOSSIP խնդիր:

**В.С. ПОГОСЯН**

**РЕШЕТОЧНЫЕ МОДЕЛИ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КРИТИЧНОСТИ И  
СХЕМЫ ПОЛНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ: ПРИМЕНЕНИЕ  
В СИСТЕМАХ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Представлен всесторонний обзор самоорганизованных систем и коммуникационных схем на основе gossip-моделей с особым вниманием к их применению в координации и алгоритмах связи роя беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Предлагаемая стратегия координации БПЛА основана на динамике специальных квазислучайных блужданий, что позволяет достичь масштабируемого и сбалансированного поведения роя без централизованного управления. Разработанный инструмент Graph Plotter предназначен для построения оптимальных коммуникационных схем и поддерживает проверку свойств gossip и устойчивости к отказам. На основе моделирования была сконструирована система децентрализованного роя БПЛА.

**Ключевые слова:** точно решаемые решеточные модели, неравновесные системы, самоорганизующаяся критичность, задача gossip.

Հ.Ս. ԱԲԳԱՐՅԱՆ

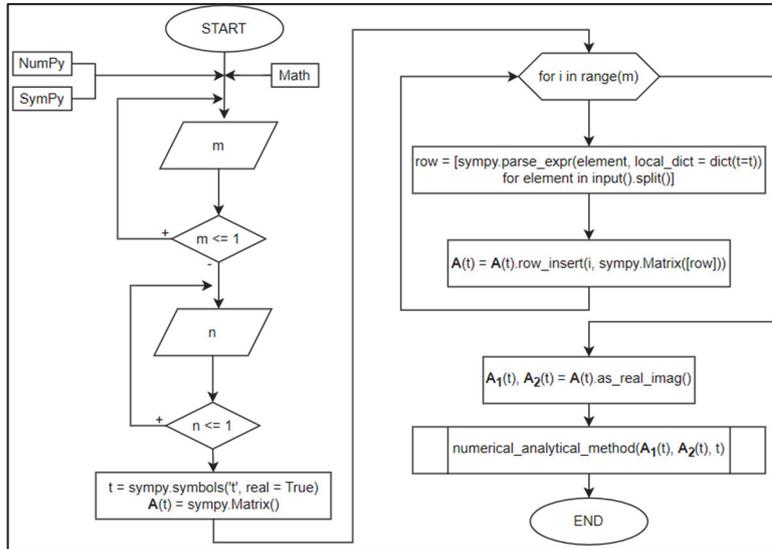
ՄՈՒՐ-ՊԵՆՐՈՈՒՋԻ ԿՈՄՊԼԵՔՍ ՄԻԱՊԱՐԱՄԵՏՐԱԿԱՆ ԸՆԴՀԱՆՐԱՑՎԱԾ  
ՀԱԿԱՂԱՐՁ ՄԱՏՐԻՑՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԻՐԱԿԱՆԱՑՈՒՄԸ  
ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ (I)

Ներկայացված է Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցների որոշման դեկոմպոզիցիոն թվա-անալիտիկ եղանակի ծրագրային իրականացումը: Անալիտիկ եղանակները հիմնվել են Մուր-Պենրոուզի 3-րդ պայմանի վրա: Թվա-անալիտիկ մեթոդները հիմնվել են ստացված անալիտիկ հարաբերակցությունների և Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա: Հաշվողական եղանակներն իրականացվել են տեղեկատվական տեխնոլոգիաների ժամանակակից միջոցներով, մասնավորապես՝ ծրագրավորման Python լեզվով, NumPy և SymPy գրադարաններով: Ծրագրային իրականացումը փորձարկվել է ուղղանկյուն մատրիցով մոդելային օրինակի վրա:

*Առանցքային բառեր.* Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրից, անալիտիկ լուծում, դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, թվա-անալիտիկ լուծում, ծրագրավորման Python լեզու, NumPy գրադարան, SymPy գրադարան:

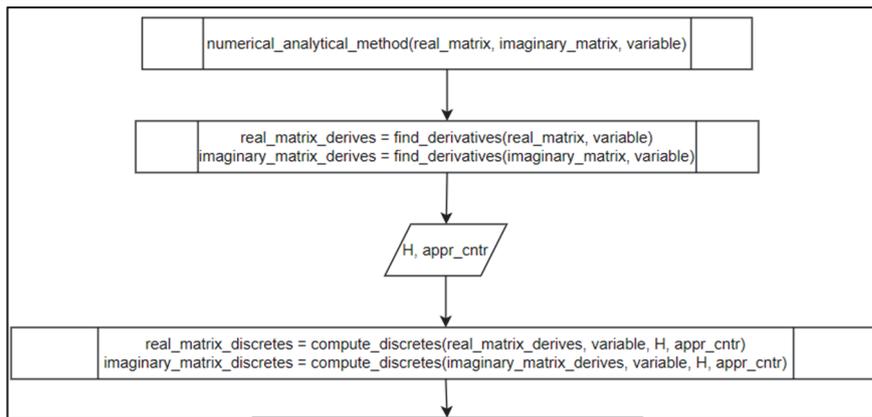
**Ներածություն:** [1] աշխատանքում առաջարկվել են Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ  $A^+(t)_{n \times m}$  մատրիցների [2] որոշման մեթոդներ՝  $A(t)_{m \times n}$  ուղղանկյուն մատրիցների դեպքում: Այդ մեթոդներում օգտագործվել են Մուր-Պենրոուզի 1-ին, 2-րդ և 3-րդ պայմանները: Սույն աշխատանքում ներկայացվում են թվա-անալիտիկ մեթոդների ծրագրային իրականացումների ալգորիթմների բլոկ-սխեմաները և Python լեզվով գրված ծրագրերը [3]:

