

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԵՎ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵԴԵԿԱԳԻՐ ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И

НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ԵՐԵՎԱՆ

ЕРЕВАН

DOI 10.53297/0002306X

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 74

N 4

ՀՈԿՏԵՄԲԵՐ - ԴԵԿՏԵՄԲԵՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2021

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 74

N 4

ОКТАБРЬ - ДЕКАБРЬ

ЕРЕВАН 2021

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 74

N 4

OCTOBER - DECEMBER

YEREVAN 2021

377

Журнал издается с 5.01.1948 г.

Выходит 4 раза в год

ԽՄԲԱԳՐԱԿԱՆ ԿՈԼԵԳԻԱ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Ответственный секретарь Сейранян Ж.С., Армения

Редколлегия:

Агбалян С.Г., д.т.н., проф., Армения

Акопян В.Н., д.ф.-м.н., Армения

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

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

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

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

Бадалян Н.П., д.т.н., проф., Россия

Воробьев А.Е., д.т.н., проф., Россия

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

Гонейма М., к.т.н., Египет

Гримблат В., к.т.н., Чили

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

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

Зорян Е., к.т.н., США

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

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

Куртуа Б., к.т.н., Франция

Лан Ч., к.т.н., Китай

Мандалика С., к.т.н., Индия

Марухян В.З., к.т.н., проф., Армения

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

Петросян О.А., д.т.н., проф., Армения

Петросянц К.О., д.т.н., проф., Россия

Сапатнекар С., к.т.н., США

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

Сбитнев С.А., д.т.н., проф., Россия

Симонян С.О., д.т.н., проф., Армения

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

Тихомиров Г.В., д.ф.-м.н., Россия

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

Усанов В.И., д.т.н., проф., Россия

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

Цанова С., к.т.н., Болгария

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

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

Шлихтманн У., к.т.н., Германия

EDITORIAL BOARD

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

Հրատ. խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

Ժ.Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2021

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Ա.Մ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ, Գ.Ա. ՎԱՍԻԼՅԱՆ, Տ.Ն. ՍԱՖԱՐՅԱՆ,
Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Տ.Ա. ԴԵՄԻՐՉՅԱՆ

**Al-Cu-Fe-Si ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ԴԵՖՈՐՄԱՑՎՈՂ
ՀԱՄԱՁՈՒԼ ՎԱԾՔՆԵՐԻ ՁՈՒԼՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ընտրվել և հիմնավորվել է A5E մակնիշի ալյումինային համաձուլվածքը՝ որպես բարձրամուր ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքների մայրակի նյութ, որպես լեգիրող տարր՝ M0 և M1 մակնիշի պղինձը: Կատարված համալիր հետազոտությունների արդյունքում մշակվել է Al-Cu-Fe-Si համակարգի ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքների ձուլման տեխնոլոգիա, ընտրվել և հիմնավորվել են 5,7...6,5% պղինձ պարունակող ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքի ձուլման լավարկված ռեժիմները, համաձայն որոնց հալույթի լցման ջերմաստիճանը պետք է լինի $730 \pm 10^\circ\text{C}$ միջակայքում, ձուլաձևի ջերմաստիճանը՝ $120 \pm 10^\circ\text{C}$, որի դեպքում հեղուկահոսունությունը ստացվում է 430 մմ, գծային կծկվածքը՝ 1,6...1,65%, HB=1230...1250 ՄՊա, $\sigma_d=415...420$ ՄՆ/մ², $\delta=6...7\%$:

Ցույց է տրված, որ ալյումինային համաձուլվածքների ձուլային հատկությունները, ինչպիսիք են հեղուկահոսունությունը, գծային կծկվածքը և լիկվացիան, խիստ կերպով կախված են համաձուլվածքի քիմիական բաղադրությունից, կառուցվածքից, լիկվիդուսի և սոլիդուսի ջերմաստիճաններից, ջերմունակությունից, ջերմահաղորդականությունից և այլ պայմաններից:

Առանցքային բառեր. ալյումինային համաձուլվածք, կոմպոզիտային նյութ, մայրակ, լեգիրում, հալույթ, ձուլում, հեղուկահոսունություն, գծային կծկվածք, լիկվացիա, ջերմամշակում, տեսակարար ամրություն:

Ներածություն. Ժամանակակից տեխնիկայում լայն կիրառություն են գտել բարձր տեսակարար ամրությամբ բորալյումինային, ալյումին-ածխածնային, ալյումին-սիլիցիումային, ալյումին-նիկլային, ալյումին-մագնեզիումային, պղինձ-ալյումինային, ալյումին-մանգանային և դեֆորմացվող այլ համաձուլվածքներ: Ֆունկցիոնալ հատկություններով օժտված ալյումինային համաձուլվածքների ստացման նպատակով ալյումինը լեգիրում են նաև այլ մետաղներով, ինչպիսիք են՝ Fe, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Pb, Li, Ca, Sr, Ce, Th: Սակայն այս մետաղները պարբերական համակարգում գտնվում են ալյումինից հեռու և ունեն ալյումինից խիստ տարբերվող էլեկտրոնային կառուցվածք: Այդ իսկ պատճառով ոչ մի տարր ալյումինի հետ պինդ վիճակում չի դրսևորում անսահմանափակ լուծվելիություն [1-3]: Առավել ցայտուն լուծվելիության մեծացման միտում դիտվում է այն տարրերի դեպքում, որոնք պարբերական համակարգում գտնվում են ալյումինի մոտ [3]:

Որպես լեգիրող տարրեր ավելի շատ կիրառում են պոլինձը, մանգանը, մագնեզիումը, ցինկը, սիլիցիումը, վերջին ժամանակներս՝ նաև լիթիումը, սակայն սահմանափակ քանակներով: [4, 5] աշխատանքներից հայտնի է, որ տիտանը, բորը և ցիրկոնիումը մանրացնում են ալյումինային համաձուլվածքների հատիկը, այն դարձնելով մանրահատիկ, մեծացնելով մեխանիկական հատկությունները, հատկապես ամրությունը:

Ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքները, ի տարբերություն ձուլման համաձուլվածքների, լավ են մշակվում մամլմամբ, գլոցմամբ, դրոշմամբ և այլն: Դեֆորմացված և չդեֆորմացված վիճակում $\Delta 1$, $\Delta 6$, $\Delta 16$, AK6, AK8, B95, B Δ 17, $\Delta 19$, $\Delta 20$, $\Delta 21$ և այլ մակնիշների համաձուլվածքներն ունեն բարձր մեխանիկական հատկություններ [6]: Ուստի այդ համաձուլվածքներից պատրաստված թերթերը, ձողերը, զանազան պրոֆիլները և դրոշմվածքները լայնորեն կիրառվում են տնտեսության տարբեր բնագավառներում:

Մինչև 20-րդ դարի կեսերը մեծ կիրառություն էին գտել Al-Cu-Mg-Mn համակարգի համաձուլվածքները, այնուհետև սկսեցին օգտագործել նաև Al-Mg-Mn, Al-Mg-Si, Al-Mg-Si-Cu, Al-Zn-Mg-Cu և այլ համակարգերի համաձուլվածքներ [7]: Բարձրամուր ալյումինային դեֆորմացվող բոլոր համաձուլվածքներն ունեն ցածր կոռոզիակայնություն, այդ պատճառով դյուրալյումիններից պատրաստված թերթերը հաճախ պատում են մաքուր ալյումինի շերտով:

Ըստ ֆիզիկաքիմիական և տեխնոլոգիական հատկությունների՝ ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքները բաժանվում են հետևյալ խմբերի [8].

1. Ցածր լեգիրված և ջերմամշակմամբ չամրացվող համաձուլվածքներ, օրինակ՝ AMu, AMr և այլն:

2. Al-Cu-Mg-Mn համակարգի համաձուլվածքներ, որոնք անվանվում են դյուրալյումիններ, օրինակ՝ $\Delta 1$, $\Delta 6$, $\Delta 16$, B Δ 17 և այլն:

3. Al-Mg-Si, Al-Mg-Si-Cu համակարգերի համաձուլվածքներ, օրինակ՝ AB, AK6, AK8 և այլն:

4. Al-Cu-Mg-Fe-Ni համակարգի համաձուլվածքներ, օրինակ՝ AK2, AK4, AK4-1 և այլն:

5. Al-Cu-Mn համակարգի համաձուլվածքներ, օրինակ՝ $\Delta 20$, $\Delta 21$ և այլն:

6. Al-Zn-Mg-Cu համակարգի համաձուլվածքներ, օրինակ՝ B95, B95-1, B94, B96 և այլն:

Դյուրալյումիններն օժտված են ամրության և տեխնոլոգիական հատկությունների լավ հարաբերակցությամբ և օգտագործվում են միաված ու ծեղացված վիճակում, իսկ Al-Mg-Si և Al-Mg-Si-Cu համակարգերի համաձուլվածքները՝ բարձր տեխնոլոգիական հատկություններով, և նրանցից անընդհատ ձուլմամբ ստացված ձուլուկները լավ կոելի են: Այս համաձուլվածքները մեծ կիրառություն են

ստացել արդի տեխնիկայում, իսկ արտադրատեսակները միումից հետո ենթարկում են ինչպես բնական, այնպես էլ արհեստական ծերացման:

Al-Cu-Mg-Fe-Ni համակարգի համաձուլվածքներն ունեն լավ կռելիություն, և նրանցից պատրաստվում են բարդ երկրաչափական ձև ունեցող կոմպոնենտներ ու դրոշմվածքներ, որոնք ունակ են աշխատելու բարձր ջերմաստիճաններում, մինչդեռ Al-Cu-Mn համակարգի համաձուլվածքներն առանձնանում են հրամրությամբ և ունեն բարձր տեխնոլոգիական հատկություններ, բայց ցածր կոռոզիակայունություն: Al-Zn-Mg-Cu խմբի համաձուլվածքներն օժտված են առավել բարձր ամրությամբ սենյակային ջերմաստիճաններում, սակայն ունեն հակվածություն կոռոզիայի նկատմամբ [9]:

Խնայողի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Աշխատանքի նպատակն է մշակել Al-Cu-Fe-Si համակարգի ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքների ձուլման տեխնոլոգիա և հիմնավորել լավարկված ռեժիմները:

Ալյումինային դեֆորմացվող համաձուլվածքները կիրառվում են պինդֆազային մեթոդներով կոմպոզիտային նյութերի ստացման համար: Այս համաձուլվածքների մեծ մասն օժտված է ցածր խտությամբ, բարձր ջերմա- և էլեկտահադրդականությամբ, լավ կոռոզիակայունությամբ, բարձր տեխնոլոգիական պլաստիկությամբ:

Ձուլման ալյումինային համաձուլվածքները կիրառում են հեղուկֆազային մեթոդներով կոմպոզիտային նյութերի ստացման համար: Այս համաձուլվածքներն օժտված են բարձր հեղուկահոսունությամբ, ոչ մեծ զծային կծկվածքով, ճաքագոյացման նկատմամբ ցածր հակվածությամբ: Առավել հաճախ կիրառվում են Al-Cu, Al-Si, Al-Mg համակարգի համաձուլվածքները:

Տեխնիկական մաքրությամբ ալյումինային համաձուլվածքները հաճախ կիրառում են ինչպես հեղուկ, այնպես էլ պինդֆազային մեթոդներով կոմպոզիտային նյութերի ստացման համար:

Նշված կոմպոզիտային նյութը նպատակահարմար է ստանալ հեղուկֆազային (ձուլման) եղանակով: Հալույթի ստացման համար բովախառնուրդային նյութերը բեռնավորվել են հալքանոթում հետևյալ հաջորդականությամբ. առաջին հերթին ներմուծվել է ալյումինային ջարդոնը, հալույթը գերտաքացվել է մինչև 760°C , և ներմուծվել է պղինձը: Բովախառնուրդային նյութերը չպետք է պարունակեն խոնավություն, խառնուրդներ, տարբեր տեսակի քսուքներ:

Հալույթի մակերևութին գոյացող օքսիդային թաղանթը պաշտպանում է մետաղը հետագա օքսիդացումից: Այդուհանդերձ, անհրաժեշտ է կիրառել ծածկութային ֆլյուսներ՝ խառնուկային տարրերի օքսիդների հեռացման և խարամից մետաղի վերականգնման նպատակով: Որպես ծածկութային ֆլյուս օգտագործվել է հետևյալ բաղադրությամբ ֆլյուսը՝ 45 % NaCl+55 % KCl:

Ջրածինը գազերից միակն է, որն օժտված է բավականաչափ բարձր լուծվելիությամբ ալյումինում: Նախապատրաստվածքներում այն կարող է առաջացնել փքվածքներ և ապաշերտավորումներ ճնշմամբ մշակման տարբեր գործընթացներում: Ջրածնով հագեցման պատճառը հալույթի փոխազդեցությունն է խոնավության հետ: Խոնավության աղբյուրներն են. մթնոլորտային օդը, որը ձմռանը և ամռանը համապատասխանաբար պարունակում է 2...4,5-ից մինչև 18,5...23 g/m^3 խոնավություն, բովախառնուրդային նյութերի մակերևույթին ադսորբված խոնավությունը, քսանյութերի մնացորդները, հալման ագրեգատի միջոցով ադսորբված խոնավությունը, պինդ ֆյուսներից ադսորբցված կամ քիմիապես կապված խոնավությունը և այլն: Ուստի գազապարունակության նվազեցման նպատակով անհրաժեշտ է խուսափել հալույթի գերտաքացումից, տարբեր տեսակի յուղերի և քսուքներ պարունակող մետաղաջարդոնի օգտագործումից: Անհրաժեշտ է նախօրոք տաքացնել բովախառնուրդը և այլն:

Գազագերծման նպատակով հալույթը մշակվում է քլորով, ազոտով, արգոնով և այլ իներտ գազերով կամ տարբեր ֆյուսներով: Հալույթի մաքրումը ոչ մետաղական ներմուծանքներից, մասնավորապես օքսիդային թաղանթներից, իրականացվում է հալույթի ռաֆինացմամբ գազերով, պինդ և հեղուկ ֆյուսներով, ինչպես նաև ֆիլտրումով:

Հալման գործընթացն իրականացվել է CIIIOL-1.1.6/12ե մակնիշի էլեկտրադիմադրության վառարանում: Ջերմաստիճանի չափումն իրականացվել է «CIIIOL-1.1.6/12» քրոմել-ալյումելային ջերմագույգի և KCI-3 պոտենցիալի միջոցով:

Հեղուկահոսունությունը որոշվել է հայտնի եղանակով՝ պարույրի տեսք ունեցող ձուլվածքային խոռչի մեջ հեղուկ մետաղի լցմամբ: Փորձարկումների համար պատրաստվել է մետաղական ձև, որը բաղկացած է երեք կիսաձևերից: Կիսաձևերը հավաքելուց հետո ձուլվածքը տեղադրվել է խիստ հորիզոնական դիրքով, և կատարվել է մետաղի լցում: Պարուրաձև խոռչում նախատեսված են ելուստներ իրարից 50 mm հեռավորությամբ, որոնցով որոշվել է պարույրի լցված մասի երկարությունը: Ձուլվածքի պարուրաձև խոռչն ունի սեղանաձև կտրվածք՝ 0,56 mm^2 մակերեսով: Ձուլվածքի խոռչը լցվել է երկու փուլով՝ հալույթի ջերմաստիճանից մինչև բյուրեղացման սկիզբը և նրանից մինչև հեղուկի հոսքի դադարեցումը [10]: Դա, այսպես կոչված, գրոյական հեղուկահոսունությունն է, որը տեղի է ունենում շնորհիվ հեղուկում բավարար քանակությամբ պինդ ֆազի առաջացման: Պարզ է, որ գրոյական հեղուկահոսունություն առաջանում է լիկվիդուսի և սոլիդուսի ջերմաստիճանային միջակայքում:

Հեղուկահոսունությունը կախված է բյուրեղացման բնույթից: Էվտեկտիկական համաձուլվածքների դեպքում բյուրեղացումը տեղի է ունենում բոլոր կողմե-

րից՝ ձուլաձևի պատերից դեպի կենտրոն, և հեղուկը շարունակում է հոսել նեղացող խոռոչով: Այս դեպքում պատերի վրա ձևավորվում է պինդ ֆազը: Այդ պատճառով էվտեկտիկական համաձուլվածքներն ունեն առավելագույն հեղուկահոսունություն: Մաքուր ալյումինը բյուրեղանում է դենդրիտների տեսքով, որոնց աճը խանգարում է հեղուկի հոսունությանը, ուստի նրա հեղուկահոսունությունը փոքր է էվտեկտիկականից: Առավել մեծ հեղուկահոսունություն ունեն լիկվիդուսի և սուլիդուսի լայն միջակայք ունեցող համաձուլվածքները: Հեղուկահոսունության վրա զգալի ազդեցություն է թողնում բյուրեղացման ջերմաստիճանը: Մածուցիկությունը դանդաղեցնում է հեղուկի հոսքը: Սակայն լեգիրող տարրերի կոնցենտրացիայի մեծացման հետևանքով մածուցիկության փոփոխման մեխանիզմը չի կարելի կապել հեղուկահոսունության փոփոխման մեխանիզմի հետ: Հեղուկահոսունությունը բնութագրվում է նաև հեղուկի մաքրությամբ, ընդ որում, հեղուկ ֆազում օքսիդների առկայությունը փոքրացնում է մետաղի հեղուկահոսունությունը:

Գծային կծկվածքի մեծությունը որոշվել է հատուկ մետաղական ձևի միջոցով՝ ըստ ԳOUS 16817-71: Այն բաղկացած է 2 մասերից՝ շարժական ու անշարժ: Հեղուկ մետաղը լցնելուց հետո նմուշի կծկումն առաջացնում է ձուլաձևի շարժական մասի տեղաշարժ: Ձևը սառեցվել է ջրով, ինչը հնարավորություն է տալիս ստանալ սառեցման մեծ արագություն ($500...600\text{ }^{\circ}\text{C/րոպե}$):

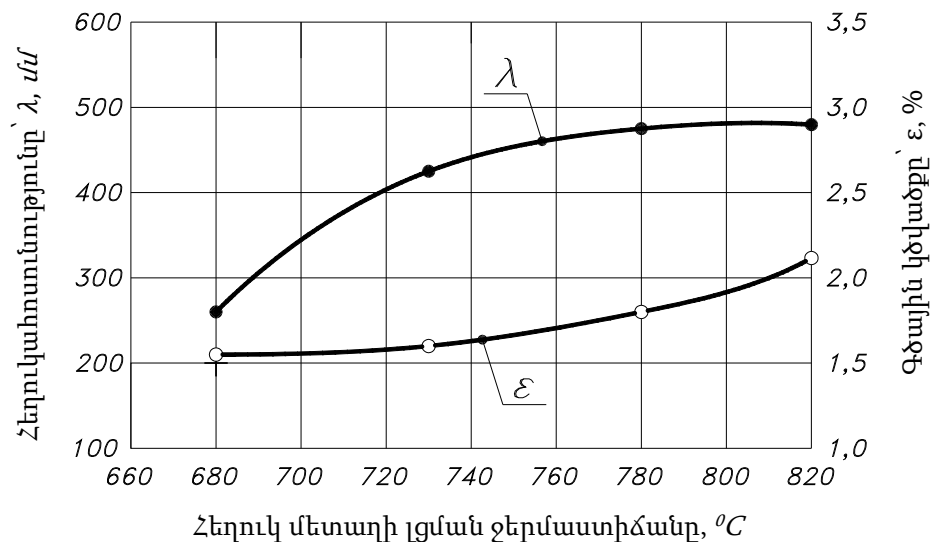
Գծային կծկվածքի տեսությունը հիմնավորելու համար է բյուրեղացման միջակայքը բաժանվում է երկու մասի: Առաջինը, երբ բյուրեղիկներն ազատ են և իրարից բաժանված են հեղուկով: Համաձուլվածքն այդպիսի պինդ-հեղուկ վիճակում օժտված է հեղուկին բնորոշ հատկությամբ, այսինքն՝ բարձր հոսունությամբ: Այդ պատճառով ջերմային կծկումն այդ փուլում չի կարող արտահայտվել ձուլվածքի գծային չափերի փոքրացմամբ: Որոշակի ջերմաստիճանից ցածր ջերմաստիճաններում բյուրեղիկներն առաջացնում են ցանց, որի դեպքում առկա է հեղուկ ֆազը, և այդպիսի պինդ հեղուկ վիճակում համաձուլվածքն օժտված է պինդ մարմնին բնորոշ հատկությամբ, այսինքն՝ մինչև այդ ստացած ձևի պահպանմամբ: Սկսած այդ պահից՝ զարգանում է ձուլվածքի գծային կծկվածքը: Գծային կծկվածքի վրա ազդում են ֆազային փոխակերպությունները, ներքին և ջերմային լարումները, մեխանիկական արգելակումը, գազերի դուրս գալը և այլն [10, 11]:

Կոմպոզիտային նյութի մեխանիկական հատկությունները լավացնելու համար այն ենթարկվել է միմյան և արհեստական ծերացման: Ձգման փորձարկումներն իրականացվել են TIRATEST-2300 ձգման մեքենայի միջոցով, որը նախատեսված է պինդ նյութերի ձգման, սեղմման և ծռման ժամանակ մեխանիկական հատկությունների ուսումնասիրության համար: Ուսումնասիրվել է նաև մշակված կոմպոզիտային նյութի միկրոկառուցվածքը, որի համար օգտագործվել են

МММ-8М մակնիշի օպտիկական մանրադիտակ և անդրադարձված լույսի մեծ զգայնությամբ լուսամանրադիտակ NEOPHOT-21:

Հետազոտության արդյունքները. Հետազոտությունները կատարվել են Al-Cu-Fe-Si համակարգի համաձուլվածքների վրա: Որպես մայրակի նյութ ընտրվել է A5E մակնիշի ալյումինային համաձուլվածքը (Al=99,5%, Fe=0,35%, Si=0,12%, Cu=0,02%, Zn=0,04%, Ti=0,01%, այլ տարրեր - 0,02%), իսկ որպես լեգիրող տարր՝ Mo և M1 մակնիշի պղինձը: Ձուլումից հետո ձուլվածքները ենթարկվել են հոմոգենացնող թրծման ($T_{\text{հոմ}}=500\pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{պահ}}=10$ ժամ):

Փորձերի առաջին փուլում իրականացվել է հալույթի լցման լավարկված ջերմաստիճանի ընտրում, որի համար A5E մակնիշի համաձուլվածքը տաքացվել է մինչև $680\dots 810^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճաններ, այնուհետև լեգիրվել է 6% պղինձով և լցվել նախօրոք մինչև 120°C տաքացված ձուլվածքների մեջ: Ուսումնասիրվել են հեղուկահոսունությունը և գծային կծկվածքը, որի արդյունքները ցույց են տրված նկ. 1-ում:

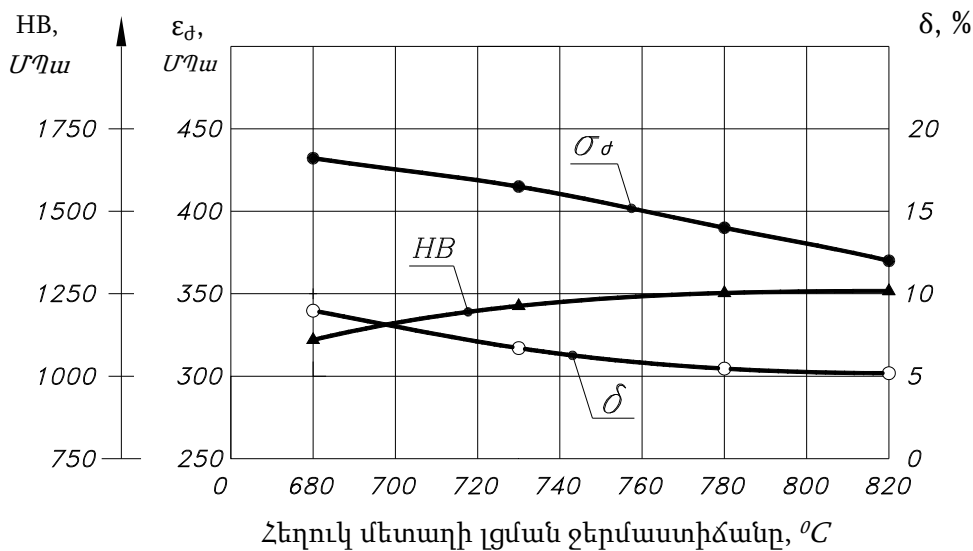


Նկ. 1. Համաձուլվածքի հեղուկահոսունության և գծային կծկվածքի կախվածությունը հալույթի լցման ջերմաստիճանից

Այնուհետև ձուլվածքները ենթարկվել են հոմոգենացնող թրծման $T_{\text{հոմ}}=500\pm 10^{\circ}\text{C}$ -ից, $\tau_{\text{պահ}}=10$ ժամ պահման տևողությամբ: Պատրաստվել են մեխանիկական հատկությունների փորձարկման նմուշներ, որոնք ենթարկվել են միմյան ($T_{\text{միմ}}=500\dots 525^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{պահ}}=15$ րոպե) և արհեստական ծերացման ($T_{\text{ծեր}}=120\pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{պահ}}=48$ ժամ): Փորձարկման արդյունքները ցույց են տրված նկ. 2-ում:

Ինչպես ցույց են տալիս փորձի արդյունքները, հալույթի ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց հեղուկահոսունությունը սկզբում աճում է, իսկ $780\dots 820^{\circ}\text{C}$

ջերմաստիճանային միջակայքում դառնում է հաստատուն, մինչդեռ պետք է անընդհատ աճեր: Այս երևույթը բացատրվում է նրանով, որ ալյումինային հալույթը, բարձր ջերմաստիճաններում լինելով չափազանց ակտիվ, փոխազդում է թթվածնի հետ և առաջացնում դժվարահալ Al_2O_3 օքսիդ, որը և փոքրացնում է հեղուկահոսությունը: Ջերմաստիճանի աճին զուգընթաց գծային կծկվածքի անընդհատ աճը բացատրվում է այն փաստով, որ հալույթը ավելի երկար է մնում պինդ-հեղուկ վիճակում, և հետևաբար՝ բյուրեղացման արդյունավետ միջակայքը ստացվում է մեծ:



Նկ. 2. Համաձուլվածքի ամրության, կարծրության և հարաբերական երկարացման կախվածությունը հալույթի լցման ջերմաստիճանից

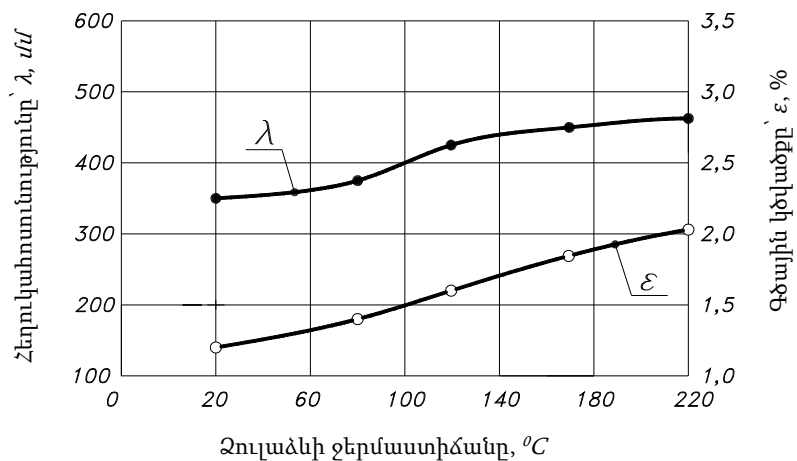
Համաձուլվածքի ամրության սահմանի և հարաբերական երկարացման նվազումը, հալույթի ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց, պայմանավորված է սառեցման փոքր արագությամբ, որի դեպքում այն ստացվում է խոշորահատիկ կառուցվածքով: Կարծրության բարձրացումը պայմանավորված է հալույթի և արտաքին միջավայրի ինտենսիվացմամբ, որի արդյունքում մեծանում է օքսիդների և այլ միացությունների քանակությունը համաձուլվածքում:

Հետազոտությունների արդյունքում որպես հալույթի լցման լավարկված ջերմաստիճան ընտրվել է $T_{\text{լցմ}} = 730 \pm 10^\circ\text{C}$, երբ հեղուկահոսունությունը հավասար է 420...430 մմ, գծային կծկվածքը՝ 1,6...1,65%, HB=1230...1250 ՄՊա, $\sigma_{\delta}=415...420$ ՄՆ/մ², $\delta=6...7\%$:

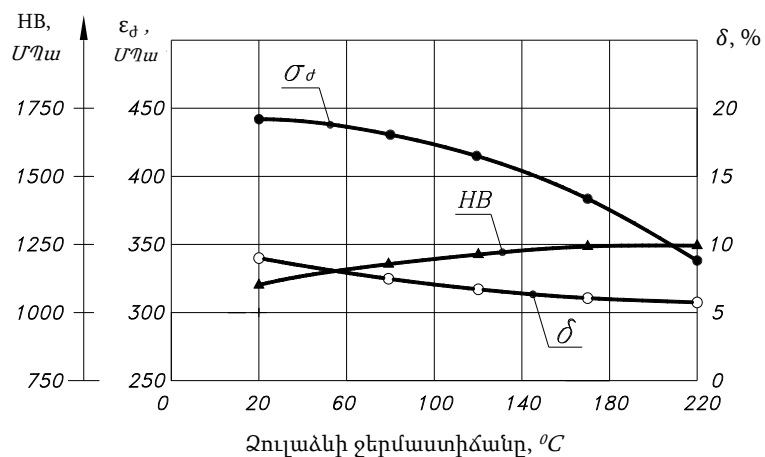
Փորձերի հաջորդ փուլում կատարվել է ձուլվածքի լավարկված ջերմաստիճանի ընտրում: Մինչև $730 \pm 10^\circ\text{C}$ տաքացված հալույթը լցվել է 20...220°C նախօրոք տաքացված ձևի մեջ, և ուսումնասիրվել են հեղուկահոսունությունն ու գծային

կծկվածքը (նկ. 3): Այնուհետև ձուլվածքները ենթարկվել են հոմոգենացնող թրծման ($T_{\text{հոմ}}=500 \pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{պահ}}=10$ ժամ), մեխանիկական մշակումից հետո՝ միմյան ($T_{\text{միմ}}=500...525^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{պահ}}=15$ րոպե) և արհեստական ծեղացման ($T_{\text{ծեղ}}=120 \pm 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_{\text{պահ}}=48$ ժամ): Մեխանիկական հատկությունների կախվածությունը ձուլաձևի ջերմաստիճանից ներկայացված է նկ. 4-ում:

Ինչպես երևում է փորձի արդյունքներից, ձուլաձևի ջերմաստիճանից կախված՝ համաձուլվածքի հեղուկահոսունությունը և գծային կծկվածքը մեծանում են. բարձրանում է նաև կարծրությունը, իսկ պլաստիությունն ու ամրությունը նվազում են:



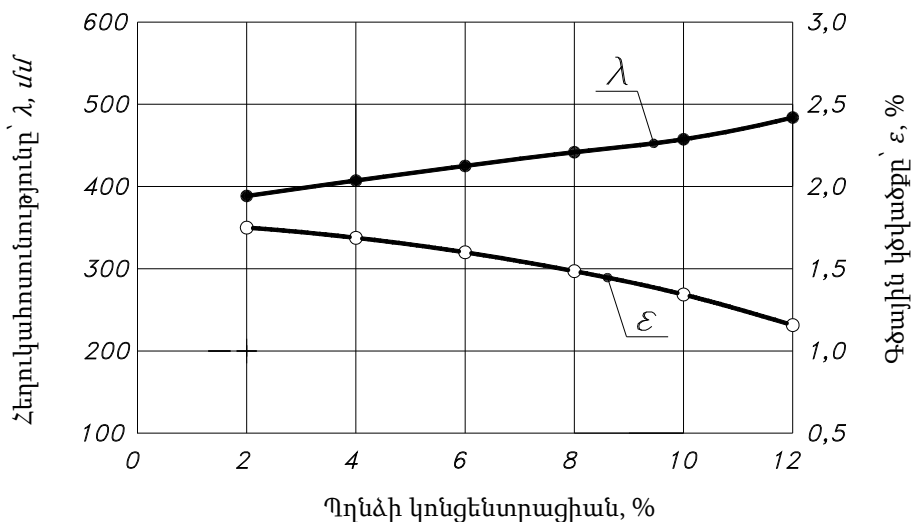
Նկ. 3. Համաձուլվածքի հեղուկահոսունության և գծային կծկվածքի կախվածությունը ձուլաձևի ջերմաստիճանից