Ենթադրենք՝ տրված է  $A(t)_{m \times n}$  մատրիցը, որտեղ  $A(t) \in C^{m \times n}$ : Մատրիցի չափերը [4] մուտքագրելուց հետո անհրաժեշտ է մուտքագրել մատրիցի տարրերը՝ տող առ տող և իրարից առանձնացված բացատներով (նկ. 1): Այնուհետև արդեն հնարավոր է առանձնացնել մատրիցի տարրերի իրական և կեղծ մասերը [5]:



Նկ. 1. Մատրիցի չափերի և տարրերի մուտքագրման բլոկ-սխեման

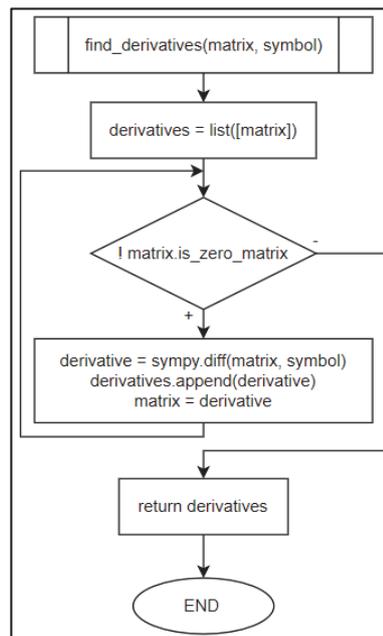
**Թվա-անալիտիկ մեթոդի ծրագրային իրականացումը [6]:**  $A(t)$  մատրիցի տարրերի  $A_1(t)$  իրական և  $A_2(t)$  կեղծ մասերի մատրիցները որոշելուց հետո անհրաժեշտ է որոշել դրանց տարրերի ածանցյալները՝ մինչև պահանջվող ճշտության ստացումը: Այնուհետև պետք է մուտքագրել մասշտաբային գործակցի ( $H$ ) ու մոտարկման կենտրոնի ( $appr\_cntr$ ) արժեքները և հաշվել  $A_1(t)$  ու  $A_2(t)$  մատրիցների դիսկրետները (նկ. 2): Այստեղ *real\_matrix*, *imaginary\_matrix* և *variable* պարամետրերը ներկայացնում են համապատասխանաբար  $A_1(t)$ ,  $A_2(t)$  մատրիցները և  $t$  պարամետրը:



Նկ. 2. Մատրիցների տարրերի ածանցյալների և մատրիցային դիսկրետների որոշման ալգորիթմի բլոկ-սխեման

$A_1(t)$  և  $A_2(t)$  մատրիցների տարրերի ածանցյալները որոշվում են առանձին ֆունկցիայի միջոցով (նկ. 3), որը`

- ❖ մուտքում ստանում է այն մատրիցը, որի տարրերի ածանցյալները պետք է որոշել, ինչպես նաև այն փոփոխականը, ըստ որի պետք է կատարվի ածանցումը,
- ❖ ելքում վերադարձնում է մուտքային մատրիցի տարրերի ածանցյալներից կազմված մատրիցների զանգվածը:

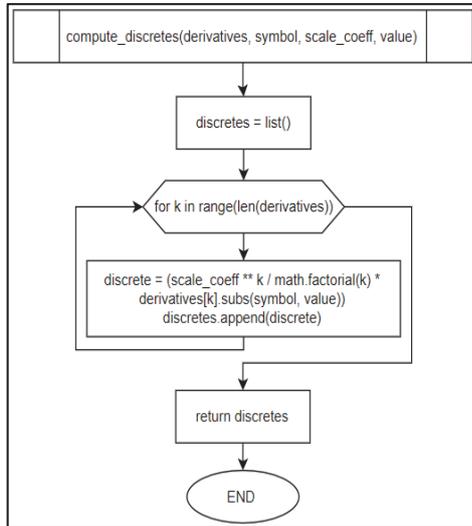


Նկ. 3. Մատրիցի տարրերի ածանցյալները որոշող ալգորիթմի բլոկ-սխեման

Ելքային զանգվածի 1-ին տարրը մուտքային մատրիցն է, 2-րդ տարրը` մուտքային մատրիցի տարրերի 1-ին կարգի ածանցյալներից կազմված մատրիցը, 3-րդ տարրը` մատրիցի տարրերի 2-րդ կարգի ածանցյալներից կազմված մատրիցը, և այդպես շարունակ` մինչև պահանջվող ճշտության ստացումը:

$A_1(t)$  և  $A_2(t)$  մատրիցների դիսկրետները [7] հաշվվում են առանձին ֆունկցիայի միջոցով (նկ. 4), որը`

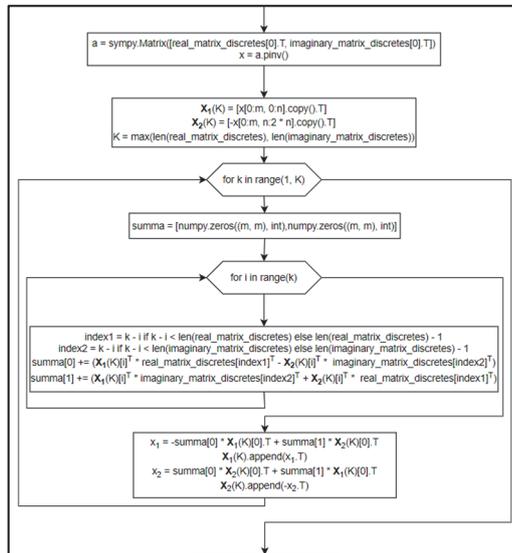
- ❖ մուտքում ստանում է մատրիցի տարրերի ածանցյալներից կազմված մատրիցների զանգվածը, ինչպես նաև այն փոփոխականը, ըստ որի կատարվել է ածանցումը, և մասշտաբային գործակցի ու մոտարկման կենտրոնի արժեքները,
- ❖ ելքում վերադարձնում է մատրիցային դիսկրետների զանգվածը:



Նկ. 4. Մատրիցային դիսկրետները հաշվող ալգորիթմի բլոկ-սխեման

Ելքային զանգվածի 1-ին տարրը մուտքային մատրիցի 0-րդ կարգի դիսկրետն է, 2-րդ տարրը՝ մատրիցի 1-ին կարգի դիսկրետը, և այդպես շարունակ:

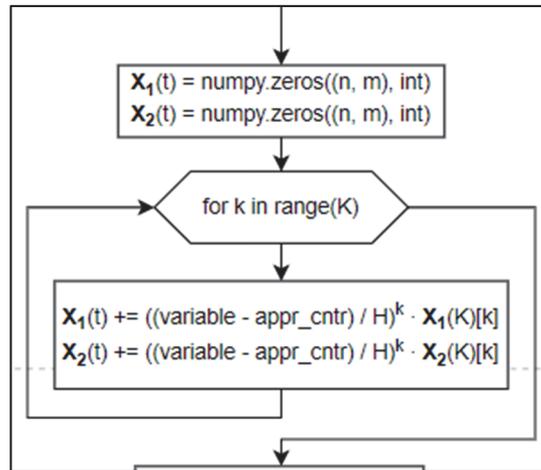
$A_1(t)$  և  $A_2(t)$  մատրիցների տարրերի ածանցյալները որոշելուց և մատրիցային դիսկրետները հաշվելուց հետո (նկ. 5) անհրաժեշտ է հաշվել  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցների դիսկրետները [1, բանաձև (20)–(23)]՝ մինչև պահանջվող ճշտության ստացումը:



Նկ. 5.  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցների դիսկրետների հաշվարկի բլոկ-սխեման

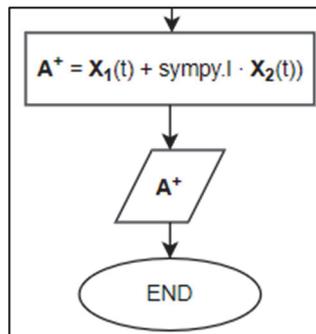
Քանի որ ընդհանուր դեպքում  $A_1(t)$  և  $A_2(t)$  մատրիցները կարող են ունենալ տարբեր քանակի դիսկրետներ, պետք է իրականացնել ինդեքսների ճշտում (եթե ինդեքսը մեծ է կամ հավասար մատրիցային դիսկրետների զանգվածի տարրերի քանակին, այսինքն՝ զանգվածում այդ ինդեքսով տարր գոյություն չունի, ապա այդ դիսկրետը փոխարինվում է զրոյական մատրիցով):

$X_1(K)$  և  $X_2(K)$  մատրիցային դիսկրետները հաշվելուց հետո (նկ. 6) արդեն հնարավոր է վերականգնել  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցները [1, բանաձև (17)]:



Նկ. 6.  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցների վերականգնման բլոկ-սխեման

Այսպիսով, ունենալով  $X_1(t)$  և  $X_2(t)$  մատրիցները (նկ. 7), կարելի է որոշել նաև  $A^+(t)_{n \times m}$  մատրիցը [1, բանաձև (5)]:



Նկ. 7.  $A^+(t)_{n \times m}$  մատրիցի որոշման բլոկ-սխեման

**Մոդելային օրինակ:** Ենթադրենք՝ տրված է հետևյալ մատրիցը.

$$A(t) = \begin{bmatrix} ((-1 + t) + j \cdot (1 + t^2)) & t^2 & (-5t + j \cdot (-2 + 3t)) \\ jt & ((1 + t) + 5j) & 2jt \end{bmatrix}.$$

Դիֆերենցիալ ձևափոխությունների համապատասխան և հաշվի առնելով, որ մակլորենյան մոտարկման կենտրոնի արժեքը  $t_\gamma = 0$ , ինչպես նաև ընտրելով մասշտաբային գործակցի  $H = 1$  արժեքը, թվա-անալիտիկ մեթոդի իրականացման արդյունքը ցույց է տրված նկ. 8-ում:

```

Enter mxn matrix sizes
m = 2
n = 3
Matrix sizes are: m = 2, n = 3
Enter elements of A(t) matrix:
-1+t+I*(1+t**2) t**2 -5*t+I*(-2+3*t)
I*t 1+t+5*I 2*I*t
A1(t) = Matrix([[t - 1, t**2, -5*t], [0, t + 1, 0]])
A2(t) = Matrix([[t**2 + 1, 0, 3*t - 2], [t, 5, 2*t]])
NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD
Enter scaling coefficient: H = 1
Enter approximation center's value: 0
X1(K) = [Matrix([
[-0.167, 0],
[ 0, 0.0385],
[ 0, 0]], Matrix([
[ 0.111, 0],
[0.0513, 0.0355],
[-0.611, 0]]), Matrix([
[ 1.1, 0.0385],
[ 0.24, -0.00421],
[-1.48, -0.0641]]), Matrix([
[ 2.07, 0.0953],
[ 0.278, 0.0142],
[-0.397, -0.0463]])]