Նկ. 4. Համաձուլվածքի ամրության, կարծրության և հարաբերական երկարացման կախվածությունը ձուլաձևի ջերմաստիճանից

Ստացված արդյունքերից հետևում է, որ ձուլաձևի ջերմաստիճանի փոփոխման դեպքում դիտվում են նույն օրինաչափությունները, որոնք ապահովվում էին հալույթի ջերմաստիճանի փոփոխման ժամանակ: Պատճառները պարզ են. որքան բարձր է ձուլաձևի ջերմաստիճանը, այնքան փոքր է սառեցման արագությունը, հետևապես՝ ուշ է սկսվում բյուրեղացման գործընթացը: Արդյունքում հեղուկահոսունությունը և գծային կծկվածքը դանդաղ մեծանում են, իսկ ամրությունը և պլաստիկությունը, շնորհիվ խոշորահատիկ կառուցվածքի ստացման, նվազում: Հետազոտությունների արդյունքում որպես ձուլաձևի լավարկված ջերմաստիճան ընտրվել է $T_{\text{ձև}}=120\pm 10^{\circ}\text{C}$, երբ հեղուկահոսունությունը հավասար է $420\ldots 430$ մՎ, գծային կծկվածքը՝ $1,6\ldots 1,65\%$, $\text{HB}=1230\ldots 1250$ ՄՊա, $\sigma_{\text{ծ}}=415\ldots 420$ ՄՆ/մ², $\delta=6\ldots 7\%$:

Փորձերի վերջնական փուլում կատարվել է պղնձի լավարկված բաղադրության որոշում: Պղնձի 2-12% պարունակությամբ հալույթը $T_{\text{լցմ}}=730\pm 10^{\circ}\text{C}$ -ում լցվել է մինչև $T_{\text{ձև}}=120\pm 10^{\circ}\text{C}$ ջերմաստիճանը նախօրոք տաքացված ձևի մեջ, և ուսումնասիրվել են հեղուկահոսունությունն ու գծային կծկվածքը (նկ. 5):

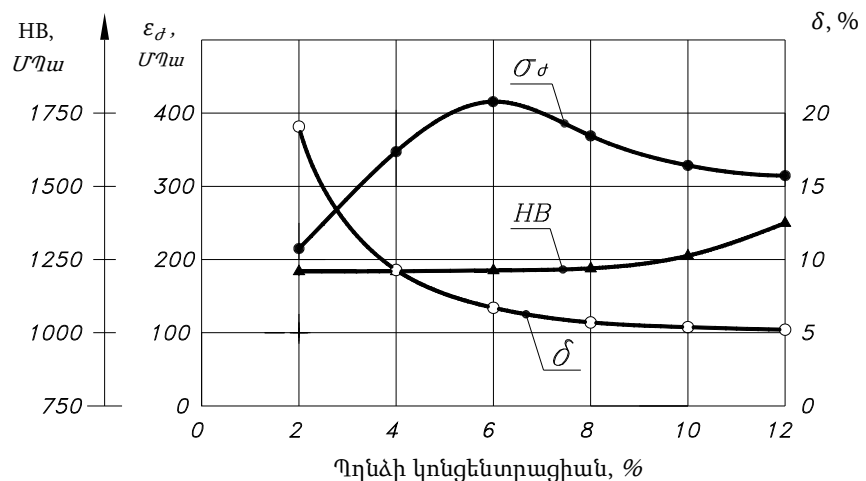


Նկ. 5. Համաձուլվածքի հեղուկահոսունության և գծային կծկվածքի կախվածությունը պղնձի կոնցենտրացիայից

Այնուհետև ձուլվածքները ենթարկվել են համապատասխան ջերմամշակման (հոմոգենացնող թրծում, մխում և ծերացում), և որոշվել է մեխանիկական հատկությունների կախվածությունը պղնձի կոնցենտրացիայից, որը ցույց է տրված նկ. 6-ում:

Պղնձի կոնցենտրացիայի բարձրացման հետևանքով կարծրությունն անընդհատ բարձրանում է, որը պայմանավորված է CuAl_2 ինտերմետաղական ֆազի առկայությամբ: Մինչև 6% Cu-ի պարունակության դեպքում բարձրանում է նաև

ամրությունը, իսկ այնուհետև սկսում է նվազել՝ ի հաշիվ փխրուն CuAl_2 ֆազի կոնցենտրացիայի մեծացման: Պլաստիկության անընդհատ նվազումը նույնպես պայմանավորված է CuAl_2 ֆազի կոնցենտրացիայի մեծացմամբ: Cu -ի կոնցենտրացիայի անընդհատ մեծացումը նպաստում է հատիկների սահմանագծերում CuAl_2 ֆազի ցանցի ստեղծմանը, որի առկայությունը, փխրունության շնորհիվ, հանգեցնում է նրա պլաստիկության և ամրության հետագա նվազման:



Նկ. 6. Համաձուլվածքի ամրության, կարծրության և հարաբերական երկարացման կախվածությունը պղնձի կոնցենտրացիայից

Հետազոտությունների արդյունքում որպես պղնձի լավարկված բաղադրություն ընտրվել է 5,5...6,5%, որի դեպքում համաձուլվածքի հեղուկահոսունությունը հավասար է 420...430 մմ, գծային կծկվածքը՝ 1,6...1,65%, $\text{HB}=1230\text{...}1250$ ՄՊա, $\sigma_\delta=415\text{...}420$ ՄՆ/մ², $\delta=6\text{...}7\%$:

Եզրակացություն. Կատարված տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքում, Al-Cu-Fe-Si համակարգի նշված համաձուլվածքի դեպքում, որը նախատեսվում է օգտագործել որպես մայրակի նյութ ալյումինային բարձրամուր դեֆորմացվող համաձուլվածքների համար, այդ թվում՝ ամրանավորված, պղնձի օպտիմալ քանակությունն ընտրվել է 5,7...6,5%, հալույթի լցման ջերմաստիճանը՝ $730 \pm 10^\circ\text{C}$, ձուլվածքի ջերմաստիճանը՝ $120 \pm 10^\circ\text{C}$: Այսպիսի բաղադրության և ռեժիմների դեպքում համաձուլվածքի հեղուկահոսունությունը հավասար է 430 մմ-ի, գծային կծկվածքը՝ 1,6...1,65%, $\text{HB}=1230\text{...}1250$ ՄՊա, $\sigma_\delta=415\text{...}420$ ՄՆ/մ², $\delta=6\text{...}7\%$:

Հետազոտությունները կատարվել են Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Նյութագիտություն և մետալուրգիա» բաժանի գիտահետազոտական լաբորատորիայում կատարվող գիտական թեմայի շրջանակներում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Колачев Б.А., Ливанов Б.А., Елагин В.И.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов.- М.: Металлургия, 1981.- 415 с.
2. **Гуляев А.П.** Металловедение.- 6-е изд.- М.: Металлургия, 1986.- 541 с.
3. **Мондольфо Л.Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов.- М.: Металлургия, 1979.-640с.
4. The Al-B-Nb-Ti system: I. Re-assessment of the constituent binary systems B-Nb and B-Ti on the basis of new experimental data / **V.T. Witusiewicz, A.A. Bondar, U. Hecht, et al** // Journal of Alloys and Compounds.- 2008.- Vol. 448, issues 1-2.- P. 185-194.
5. The Al-B-Nb-Ti system: II. Thermodynamic description of the constituent ternary system B-Nb-Ti / **V.T. Witusiewicz, A.A. Bondar, U. Hecht, et al** // Journal of Alloys and Compounds.- 2008.- Vol. 456, issues 1-2.- P. 143-150.
6. **Фридляндер И.Н.** Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы.- М.: Оборонгиз, 1960.- 290 с.
7. **Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н.** Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник.- М.: Металлургия, 1984.- 380 с.
8. **Фридляндер И.Н.** Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы.- М.: Металлургия, 1979.- 208 с.
9. **Колобнев И.Ф.** Термическая обработка алюминиевых сплавов.- М.: Металлургиздат, 1966.- 394 с.
10. **Добаткин В.И.** Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справочное руководство.- М.: Металлургия, 1983.- 350 с.
11. **Дмитрович А.М.** Справочник литейщика.- Минск: Высшая школа, 1989.- 390 с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 13.10.2021:

**С.Г. АГБАЛЯН, А.М. ОГАНЕСЯН, Г.А. ВАСИЛЯН, Т.Н. САФАРЯН,
А.С. АГБАЛЯН, Т.А. ДЕМИРЧЯН**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Cu-Fe-Si**

В качестве матрицы высокопрочных алюминиевых деформируемых сплавов выбран и обоснован сплав марки А5Е, а в качестве легирующего элемента - медь марок М0 и М1. В результате комплексных исследований разработана технология литья алюминиевых деформируемых сплавов системы Al-Cu-Fe-Si, выбраны и обоснованы их оптимальные режимы с содержанием меди 5,7...6,5%, согласно которым температура разливки расплава должна быть в пределах $730 \pm 10^\circ\text{C}$, температура литформы - $120 \pm 10^\circ\text{C}$, при этом жидкотекучесть составляет 430 мм, линейное сжатие - 1,6...1,65%, HB = 1230...1250 МПа, $\sigma_b = 415...420 \text{ МН/м}^2$, $\delta = 6...7\%$.

Показано, что литейные свойства алюминиевых сплавов, такие как жидкотекучесть, линейная усадка и ликвация, сильно зависят от химического состава сплава, его структуры, температур ликвидуса и солидуса, теплоемкости, теплопроводности и др.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, композиционный материал, матрица, легирование, расплав, литье, жидкотекучесть, линейное сжатие, ликвация, термообработка, удельная прочность.

**S.G. AGHBALYAN, A.M. HOVHANNISYAN, G.A. VASILYAN,
T.N. SAFARYAN, A.S. AGHBALYAN, T.A. DEMIRCHYAN**

**THE CASTING TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF ALUMINUM
DEFORMABLE ALLOYS OF THE Al-Cu-Fe-Si SYSTEM**

Aluminum alloy A5E was selected as a matrix of high-strength aluminum wrought alloys, and copper M0 and M1 grades was chosen as an alloying element. As a result of comprehensive studies, a technology for casting aluminum wrought alloys of the Al-Cu-Fe-Si system was developed, and optimized casting modes for aluminum wrought alloys with a copper content of 5,7...6,5% were substantiated and selected, according to which the temperature of casting the melt should be within $730 \pm 10^\circ\text{C}$, the temperature of the mold is $120 \pm 10^\circ\text{C}$, while the fluidity is 430 mm, linear compression is 1,6...1,65%, HB = 1230...1250 MPa, $\sigma_b = 415...420 \text{ MN} / \text{m}^2$, $\delta = 6...7\%$.

It is shown that the casting properties of aluminum alloys, such as fluidity, linear shrinkage and liquation, strongly depend on the chemical composition of the alloy, its structure, liquidus and solidus temperatures, heat capacity, thermal conductivity, etc.

Keywords: aluminum alloy, composite material, matrix, alloying, melt, casting, fluidity, linear compression, liquation, heat treatment, specific strength.