```

```

X2(K) = [Matrix([
[-0.167, 0],
[ 0, -0.192],
[ 0.333, 0]], Matrix([
[ -0.5, 0],
[-0.0897, 0.0148],
[ 0.389, 0]]), Matrix([
[ -0.38, -0.0256],
[0.00263, 0.00626],
[ -0.722, -0.0128]]), Matrix([
[ 1.67, 0.049],
[0.468, 0.0123],
[-3.74, -0.144]])]
X1(t) = [Matrix([
[2.07*t**3 + 1.1*t**2 + 0.111*t - 0.167, 0.0953*t**3 + 0.0385*t**2],
[ 0.278*t**3 + 0.24*t**2 + 0.0513*t, 0.0142*t**3 - 0.00421*t**2 + 0.0355*t + 0.0385],
[ -0.397*t**3 - 1.48*t**2 - 0.611*t, -0.0463*t**3 - 0.0641*t**2]])]
X2(t) = [Matrix([
[ 1.67*t**3 - 0.38*t**2 - 0.5*t - 0.167, 0.049*t**3 - 0.0256*t**2],
[ 0.468*t**3 + 0.00263*t**2 - 0.0897*t, 0.0123*t**3 + 0.00626*t**2 + 0.0148*t - 0.192],
[-3.74*t**3 - 0.722*t**2 + 0.389*t + 0.333, -0.144*t**3 - 0.0128*t**2]])]
A*(t) = [Matrix([
[2.1*t**3 + 1.1*t**2 + 0.11*t + I*(1.7*t**3 - 0.38*t**2 - 0.5*t - 0.17) - 0.17, 0.095*t**3 + 0.038*t**2 + I*(0.049*t**3 - 0.026*t**2)],
[ 0.28*t**3 + 0.24*t**2 + 0.051*t + I*(0.47*t**3 + 0.0026*t**2 - 0.09*t), 0.014*t**3 - 0.0042*t**2 + 0.036*t + I*(0.012*t**3 + 0.0063*t**2 + 0.015*t - 0.19) + 0.038],
[ -0.4*t**3 - 1.5*t**2 - 0.61*t + I*(-3.7*t**3 - 0.72*t**2 + 0.39*t + 0.33), -0.046*t**3 - 0.064*t**2 + I*(-0.14*t**3 - 0.013*t**2)]])]

```

Նկ. 8. Թվա-անալիտիկ մեթոդի ծրագրային իրականացման արդյունքը դիտարկված օրինակի վրա

**Եզրակացություն:** Ներկայացվել է Մուր-Պենրոուզի կոմպլեքս միապարամետրական ընդհանրացված հակադարձ մատրիցների որոշման թվա-անալիտիկ հաշվողական եղանակի ծրագրային իրականացումը՝ տեղեկատվական տեխնոլոգիաների ժամանակակից միջոցներով: Անալիտիկ եղանակները հիմնվել են Մուր-Պենրոուզի 3-րդ պայմանի վրա: Թվա-անալիտիկ մեթոդները հիմնվել են ստացված անալիտիկ հարաբերակցությունների և Պուխովի դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա՝ որպես հիմնական մաթեմատիկական ապարատ: Հաշվարկման գործընթացը պարզ դարձնելու համար ներկայացվել են ալգորիթմների բոլոր սխեմաները, իսկ Python լեզվով գրված ծրագրային կոդերը տրամադրվել են որպես բաց կոդով GitHub հղում: Ալգորիթմների արդյունավետությունը փորձարկվել է մոդելային օրինակի վրա:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Simonyan S.H., Avetisyan A.G., Abgaryan H.S.** Definition of Complex One-Parameter Generalized Moore-Penrose Inverses Using Differential Transformations // Computational and Mathematical Methods. – 2025. - № 1. <https://doi.org/10.1155/cmm4/8895138>
2. **Симонян С.О.** Методы определения однопараметрических обобщенных обратных матриц: Монография.- LAP LAMBERT Academic Publishing RU, Saarbrücken, Deutschland, 2017. - 222 с.
3. HovhannesAbgaryan/MoorePenrose\_III: Software implementation of decomposition methods for determining complex 1-parameter generalized inverse Moore-Penrose matrices (III)
4. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц.- М.: Физматлит, 2010.- 560 с.
5. **Ланкастер П.** Теория матриц.- М.: Наука, 1978.- 280 с.
6. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений.- Киев: Наукова думка, 1984.-419 с.
7. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Прикладная теория дифференциальных преобразований: Монография.- Ереван: Изд-во ГИУА “Чартарагет”, 2010. – 361 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 24.02.2025:

**О.С. АБГАРЯН**

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ  
ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ МУРА-  
ПЕНРОУЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ (I)**

Представлена программная реализация численно-аналитического декомпозиционного метода определения комплексных однопараметрических обобщенных обратных матриц Мура-Пенроуза. Аналитические методы основаны на 3-ем условии Мура-Пенроуза. Численно-аналитические методы основаны на полученных аналитических соотношениях и дифференциальных преобразованиях Пухова. Вычислительные методы реализованы средствами современных информационных технологий, в частности языка программирования Python, библиотеками NumPy и SymPy. Программная реализация протестирована на модельном примере с прямоугольной матрицей.

**Ключевые слова:** комплексная однопараметрическая обобщенная обратная матрица Мура-Пенроуза, аналитическое решение, дифференциальные преобразования, численно-аналитическое решение, язык программирования Python, библиотека NumPy, библиотека SymPy.

**H.S. ABGARYAN**

**SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DETERMINING COMPLEX ONE-  
PARAMETER GENERALIZED INVERSE MOORE-PENROSE MATRICES  
USING DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS (I)**

Software implementation of numerical-analytical decomposition methods for determining complex one-parameter generalized inverse Moore-Penrose matrices are presented. Analytical methods are based on the 3<sup>rd</sup> Moore-Penrose condition. Numerical-analytical methods are based on the obtained analytical relations and differential Pukhov transformations. Computational methods are implemented using modern information technologies, in particular Python programming language, NumPy and SymPy libraries. The software implementation is tested on a model example with a rectangular matrix.

**Keywords:** complex one-parameter generalized inverse Moore-Penrose matrix, analytical solution, differential transformations, numerical-analytical solution, Python programming language, NumPy library, SymPy library.

**ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ**

**ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ԱՎԱԳՅԱՆ Հ.Վ., ԱՂԱՄՅԱՆ Տ.Ս.**

ՊՂՆՁԻ ՕՔՍԻԴԱՅԱԾ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԵՐԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑԻՑ ՊՂՆՁԻ ԿՈՐԶՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ՝ ՍՈՒԼՖԻԴԱՅՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ..... 395

**ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ Ս.Գ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Ն.Վ., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Օ.Գ.**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԸՆԴԵՐՔՈՒՄ ԱԾԽԱԲԵՐ ԱՌԱՋԱՅՈՒՄՆԵՐԻ ՀՐԱՔԱՅՔԱՅՈՒՄՈՎ ՍՏԱՑՎԱԾ՝ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ԿԱՐԲԻԴ ԵՎ ԱԾԽԱԾՆԱՅԻՆ ՏԱՐՐԵՐԻ ՀԻՄՔՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԲԱՂԱԴՐԱՆՅՈՒԹԵՐ..... 415

**ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Կ.Վ.**

ԳԵՏԱՅԻՆ ՏԻՊԻ ՊՈՉԱՄԲԱՐՆԵՐԻՑ ՊՈՉԱՅԻՆ ՆՍՏՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԵՌԱՅՄԱՆ ՆՈՐ ՍԱՐՔԻ ՆԵՐԴՐՄԱՆ ՏԵԽՆԻԿԱ-ՏՆՏԵՄԱԿԱՆ ԳՆԱՀԱՏԱԿԱՆԸ..... 426

**ՄԱԻԼՅԱՆ Լ.Ս.**

ՓՈՔՐ ՀԶՈՐՈՒԹՅԱՄԲ ԶԱՌԻԹԱՓ ՀԱՆՔԵՐԱԿՆԵՐԻ ՍՏՈՐԳԵՏՆՅԱ ՄՇԱԿՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՆ ԱՐՏԱՍԱՀՄԱՆՅԱՆ ՓՈՐՁԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ..... 438

**ՌԵՎԱԶՅԱՆ Դ.Վ.**

ԻՆՏԵԳՐՎԱԾ ՇՂԹԱՅԻ ԲԱՂԱԴՐԻՉՆԵՐԻ ՏԵՂԱԴՐՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼԱՅՄԱՆ ՀԱՄԱՐ ՄԱՍՆԱԳԻՏԱՑՎԱԾ ՊՈՊՈՒԼՅԱՅԻՆՆԵՐԻ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ԳԵՆԵՏԻԿԱԿԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄՈՒՄ..... 450

**ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ Լ.Կ.**

GaN HEMT ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐՆԵՐՈՎ ՄԻԿՐՈԱԼԻՔԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԻԿՍԿԱՆԵՐԻ ՆԱԽԱԳԾՄԱՆ ԱՌԿԱ ՎԻՃԱԿԸ ԵՎ ՀԻՄՆԱՀԱՐՑԵՐԸ..... 459

**ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Դ.Ս.**

BiFe<sub>0.7</sub>Mn<sub>0.3</sub>O<sub>3</sub> ՆԱՆՈԹԱՂԱՆԹՆԵՐԻ ՍՏԱՅՈՒՄԸ ԵՎ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ..... 473

**ՀԱԿՈՔՅԱՆ Լ.Դ.**

ՏԱԿՏԱՎՈՐՄԱՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՑԻՎԼԻ ՀԱՄԱՄԱՍՆՈՒԹՅԱՆ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱԼԻԲՐԱՅՄԱՆ ՄԵԹՈԴ ԱՐԱԳԱԳՈՐԾ ՀԱՂՈՐԴԻՉ ՀԱՆԳՈՒՅՑՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ..... 482

**ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ս.Ա.**

ԱՆԸՆԴՀԱՏ ԳԾԱՅԻՆ ՀԱՄԱՀԱՐԹԵՅՄԱՆ ՀԱՆԳՈՒՅՑՈՒՄ ԳԾԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ԼԱՎԱՅՄԱՆ ՄԵԹՈԴ..... 491

**ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Խ.**

ԱՐԱԳԱԳՈՐԾ SERDES ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ ՏՎՅԱԼՆԵՐԻ ԵՎ ՏԱԿՏԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՎԵՐԱԿԱՆԳՆՄԱՆ ՇՂԹԱՅԻ ՀԱՊԱՂՄԱՆ ԲԱՐԵԼԱՎՄԱՆ ՄԵԹՈԴ..... 502

**ՊՈՂՈՍՅԱՆ Վ.Ս.**

Ինքնագազարկաբերական գրիտիպագրականության ծանցանցին մոդելներ ու  
լրիվ հեռանկարային ծրագրերի ստեղծումը՝ գերադասելի  
ԱԹՍ-ները երևալի չստացանքներով..... 509

**ԱԲԳԱՐՅԱՆ Հ.Ս.**

Մոնիթորինգի զուգակցված մեթոդաբանական ընդհանրացված  
չպարզաբան ժամանակների ուղղորդված ծրագրային հրատարակումով  
Դեֆերենցիալ զեպաֆոնոթեոնոլոգիայի գերադասում (I)..... 520