Է.Գ. ԶԱՔԱՐՅԱՆ

ԹԵՂՈՒՏԻ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՑԻՆ ԽՏԱՆՑՈՒԹՅՑ ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ
ԻՆՔՆԱՏԱՐԱԾՎՈՂ ՄԻՆԹԵԶԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՖԵՐՈՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՍՏԱՑՄԱՆ
ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Յույց է տրվել, որ Թեղուտի մոլիբդեն պարունակող սուլֆիդային խտանյութը և դրա բաղադրության մեջ մտնող մոլիբդենային միներալներն օդում և ջրային միջավայրում դիսպերս մանրացման արդյունքում ենթարկվում են խոր մեխանաքիմիական փոխակերպումների՝ փոխարինելով թրծման փուլում ընթացող քիմիական գործընթացները:

Առաջին անգամ կատարվել է Թեղուտի մոլիբդեն պարունակող սուլֆիդային խտանյութերի մեխանաքիմիական և մետաղաջերմային գործընթացների գուգակցում, որի արդյունքում ստացվել է ոչ ավանդական մոդիֆիկացված արգասիք, և շրջանցելով խտանյութի նախնական թրծման գործընթացը՝ լուծվել են բնապահպանական հարցեր:

Բացահայտվել են Թեղուտի՝ նախապես մեխանաքիմիապես ակտիվացված մոլիբդեն պարունակող սուլֆիդային խտանյութերի ուղղակի, անվառարան մետաղաջերմային վերականգնման գործընթացի տեսական, կինետիկական և տեխնոլոգիական օրինաչափություններն ու առանձնահատկությունները: Պարզաբանվել են նաև այլումինաջերմային վերականգնման գործընթացի մեխանիզմին վերաբերող տեսական հարցեր:

Առանցքային բառեր. մոլիբդենիտային խտանյութ, դիսպերս մանրացում, մեխանաքիմիական փոխակերպում, մետաղաջերմային գործընթաց, բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզ, ֆերոմոլիբդեն:

Ներածություն. Հայաստանի Հանրապետության տնտեսության զարգացման ծրագրերում կարևոր տեղ է հատկացվում բարձր ամրությամբ, մաշակայունությամբ, կոռոզիակայունությամբ և պահանջվող այլ հատկություններով նոր համաձուլվածքների ստեղծմանը և տեխնոլոգիաների մշակմանը: Այդպիսի հատկություններով օժտված են ֆերոհամաձուլվածքներով, այդ թվում՝ նաև ֆերոմոլիբդենով լեգիրված հատուկ պողպատներն ու համաձուլվածքները: Վերջին տարիներին փոխվել է պահանջը մոլիբդենի և հատկապես դրա համաձուլվածքների նկատմամբ, ինչը պայմանավորված է նորագույն տեխնիկայում մոլիբդենով լեգիրված համաձուլվածքների դերի մեծացմամբ: Մաքուր մոլիբդենը ստանում են մոլիբդենի եռօքսիդից, որի համար լավագույն հումք է հանդիսանում մոլիբդենիտը [1]: Մոլիբդենիտի նախնական թրծման և սիլիկաջերմային վերականգնման եղանակով Հայաստանում արտադրում են ֆերոմոլիբդեն: Սակայն ներկայում գործող

տեխնոլոգիան ունի որոշակի թերություններ: Հատկապես լուծված չէ SO_2 -ի կորզման հարցը թրծման գործընթացում, որը բնապահպանական խնդիրներ է ստեղծում շրջակա միջավայրի համար: Լուծված չէ նաև ստացված ֆերոմոլիբդենի բաղադրության և կառուցվածքի հոմոգենության հարցը, որն ազդում է պատրաստի արտադրանքի գնի վրա: Այսպիսով, ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիայի վերարտադրումը ՀՀ Թեղուտի հանքահարստացուցիչ ֆաբրիկայի մոլիբդենիտային խտանյութերի դեպքում կապված է որոշակի խնդիրների հաղթահարման հետ: Այս տեսակետից մեծ հետաքրքրություն է ներկայացնում սուլֆիդային հանքանյութերի մշակումը մետաղաջերմային վերականգնման եղանակով, որի զուգակցումը նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացման հետ կնպաստի հետագա օքսիդավերականգնման գործընթացի ինտենսիվացմանը և սկզբունքորեն նոր մոդիֆիկացված արգասիքների ստացմանը [2-4]: Նախնական մեխանաքիմիական ակտիվացումը կնպաստի խտանյութում առկա մոլիբդենիտ միներալի քիմիական ակտիվության մեծացմանը և հետագա մետաղաջերմային վերականգնման գործընթացի անհամեմատ ցածր ջերմաստիճաններում ընթանալուն, որն էլ իր հերթին կնպաստի ստացված ֆերոմոլիբդենի կառուցվածքի լավացմանը: Ուստի մոլիբդեն պարունակող սուլֆիդային խտանյութերից ֆերոմոլիբդենի ստացման ժամանակակից տեխնոլոգիայի մշակումը խիստ արդիական է և բխում է հանրապետության տնտեսության արդի պահանջներից:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Ելնելով վերը նշվածից՝ աշխատանքի նպատակն է ՀՀ Թեղուտի մոլիբդենիտային խտանյութերի ռեակցիոն հատկությունների մեծացումը՝ մեխանաքիմիական ակտիվացման եղանակով որպես հիմք մետալուրգիական հետագա գործընթացների ինտենսիվացման համար, և նախապես ակտիվացրած խտանյութից ալյումինաջերմային վերականգնման եղանակով մոդիֆիկացված ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը:

Ուսումնասիրվել են ֆերոմոլիբդենի միներալները և հանքանյութերը, մոլիբդենային հանքաքարերի հարստացման, խտանյութի ստացման և ֆլոտացման գործընթացները: Ցույց է տրվել, որ դժվարահալ մետաղների սուլֆիդների մշակումը հարմար է իրականացնել ոչ թե ավանդական վառարանային, այլ ուղղակի, անվառարան ալյումինաջերմային վերականգնման եղանակով, քանի որ վերջինիս առավելությունները խիստ ակնառու են գոյություն ունեցող ավանդական եղանակների համեմատ: Ուսումնասիրվել են մեխանաքիմիական գործընթացների հիմնահարցերը՝ մեխանաքիմիան դիտելով որպես փոխազդող նյութերի ռեակցիոն հատկությունների մեծացման գործոն: Ընդունված է, որ աղացներում մեխանիկական մանրացման արդյունքում ռեակցիայի արագության մեծացման պատճառը ոչ միայն փոխազդող նյութերի շփման մակերեսի մեծացումն է, այլև պինդ

նյութերի մակերևույթի որոշ կետերում մեծ քանակությամբ անջատվող էներգիան, որն ուղեկցվում է, այսպես կոչված, «տաք» կետերի առաջացումով: Շնորհիվ պինդ նյութերի փոքր ջերմահաղորդականության՝ այդ ջերմությունը չի հասնում ներթափանցել պինդ նյութի խորքային շերտերը, այլ մնում է մակերեսին՝ մեծացնելով նրա մակերեսային էներգիան, որը ծախսվում է քիմիական ակտիվության մեծացման վրա:

Պինդ նյութերի մանրացման գործընթացում արտաքին մեխանիկական ուժերի ազդեցությունը նյութում առաջացնում է դեֆորմացիա, որը կապված է միջհատիկային հեռավորության փոփոխության, բյուրեղային ցանցերի աղավաղման, արատների առաջացման և ամորֆացման հետ: Կառուցվածքային այս բոլոր աղավաղումները խիստ ազդեցություն են թողնում նյութերի ռեակցիոն ունակությունների վրա: Ընդհանուր առմամբ, այդ փոխարկումները հանգեցնում են փոխազդող նյութերի քիմիական ռեակցիայի ակտիվացման էներգիայի նվազմանը, ռեակցիոն ունակությունների մեծացմանը, ռեակցիաների նոր, յուրահատուկ ընթացքի և նոր մոդիֆիկացված արգասիքների առաջացմանը:

Ընտրվել և հիմնավորվել են ելանյութերը, ուսումնասիրվել են դրանց բնութագրերը, մասնավորապես, Թեղուտի հանքավայրի մոլիբդենային հանքանյութերի և խտանյութի ընդհանուր բնութագրերը՝ այդ խտանյութի միներալոգիական կազմը, քիմիական և ֆազային վերլուծության արդյունքները (աղ.): Արդյունքում՝ ընտրվել է նախապես մեխանակտիվացված մոլիբդենային խտանյութի վերականգնման ալյումինաջերմային մեթոդը:

Աղյուսակ

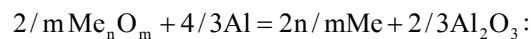
Թեղուտի մոլիբդենիտային խտանյութի քիմիական բաղադրությունը, %

MoS ₂	Mo	Cu	S	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Zn	CaO	MgO
74,25	49,5	0,85	14,63	1,7	2,9	3,5	0,02	0,002	2,0	1,0
74,25	48...51	0,5...1,2	13...15,26	1,4...2,0	2,0...3,8	3...4	0,02	2,0	1,0	1,0

Հետազոտության արդյունքները. Հետազոտվել են մետաղների օքսիդների ալյումինաջերմային վերականգնման գործընթացի հիմնահարցերը և այրման տեխնոլոգիան: Ցույց է տրված, որ բարձրջերմաստիճանային ինքնատարածվող սինթեզն (ԲԻՄ) այրման տեսակ է, որի արդյունքում առաջանում են արժեքավոր պինդ նյութեր: ԲԻՄ գործընթացներում մեծ նշանակություն ունի այրման ալիքում առաջացող նյութի միկրոկառուցվածքի փոփոխությունը, որը կարելի է ներկայացնել որպես «ալյում+կառուցվածքագոյացում» սխեմայով: Այն ընթանում է վառարանից դուրս՝ անվառարան, և որն էլ տեխնոլոգիայի ամենակարևոր առավելությունն է: Օքսիդների ալյումինաջերմային վերականգնումը նույնպես ԲԻՄ գործընթաց է, որն ընթանում է՝ շնորհիվ ելանյութային օքսիդների ու վերականգնիչի

(Al, Si և այլն) միջև ընթացող ջերմանջատիչ քիմիական ռեակցիայից անջատված ջերմության, և տարածվում է այրման ռեժիմով: Մեխանաակտիվացման զուգակցումը ԲԻՄ գործընթացի հետ (ՄԱ ԲԻՄ) ունի կարևոր տեխնոլոգիական նշանակություն: ՄԱ ԲԻՄ գործընթացը բաղկացած է մեխանիկական ակտիվացման և նրան հաջորդող ինքնատարածվող սինթեզի փուլերից: Մեխանաակտիվացման գործընթացում նախնական մանրացումը զգալի ազդեցություն է թողնում ստացված արգասիքի հատկությունների վրա [5-8]: Փոխազդող նյութերի մակերեսը մեծացնելիս և ամորֆ մասնիկների չափերը փոքրացնելիս սինթեզն ընթանում է ավելի ցածր ջերմաստիճաններում՝ ավելի ցածր ակտիվացման էներգիայի պայմաններում: Առաջանում են մեծ թվով բյուրեղացման կենտրոններ, իսկ ստացված բյուրեղները սկսում են աճել ցածր ջերմաստիճաններում՝ մինչև հեղուկ ֆազի առաջացումը, ինչն ազդում է սինթեզված ֆերոմոլիբդենի կառուցվածքագոյացման և ֆազաառաջացման գործընթացի վրա: Ընթանում է ԲԻՄ գործընթաց, որի արդյունքում առաջանում է միկրոհետերոգեն կառուցվածքով նյութ: Քանի որ սինթեզն ընթանում է խառնուրդներից ազատված օքսիդների հետ, հետևաբար՝ ստացվում է ավելի մաքուր և նանոչափային հատիկներով ֆերոմոլիբդեն:

Կատարվել է մոլիբդենիտային խտանյութի ալյումինաջերմային գործընթացի թերմոդինամիկական վերլուծություն, որի իրականացման սկզբունքային հնարավորությունը և դրա ընթացքի լիարժեքությունը նախ և առաջ կախված են ալյումինի հետ մետաղի օքսիդների փոխազդեցության թերմոդինամիկական բնութագրերից: Օքսիդների փոխազդեցությունն ալյումինի հետ կարելի է ներկայացնել հետևյալ հավասարումով՝

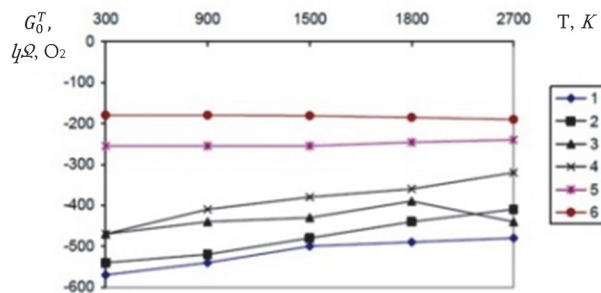


Նշված ռեակցիայի ինքնուրույն ընթացքի հիմնական նախապայմանն ալյումինի օքսիդի առավել բարձր թերմոդինամիկական կայունությունն է՝ համեմատած վերականգնվող մետաղների օքսիդների թերմոդինամիկական կայունության հետ: Մոլիբդենիտային խտանյութի հիմնական բաղադրիչներն են FeO-ն, Fe₂O₃-ը, ազատ SiO₂-ը, աննշան քանակներով պղնձի, ցինկի և կապարի օքսիդները, որոնց պարունակությունը հաշվարկներում կարելի է անտեսել: Ալյումինաջերմային ԲԻՄ գործընթացում կարող են զուգահեռաբար և հաջորդաբար ընթանալ վերականգնման բազմաթիվ ռեակցիաներ: Ռեակցիաների ինքնուրույն ընթանալու չափանիշը հաստատուն ճնշման և ջերմաստիճանի պայմաններում Գիբսի էներգիայի փոփոխության (ΔG_T) նվազումն է: Ռեակցիաների ΔG_T -ի փոփոխության արժեքների համեմատումը հնարավորություն է տալիս որոշել մի ռեակցիայի ընթանալու առավելությունը մյուսի նկատմամբ: ΔG_T -ի արժեքը որոշվել է հետևյալ բանաձևով՝

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0,$$

որտեղ ΔG_T^0 -ն Գիբսի էներգիայի փոփոխությունն է, ΔH_T^0 -ն՝ համակարգի էնթալպիայի փոփոխությունը, իսկ ΔS_T^0 -ն՝ համակարգի էնտրոպիայի փոփոխությունը: Հաշվարկները կատարվել են 298...2700K ջերմաստիճանային տիրույթում՝ հաշվի առնելով ֆազային փոփոխությունները էնթալպիայի և էնտրոպիայի արժեքներում: Համեմատություններն ավելի ակնառու դարձնելու համար հաշվարկները կատարվել են ատոմական թթվածնի 1 մոլի համար:

Ֆերոհամաձուլվածքների արտադրությունում բազմաբաղադրիչ համակարգերի համատեղ վերականգնման դեպքում էներգետիկական առումով առավելագույն նշանակություն է ունենում երկաթի եօքսիդը (նկ. 1, 1-ին կոր): Տարբեր օքսիդների համատեղ վերականգնման ռեակցիաների ΔG_T^0 -երի փոփոխության ջերմաստիճանային կախվածության դիտարկումը ցույց է տալիս, որ երկաթի օքսիդն առաջինն է վերականգնվում (նկ. 1, կորեր 1 և 4): Ավելի դժվար վերականգնվող օքսիդներից է SiO_2 -ը (նկ.1, կոր 6): Օքսիդների վերականգնվող ունակությունը կախված է ոչ միայն դրանց կայունությունից, այլև հալոյթում դրանց կոնցենտրացիայից: Որոշվել է վերականգնման ռեակցիայի հավասարակշռության հաստատունի արժեքը, որը 2500K դեպքում կազմում է 2.10⁴: Դա համապատասխանում է խարամում 1% մոլիբդենի և 0,4% MoO պարունակությամբ հավասարակշիռ կազմին և ուղեկցվում է Գիբսի էներգիայի զգալի փոփոխությամբ, ինչի շնորհիվ գործընթացն ընթանում է հոգուտ հիմնական տարրի բարձր աստիճանում կորզման:



Նկ. 1. Մոլիբդենիտային խտանյութում պարունակվող օքսիդների ալյումինաջերմային վերականգնման ռեակցիաների ΔG^0 -ի կախվածությունը ջերմաստիճանից.

1- $2/3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 4/3\text{Al} = 4/3\text{Fe} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$, 2- $2/3\text{MoO}_3 + 4/3\text{Al} = 2/3\text{Mo} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$,

3- $2/3\text{MoO}_2 + 4/3\text{Al} = 4/3\text{Mo} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$, 4- $2\text{FeO} + 4/3\text{Al} = 2\text{Fe} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$,

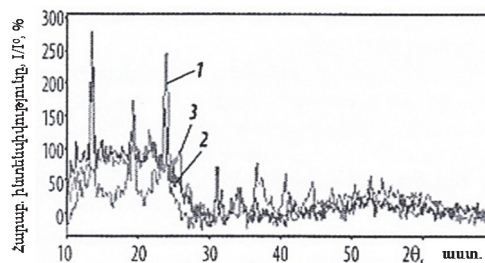
5- $2\text{MoO} + 4/3\text{Al} = 2\text{Mo} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$, 6- $\text{SiO}_2 + 4/3\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Si} + 2/3\text{Al}_2\text{O}_3$

Փոխազդած բովախառնուրդի սյան բարձրությամբ որոշվել է ալյումինաջերմային գործընթացի գծային արագությունը՝ $V_h = h/\tau = (u/l/pq)$: Տվյալ դեպքում 100g բովախառնուրդի՝ $h=8$ սմ և $\tau=25$ վրկ չափսերի դեպքում գծային արագությունը

միջին հաշվով կազմել է $8/25=0,32 \text{ սմ/վրկ}$: Կատարվել են ֆերոմոլիբդենի ալյումինա-ջերմային վերականգնման գործընթացի տեսակարար ջերմության ($2686,65 \text{ կՋ/կգ}$), բովախառնուրդի հալման առավելագույն ջերմաստիճանի (2312 K) և ջերմային կորուստների (3%) տեսական հաշվարկներ: Ցույց է տրվել, որ ստացված պարամետրերը միանգամայն բավարար են ալյումինաջերմային վերականգնման գործընթացն անվտանգ իրականացնելու համար:

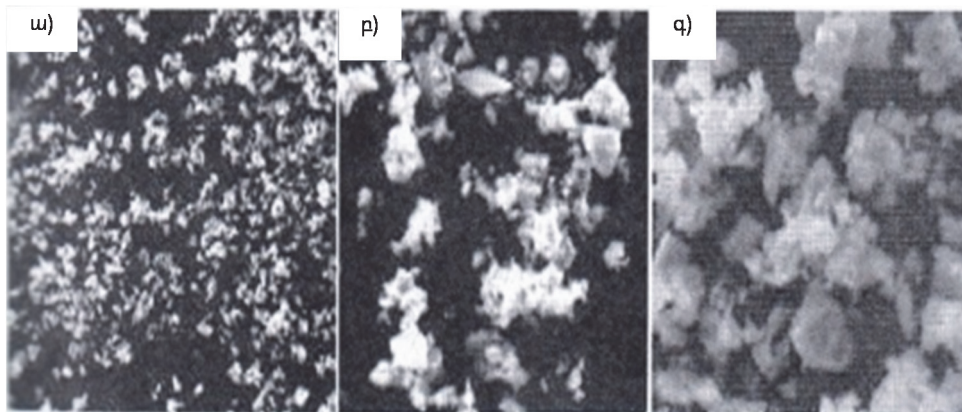
Ուսումնասիրվել է մոլիբդենիտային խտանյութերի ֆազային փոխակերպությունների ընթացքը մեխանաքիմիական և ջերմային մշակման ժամանակ, և կատարվել է ֆերոմոլիբդենի ստացման գործընթացի հետազոտում: Ցույց է տրվել, որ ինչպես առանձին միներալները, այնպես էլ մոլիբդենիտային խտանյութը օդում և ջրային միջավայրում նուրբ մանրացման արդյունքում ենթարկվում են խոր քիմիական փոխակերպությունների, ընդ որում՝ 60 րոպե ջրային միջավայրում մանրացնելիս ստացվում է մոլիբդենի եռօքսիդ, իսկ երկաթի դեպքում՝ նաև օքսիդներ (Fe_2O_3 և Fe_3O_4): Ուսումնասիրվել են նաև ջերմային մշակման ենթարկված մոլիբդենիտային խտանյութում առկա առանձին միներալների և խտանյութի փոխակերպությունները, ինչի արդյունքում պարզվել է, որ մեխանաքիմիապես ակտիվացված և ջերմային մշակման ենթարկված փորձանմուշների օքսիդացման օրինաչափությունները նման են միմյանց, այսինքն՝ առաջանում են նույն ֆազերը: Մակայն մեխանաակտիվացված փորձանմուշների օքսիդացումն ընթանում է ավելի ինտենսիվ և $\sim 100^\circ\text{C}$ -ով ցածր ջերմաստիճաններում: Ցույց է տրվել, որ մեխանաքիմիական ակտիվացումը կարող է փոխարինել բարձրջերմաստիճանային թրծման գործընթացին, բացառելով ոչ ցանկալի և դեռևս լուծում չստացած SO_2 -ի կորզման հիմնախնդիրը:

Նկ. 2-ում ցույց են տրված մոլիբդենիտային խտանյութի (MoS_2) ջրային միջավայրում ակտիվացման արդյունքում ստացված արգասիքի ռենտգենագրերը. մոլիբդենիտն ամբողջությամբ փոխակերպվել է կոլոիդանման ամորֆ զանգվածի (տեղի է ունեցել կտրուկ արտահայտված բյուրեղային ցանցի սուր գագաթների կլորացում): Նույն փաստը հաստատագրվել է նաև մորֆոլոգիական հետազոտություններով:



Նկ. 2. Մոլիբդենիտի (MoS_2) ջրային ռեժիմում 15, 30 և 60 րոպե ակտիվացման արդյունքում ստացված արգասիքների ռենտգենագրերը

Նկ. 3-ում ներկայացված են մոլիբդենիտի միկրոկառուցվածքները ջրային միջավայրում տարբեր տևողություններով ակտիվացված փորձանմուշների դեպքում, որոնք հաստատում են, որ կախված մանրացման և ակտիվացման տևողությունից՝ տեղի է ունենում փորձանմուշների ամորֆացում: MoS_2 -ից MoO_3 -ի ստացումն ինչպես ջրային միջավայրում, այնպես էլ օդում ուղեկցվում է SO_2 գազի առաջացմամբ, որը նույնպես կարող է բնապահպանական դժվարություններ առաջացնել: Այդ պատճառով մեխանաքիմիական ակտիվացման հետագա փորձերը կատարվել են CaO -ի մասնակցությամբ: Որպես թթվածնի աղբյուր ծառայել է NaNO_3 -ը, որը քայքայվում է՝ անջատելով թթվածին: MoS_2 -ի օքսիդացման գումարային ռեակցիան CaO -ի և NaNO_3 -ի առկայությամբ ունի հետևյալ տեսքը.