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>АГБАЛЯН С.Г., АВАГЯН А.В., АГАМЯН Т.С.</b> ОКИСЛЕННЫЕ МЕДНЫЕ РУДЫ И ОСОБЕННОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИЗ НИХ МЕДИ МЕТОДАМИ СУЛЬФИДАЦИИ .....	395
<b>АЙРАПЕТЯН С.Г., МАРТИРОСЯН Н.В., ГЕВОРГЯН О.Г.</b> ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ И УГЛЕРОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПИРОЛИЗОМ УГЛИСТЫХ ОБРАЗОВАНИЙ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ .....	415
<b>АРУТЮНЯН К.В.</b> ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВНЕДРЕНИЯ НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ХВОСТОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ИЗ ХВОСТОХРАНИЛИЩ РЕЧНОГО ТИПА .....	426
<b>МАИЛЯН Л.С.</b> АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ КРУТОПАДАЮЩИХ МАЛОМОЩНЫХ ЖИЛ .....	438
<b>РЕВАЗЯН Д.В.</b> ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ В ГЕНЕТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ .....	450
<b>КАРАПЕТЯН Л.К.</b> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ТРАНЗИСТОРАМИ GaN HEMT .....	459
<b>МАРТИРОСЯН Д.С.</b> ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОПЛЕНОК $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ .....	473
<b>АКОПЯН Л.Д.</b> МЕТОД КАЛИБРОВКИ КОРРЕКЦИИ ДИСБАЛАНСА ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ ТАКТОВОГО СИГНАЛА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ .....	482
<b>ХАЧАТРЯН С.А.</b> МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЛИНЕЙНОСТИ В ЛИНЕЙНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ВРЕМЕНИ .....	491
<b>ГЕВОРГЯН А.Х.</b> МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ ДЛЯ КОНТУРА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТАКТОВЫХ ДАННЫХ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ SERDES СИСТЕМАХ .....	502
<b>ПОГОСЯН В.С.</b> РЕШЕТОЧНЫЕ МОДЕЛИ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КРИТИЧНОСТИ И СХЕМЫ ПОЛНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ: ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ РОЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....	509
<b>АБГАРЯН О.С.</b> ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБОБЩЕННЫХ ОБРАТНЫХ МАТРИЦ МУРА- ПЕНРОУЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ (I) .....	520

## CONTENTS

<b>AGHBALYAN S.G., AVAGYAN H.V., AGHAMYAN T.S.</b>	
OXIDIZED COPPER ORES AND PECULIARITIES OF COPPER EXTRACTION FROM THEM THROUGH SULFIDATION METHODS .....	395
<b>HAYRAPETYAN S.G., MARTIROSYAN N.V., GEVORGYAN O.G.</b>	
ELECTROMAGNETIC MATERIALS BASED ON SILICON CARBIDE AND CARBON ELEMENTS OBTAINED BY PYROLYSIS OF CARBON FORMATIONS OF REPUBLIC OF ARMENIA.....	415
<b>HARUTYUNYAN K.V.</b>	
TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE IMPLEMENTATION OF A NEW DEVICE FOR REMOVING TAILINGS FROM RIVER-TYPE TAILING DAMS....	426
<b>MAYILYAN L.S.</b>	
ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE IN USING UNDERGROUND SYSTEMS FOR MINING STEEPLY DIPPING LOW-THICKNESS VEINS .....	438
<b>REVAZYAN D.V.</b>	
APPLICATION OF SPECIALIZED POPULATIONS IN A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PLACEMENT OF INTEGRATED CIRCUIT COMPONENTS ..	450
<b>KARAPETIAN L.K.</b>	
CURRENT STATUS AND FUNDAMENTALS OF MICROWAVE INTEGRATED CIRCUIT DESIGN WITH GaN HEMT TRANSISTORS .....	459
<b>MARTIROSYAN D.S.</b>	
OBTAINING AND STUDYING PROPERTIES OF $\text{BiFe}_{0.7}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_3$ THIN FILMS .....	473
<b>HAKOBYAN L.D.</b>	
THE CLOCK DUTY-CYCLE CORRECTION CALBRATION METHOD FOR HIGH- SPEED TRANSMITTERS .....	482
<b>KHACHATRYAN S.A.</b>	
THE LINEARITY IMPROVEMENT METHOD IN CONTINUOUS TIME LINEAR EQUALIZERS .....	491
<b>GEVORGYAN A.Kh.</b>	
THE LATENCY IMPROVEMENT METHOD FOR HIGH-SPEED SERDES CLOCK- DATA RECOVERY LOOP.....	502
<b>POGHOSYAN V.S.</b>	
LATTICE MODELS OF SELF-ORGANIZED CRITICALITY AND FULL INFORMATION DISSEMINATION SCHEMES: APPLICATIONS IN UAV SWARM SYSTEMS .....	509
<b>ABGARYAN H.S.</b>	
SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DETERMINING COMPLEX ONE- PARAMETER GENERALIZED INVERSE MOORE-PENROSE MATRICES USING DIFFERENTIAL TRANSFORMATIONS (I).....	520

## ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

- 1 Արգարյան Հովհաննես Սամվելի Ասպիրանտ, ՀԱՊՀ Տեղեկատվական տեխնոլոգիաների և ավտոմատացման ամբիոն  
**Էլ. հասցե** - abgaryanhov@gmail.com
- 2 Աղամյան Տիմեյա Սամվելի տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ Կապանի մասնաճյուղ, Հանքարդյունաբերության ամբիոն  
**Էլ. հասցե** - timeya.aghamyant@mail.ru
- 3 Աղբալյան Սուրեն Գևորգի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն  
**Էլ. հասցե** - metalsur@polytechnic.am
- 4 Ավագյան Համիկ Վարդանի ասիստենտ, ՀԱՊՀ Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն  
**Էլ. հասցե** - halidzor@yandex.ru
- 5 Գևորգյան Ալբերտ Խաչիկի Մագիստրանտ, ՀԱՊՀ «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ Անալոգային նախագծման ավագ ճարտարագետ  
**Էլ. հասցե** - galbert@synopsys.com
- 6 Գևորգյան Օլեգ Գուրգենի տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ «Միկրո- և նանոէլեկտրոնիկա» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայի ավագ ճարտարագետ  
**Էլ. հասցե** - Gevorgyan @ inbox. Ru
- 7 Խաչատրյան Սարգիս Ավետիսի ասպիրանտ, «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ  
**Էլ. հասցե** - khachatryansargis.a@gmail.com
- 8 Կարապետյան Լավրենտի Կարենի ասպիրանտ, ԵՊՀ ֆիզիկայի ինստիտուտ, «Մինոփսիս Արմենիա» ընկերության ավագ ինժեներ  
**Էլ. հասցե** - lavrentkarapetyan@gmail.com
- 9 Հակոբյան Լյուդվիգ Դավթի մագիստրանտ, «Մինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ Անալոգային նախագծման ավագ վերահսկիչ  
**Էլ. հասցե** - lyudvig@synopsys.com
- 10 Հայրապետյան Մերոբ Գառնիկի տ.գ.թ., ՀԱՊՀ «Միկրո- և նանոէլեկտրոնիկա» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայի գիտաշխատող  
**Էլ. հասցե** - sergar55@ mail.ru
- 11 Հարությունյան Կարեն Վալերիկի հայցորդ ՀԱՊՀ Լեռնային գործի և շրջակա միջավայրի պահպանության ամբիոն, «Զանգեզուրի պղնձամոլիբդենային կոմբինատ» ՓԲԸ, Կապիտալ ներդրումների կառավարման գծով մենեջեր  
**Էլ. հասցե** - harutyunyan.karen.v@gmail.com

- 12 Մաիլյան Լևոն Սամվելի** հայցորդ ՀԱՊՀ  
**Էլ. հասցե** - L.S.MAYILYAN@yandex.ru
- 13 Մարտիրոսյան Դավիթ Սամվելի** հայցորդ ՀԱՊՀ Էլեկտրոնիկայի,  
կենսաբժշկական և չափիչ համակարգերի  
ամբիոն  
**Էլ. հասցե** - david.martirosyan.99@gmail.com
- 14 Մարտիրոսյան Նորայր Վիլյամսի** տ.գ.թ, դոցենտ, ՀԱՊՀ «Միկրո- և  
նանոէլեկտրոնիկա» բազային  
գիտահետազոտական լաբորատորիայի  
ղեկավար  
**Էլ. հասցե** - marnorw@yahoo.com
- 15 Պողոսյան Վահագն** Ֆ.-մ.գ.թ., ՀՀ ԳԱԱ Բնֆորմատիկայի և  
ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտ  
**Էլ. հասցե** - povahagn@gmail.com
- 16 Ռևազյան Դավիթ Վարդանի** տ.գ.թ., Հ Ա Պ Հ Տեղեկատվական  
տեխնոլոգիաների և ավտոմատացման ամբիոն,  
«Ըլայն Թեքնոլոջի» ընկերության ավագ  
ճարտարագետ  
**Էլ. հասցե** - david.revazyan16@gmail.com

## СПИСОК АВТОРОВ

- 1 Абгарян Оганнес Самвелович** Аспирант кафедры Информационных технологий и автоматизации, НПУА,  
Эл. почта - abgaryanhov@gmail.com
- 2 Авагян Асмик Вардановна** ассистент, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,  
Эл. почта - halidzor@yandex.ru
- 3 Агамян Тимея Самвеловна** к.т.н., доцент, кафедра Горной промышленности, Капанский филиал НПУА,  
Эл. почта - timeya.aghamyam@mail.ru
- 4 Агбалян Сурен Геворкович** д.т.н., профессор, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,  
Эл. почта - metalsur@polytechnic.am
- 5 Айрапетян Сероб Гарникович** к.т.н., научный сотрудник базовой научно-исследовательской лаборатории «Микро- и наноэлектроники», НПУА,  
Эл. почта - sergar55@mail.ru
- 6 Акопян Людвиг Давидович** Магистрант, НПУА; старший руководитель аналогового проектирования, ЗАО "Синописис Армения",  
Эл. почта - lyudvig@synopsys.com
- 7 Арутюнян Карен Валерикович** Соискатель, "Кафедра горного дела и охраны окружающей среды", НПУА; менеджер по управлению капитальными инвестициями, ЗАО "Зангезурский медно-молибденовый комбинат",  
Эл. почта - harutyunyan.karen.v@gmail.com
- 8 Геворгян Альберт Хачикович** Магистрант, НПУА; Старший инженер аналогового проектирования, ЗАО "Синописис Армения",  
Эл. почта - galbert@synopsys.com
- 9 Геворгян Олег Гургенович** к.т.н., доцент, старший инженер базовой научно-исследовательской лаборатории «Микро- и наноэлектроники», НПУА,  
Эл. почта - Gevorgyan @ inbox. Ru
- 10 Карапетян Лаврентий Каренович** аспирант, Институт физики ЕГУ, старший инженер ЗАО "Синописис Армения",  
Эл. почта - lavrentkarapetyan@gmail.com
- 11 Маилян Левон Самвелович** Соискатель, НПУА,  
Эл. почта - L.S.MAYILYAN@yandex.ru

- 12 Мартиросян Давид Самвелович** соискатель 3 курса кафедры Электроники, биомедицинских и измерительных систем НПУА,  
**Эл. почта** - david.martirosyan.99@gmail.com
- 13 Мартиросян Норайр Вильямсович** к.т.н., доцент, руководитель базовой научно-исследовательской лаборатории "Микро- и наноэлектроники", НПУА,  
**Эл. почта** - marnorw@yahoo.com
- 14 Погосян Ваагн** к.ф.м.н., Институт проблем информатики и автоматизации НАН РА,  
**Эл. почта** - povahagn@gmail.com
- 15 Ревазян Давид Варданович** к.т.н., кафедра информационных технологий и автоматизации, НПУА, Специализация: E13.02 – системы автоматизации; старший инженер компании "Элайн Текнолоджи",  
**Эл. почта** - david.revazyan16@gmail.com
- 16 Хачатрян Саргис Аветисович** аспирант, ЗАО "Синописис Армения",  
**Эл. почта** - khachatryansargis.a@gmail.com

## LIST OF THE AUTHORS

- 1. Abgaryan Hovhannes Samvel** Post-graduate student of the Chair “Information Technologies and Automation”, NPUA  
**E-mail** - abgaryanhov@gmail.com
- 2. Aghamyan Timeya Samvel** Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., NPUA, Kapan branch, Chair of Mining Industry  
**E-mail** - timeya.aghamyan@mail.ru
- 3. Aghbalyan Suren Geworg** Dr. of tech. sci., Prof. of the Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA  
**E-mail** - metalsur@polytechnic.am
- 4. Avagyan Hasmik Vardan** Assistant of the Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA  
**E-mail** - halidzor@yandex.ru
- 5. Gevorgyan Albert Khachik** Graduate student, Senior AMS design engineer, “Synopsys Armenia” CJSC, NPUA  
**E-mail** - galbert@synopsys.com
- 6. Gevorgyan Oleg Gurgen** Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., Senior engineer of “Micro and Nanoelectronics” laboratory, NPUA  
**E-mail** - Gevorgyan@inbox. Ru
- 7. Hakobyan David Lyudvig** Graduate student, Analog Design, Sr Supervisor, Synopsys Armenia CJCS, NPUA  
**E-mail** - lyudvig@synopsys.com
- 8. Harutyunyan Karen Valerik** Probationer, “Chair of Mining Nature Protection, Institute of Mining and Metallurgy”, NPUA, Capital Investment Manager “Zangezour copper molybdenum combine” CJSC  
**E-mail** - harutyunyan.karen.v@gmail.com
- 9. Hayrapetyan Serob Garnik** Cand. of tech. sci., SW of the “Micro and Nanoelectronics” scientific laboratory, NPUA  
**E-mail** - sergar55@mail.ru
- 10. Karapetyan Lavrentii Karen** Post-graduate student at the Institute of Physics, YSU, R&D Engineering, Sr Engineer of the "Synopsys Armenia" CJSC  
**E-mail** - lavrentkarapetyan@gmail.com
- 11. Khachatryan Sargis Avetis** Post-graduate student, "Synopsys Armenia" CJSC  
**E-mail** - khachatryansargis.a@gmail.com
- 12. Mailyan Levon Samvel** Probationer at NPUA  
**E-mail** - L.S.MAYILYAN@yandex.ru
- 13. Martirosyan Davit Samvel** 3rd year probationer of the Chair "Electronics, Biomedical and Measuring Systems", NPUA  
**E-mail** - david.martirosyan.99@gmail.com

- 14. Martirosyan Norayr Wilyams** Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., Head of the «Micro and Nanoelectronics» laboratory, NPUA  
**E-mail - marnorw@yahoo.com**
- 15. Poghosyan Vahagn** Cand. of Phys-math sci., Institute of Informatics and Automation NAS, RA  
**E-mail - povahagn@gmail.com**
- 16. Revazyan Davit Vardan** Cand. of tech. sci., of the Chair “Information Technologies and Automation”, NPUA, Specialization: E13.02 – Automation Systems. Senior Engineer at “Align Technology” company  
**E-mail - david.revazyan16@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 equipment, 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-4,75սմ, Left-6,2սմ, Right-1,8սմ, Footer-4,5սմ, միջտողային տարածությունը (Line spacing)՝ 1,15, պարբերությունը (First line)՝ 1 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, ՄԸԿ, ՍԸԸ), 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 հասկանումը, հրատարակման տարեթիվը, հատորի ու թողարկման համարները, հերթական համարը, նյութի զետեղման 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 – 4,75cm, Left – 6,2cm, Right – 1,8cm, Footer – 4,5cm, межстрочный интервал (Line spacing) – 1,15, красная строка (First line) – 1cm. 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 – 4.75 cm, Left – 6.2 cm, Right – 1.8 cm, Footer – 4.5 cm, Line-spacing – 1.15 cm, the first line – 1 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, УДК, 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).

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

2024

4

ՀԱՏՈՐ

ТОМ 77

VOLUME

ՀՈԿՏԵՄԲԵՐ - ԴԵԿՏԵՄԲԵՐ

ОКТАБРЬ - ДЕКАБРЬ

OCTOBER - DECEMBER

Հրատ. Խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

ԺԱՆՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 24.11.2025

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

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 9.5 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 317: Տպաքանակ՝ 150

Հայաստանի Ազգային

Պոլիտեխնիկական

Համալսարանի

«Պոլիտեխնիկ»

տպագրահրա-

տարակչություն

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](mailto:polytechpolygraph@gmail.com)