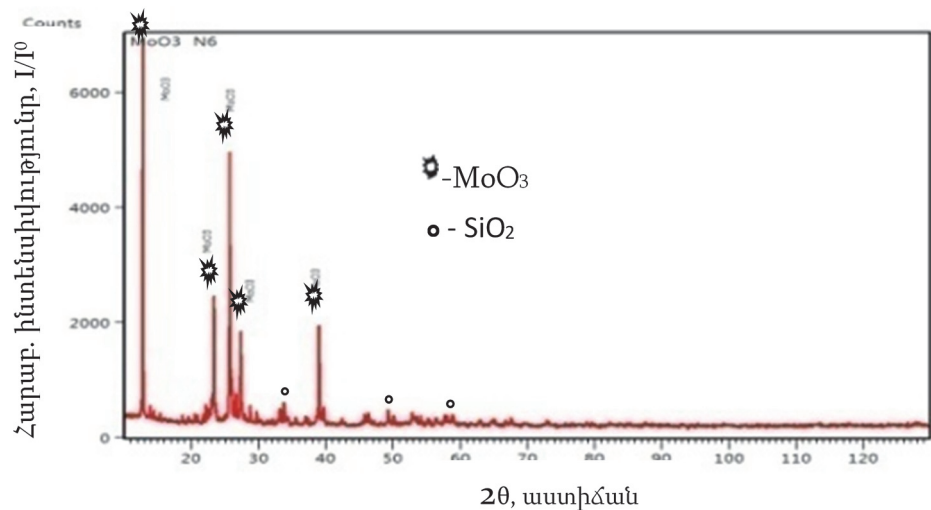


Նկ. 3. Մոլիբդենիտային խտանյութի մեխանաքիմիական ակտիվացման արդյունքում ստացված միկրոկառուցվածքներն ակտիվացրած ջրային ռեժիմում՝ 15 (ա), 30 (բ) և 60 (գ) րոպե տևողություններով ($\times 1000$)

Ստացված CaSO_3 -ը հետագա պիրոմետալուրգիական գործընթացներում վտանգ չի ներկայացնում և մնում է խարամում: Մոլիբդենիտային խտանյութի՝ CaO -ի և NaNO_3 -ի առկայությամբ ինչպես ջրային միջավայրում, այնպես էլ օդում մեխանաքիմիական ակտիվացման հետագա փորձերը ցույց են տալիս մշակված տեխնոլոգիայի ճշգրտությունը:

Ինչպես երևում է նկ. 4-ից, ռենտգենագրում բացառապես երևում են MoO_3 -ի առկայծումները: Այլ արտացոլումներ չեն նկատվել:

Կատարվել են փորձագիտական հետազոտություններ՝ Թեղուտի նախապես մեխանաակտիվացված մոլիբդենային խտանյութից ալյումինաջերմային վերականգնմամբ 36,84% Fe+63,16% Mo բաղադրությամբ ֆերոմոլիբդենի ստացման նպատակով:

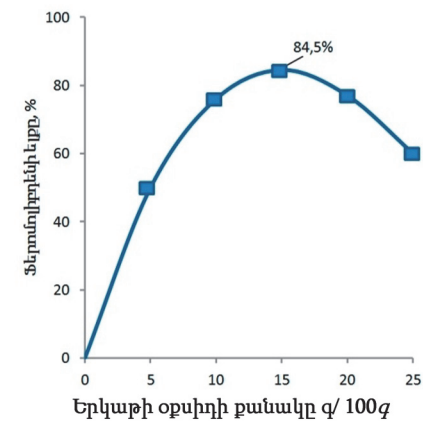


Նկ. 4. Թեղուտի մոլիբդենիտային խտանյութի ռենտգենագիտական վերջնաձևակումից հետո

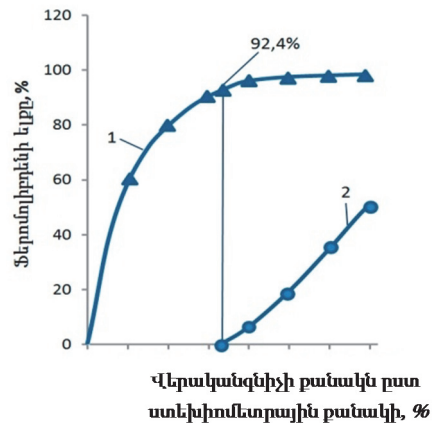
Բովախառնուրդը, բացի մոլիբդենիտային խտանյութից և երկաթի տաշեղներից (կամ Fe_2O_3 -ից), պարունակել է նաև այլ բաղադրիչներ: Մասնավորապես՝ բովախառնուրդի թերմիկությունը մեծացնելու նպատակով ավելացվել է NaNO_3 , իսկ խարամագոյացման համար՝ CaO : Փորձերից հետո ստացված մետաղական զանգվածը կշռվել և ենթարկվել է ինչպես քիմիական, այնպես էլ ռենտգենաֆազային և մետաղագրական վերլուծության, արդյունքում՝ որոշվել է մետաղի գումարային ելքը: Ուսումնասիրվել է ֆերոմոլիբդենի ելքի կախումը երկաթի տաշեղների քանակից: Ինչպես երևում է նկ. 5ա-ից, ֆերոմոլիբդենի կորզման աստիճանն իր առավելագույն արժեքին (82,4%) հասնում է 15գ Fe_2O_3 -ի պարունակության դեպքում կամ ստեխիաչափային քանակից 25% ավելցուկի պայմաններում, որի դեպքում համաձուլվածքը հիմնականում բաղկացած է երկաթից և մոլիբդենից՝ ալյումինի չնչին պարունակությամբ: Fe_2O_3 -ի քանակի հետագա մեծացումը հանգեցնում է ֆերոմոլիբդենի ելքի նվազմանը, քանի որ մետաղական ֆազ է անցնում նաև ալյումինը:

Ուսումնասիրվել է նաև մետաղի ելքի կախվածությունը վերականգնիչի (նկ. 5բ), CaO -ի (նկ. 5գ) և NaNO_3 -ի (նկ. 5դ) քանակներից: Ալյումինաջերմային վերականգնման գործընթացում բովախառնուրդի հեղուկահոսունությունը մեծացնելու նպատակով ավելացվում է նաև CaF_2 ՝ բովախառնուրդի քանակի 5%-ի չափով: Այսպիսով, բովախառնուրդի լավարկված պայմաններն են մոլիբդենային խտանյութի, Fe_2O_3 -ի 15%, ալյումինի փոշու 25%-ի, CaO -ի 8% ավելցուկի, 10% NaNO_3 -ի և 5% CaF_2 -ի քանակները՝ ըստ բովախառնուրդի 100գ զանգվածի: Այդ պայման-

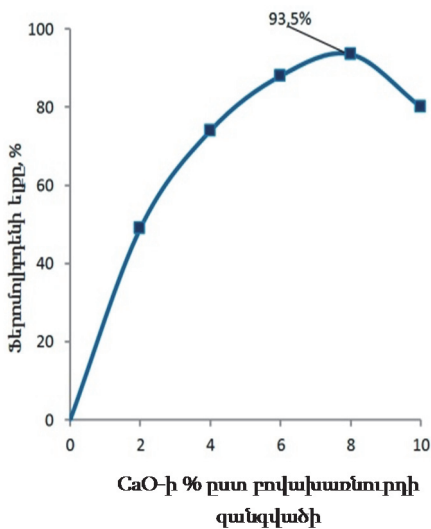
ներում ստացվում է մոնոֆերոմոլիբդեն՝ FeMo, այլումինի չնչին հետքերով, և համաձուլվածքի կորզման աստիճանը հասնում է իր առավելագույն արժեքին՝ 95,6%



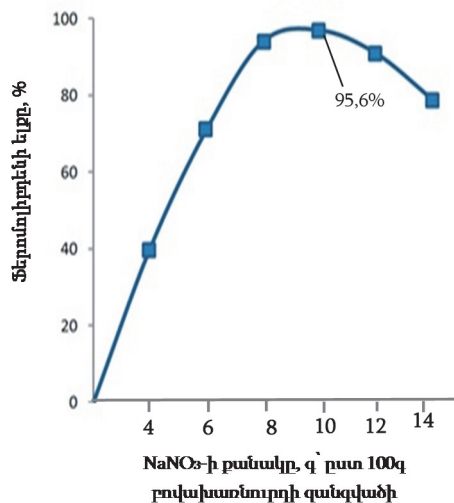
ա)



բ)



գ)

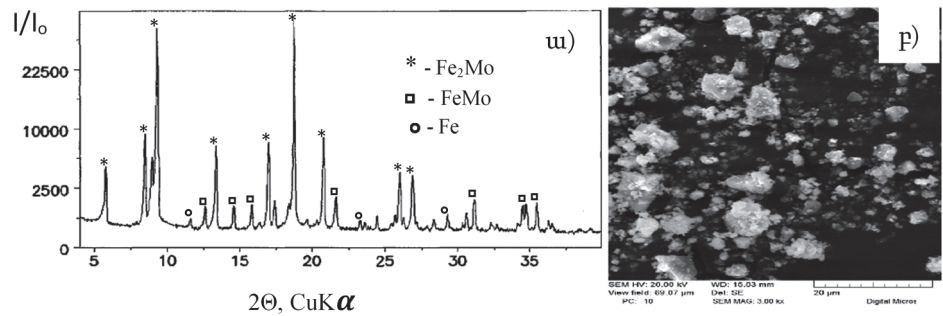


դ)

Նկ. 5. Ֆերոմոլիբդենի ելքի կախվածությունը. ա - երկաթի քանակից, բ - վերականգնիչի և ստացված մետաղական ֆազում այլումինի քանակներից, գ - CaO-ի քանակից, դ - NaNO₃-ի քանակից

Ստացված ֆերոմոլիբդենը ենթարկվել է ռենտգենաֆազային (նկ. 6ա) և մետաղագրական (նկ. 6բ) վերլուծությունների: Ինչպես երևում է ռենտգենագրերից, մետաղական ֆազը հիմնականում բաղկացած է հետևյալ արտացոլումներից՝ FeMo

(2,00x; 1,82x; 1,198A), Fe₂Mo (2,03x; 1,173; 1,432A): Դա համապատասխանում է ֆերոմոլիբդենին՝ FeMo բանաձևով (նկ. 6ա), և ունի բավական համասեռ միկրոկառուցվածք (նկ. 6բ):



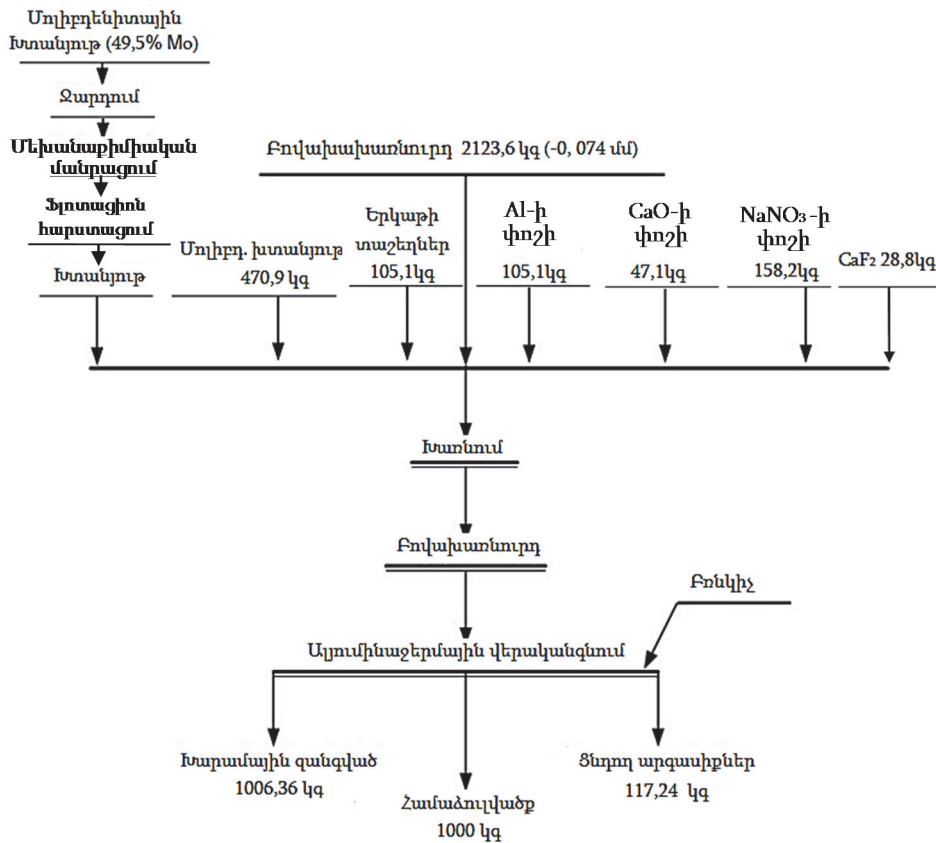
Նկ. 6. Մոլիբդենիտային խտանյութի ալյումինաջերմային վերականգնումից ստացված մետաղական ֆազի ռենտգենագիրը (ա) և միկրոկառուցվածքը (բ)

Նկատվել են նաև Al-ի աննշան մեծությամբ արտացոլումներ: Այդ պայմաններում ստացված մետաղական ֆազն ունի հետևյալ քիմիական բաղադրությունը՝ 35,53% Fe, 64,43% Mo և 0,4% Al: Հստ Fe-Mo վիճակի դիագրամի՝ ստացված համաձուլվածքը գտնվում է Fe+FeMo տիրույթում:

Հետազոտվել են մոլիբդենիտային խտանյութի ալյումինաջերմային վերականգնման ԲԻՍ գործընթացում ալյուման ճակատի տարածման առանձնահատկությունները՝ գծային արագության և առավելագույն ջերմաստիճանի կախվածությունը բովախառնուրդում առկա վերականգնիչի քանակից: Արդյունքները մշակվել են Lab View ծրագրային փաթեթի միջոցով: Ելնելով վերականգնման գործընթացի ջերմաստիճանային պրոֆիլներից, որոշվել են այդ մեծությունների արժեքները: Բացահայտվել են մոլիբդենիտային խտանյութի ալյումինաջերմային վերականգնման եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման ԲԻՍ գործընթացի կինետիկան և մեխանիզմը, համաձայն որոնց առաջինը վերականգնվում է երկաթը, իսկ խարամների բյուրեղային ցանցի ամբողջականությունը չի խախտվում: Այնուհետև սկսում է վերականգնվել մոլիբդենը, ընդ որում՝ վերականգնված երկաթը նպաստում է մոլիբդենի եռօքսիդի վերականգնմանը, որից հետո ավարտվում են FeMo համաձուլվածքի սինթեզի և սիլիկատաառաջացման գործընթացները: Արդյունքում՝ բովախառնուրդի ջերմաստիճանը բարձրանում է՝ հասնելով առավելագույն աստիճանի՝ մինչև 3000 K:

Կատարված համալիր հետազոտությունների հիման վրա առաջին անգամ մշակվել է ուղղակի, անվառարան ալյումինաջերմային վերականգնման եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման ժամանակակից տեխնոլոգիա (նկ. 7), որը ներա-

ռում է՝ մոլիբդենիտային խտանյութից և Fe-ի ջարդոններից որոշակի հարաբերությամբ բովախառնուրդի պատրաստում, խառնում կոնաձև խառնիչում, լցում գրաֆիտաշամոտային հրակայուն թասերի մեջ, կոնական փոսի պատրաստում, բռնկիչի տեղադրում, այրում (վերականգնում) բաց օդում, զանգվածի սառեցում, մանրացում և մետաղական ֆազի անջատում խարամից:



Նկ. 7. Ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիական սխեման

Եզրակացություն. Մշակվել է Թեղուտի մոլիբդենիտային խտանյութից արտադրական պայմաններում ընդունելի ֆերոմոլիբդենի ստացման տեխնոլոգիա, որոշվել են լավարկված տեխնոլոգիական ռեժիմները, որոնք ապահովում են նվազագույն ծախսերով ֆերոմոլիբդենի հավելանյութի առավելագույն ելքը: Հիմնավորվել է մոլիբդենի սուլֆիդային խտանյութերի ուղղակի, անվառարան ալյումինաջերմային վերականգնման եղանակով ֆերոմոլիբդենի ստացման կիրառական նշանակությունը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Зеликман А.Н. Молибден: Сборник / Пер. с англ.- М.: Металлургия, 1970.– 440 с.
2. **Мартиросян В.А., Закарян Э.Г., Сасунцян М.Э.** Поведение дисульфида молибдена при механохимической и термической обработке молибденитового концентрата // Изв. НАН РА и НПУА. Сер. ТН.- 2017.- Т. 70, N 4.- С. 420-430. ISSN 0002-306X.
3. **Զարարյան Է.Գ.** Թեղուտի նախապես մեխանաակտիվացված մոլիբդենիտային խտանյութից ֆերոմոլիբդենի ստացման գործընթացի հետազոտումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ տեղեկագիր. ՏԳ սերիա.- 2018.- Հատ. LXXI, N 3.- Էջ 259-267. ISSN 0002-306X:
4. **Мартиросян В.А., Сасунцян М.Э., Закарян Э.Г.** Фазовые превращения дисульфида молибдена при механохимическом и термическом воздействии на молибденитовый концентрат // Черные металлы.- М.: Изд. дом "Руда и металлы", 2019.- № 1.- С. 16–26. DOI: 10.17073/0368-0797-2019-1-8-14, SKOPUS.
5. **Мартиросян В.А., Лисовская Ю.О., Сасунцян М.Э., Закарян Э.Г.** Поведение шлаков металлургических заводов при механохимической активации // Вестник ГИУА: Металлургия, Материаловедение, Недропользование.- Ереван, 2015.- №1.- С. 30-40. ISSN- 1829-3395.
6. **Мартиросян В.А., Лисовская Ю.О., Сасунцян М.Э., Закарян Э.Г.** Поведение шлаков металлургических заводов при механохимической активации // IV Международная конференция по химии и химической технологии, 14–18 сентября 2015г.- Ереван, 2015.- С. 130-133.
7. МА и МАСВС получения нанокмпозитов металлоксид и интерметаллид оксид / **Т.Ф. Григорьева, Т.Л. Талако, А.А. Новакова, И.А. Ворсина, А.П. Барина, Т.Ю. Киселева, Н.З. Ляхов, П.А. Витязь** // Фундаментальные проблемы современного материаловедения.- 2007.- № 3.- С. 26-31.
8. Поведение шлаков металлургических заводов при механохимической активации / **В.А. Мартиросян, В.В. Савич, Ю.О. Лисовская и др.** // Материалы 12-й Межд. конф. “Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка”, 25-27 мая 2016г.- Минск, 2016.- С.105-113.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 12.11.2021:

Э.Г. ЗАКАРЯН

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМОЛИБДЕНА ИЗ
ТЕХУТСКОГО МОЛИБДЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ПУТЕМ
САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
СИНТЕЗА**

Техутский сульфидный концентрат с содержанием молибдена и минералов молибдена в его составе претерпевает глубокие механохимические превращения в результате диспергирования в воздухе и в воде, тем самым заменяя химические процессы, происходящие на этапе обжига.

Впервые механохимические и металлотермические процессы техутских концентратов сульфида молибдена были объединены, в результате чего получен модифицированный продукт нетрадиционного режима и, минуя процесс предварительного обжига концентрата, решены экологические проблемы.

Выявлены теоретические, кинетические и технологические закономерности и особенности процесса прямого, беспечного металлотермического восстановления техутского сульфидного концентрата, который содержит предварительно механически активированный молибден. Уточнены теоретические вопросы, связанные с механизмом процесса алюминотермического восстановления.

Ключевые слова: молибденитовый концентрат, дисперсионное измельчение, механохимическое превращение, металлотермический процесс, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, ферромolibден.

E.G. ZAKARYAN

**DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING
FERROMOLIBDENUM FROM MOLYBDENUM CONCENTRATE OF
TEGHUT BY THE METHOD OF HIGH-TEMPERATURE SELF-
PROPAGATING SYNTHESIS**

Teghut molybdenum sulfide concentrate and its molybdenum minerals have been shown to undergo deep mechanochemical transformations as a result of dispersion crushing in air and water, replacing the chemical processes that take place during the roasting phase.

For the first time, a combination of mechanochemical and metallothermal processes of Teghut molybdenum sulfide concentrates was carried out, as a result of which, a fixed product of non-traditional mode was obtained, and bypassing the pre-firing process of the concentrate, environmental issues were solved.

Theoretical, kinetic and technological regularities and peculiarities of the direct, unheated metal-thermal reduction process of Teghut pre-mechanically activated molybdenum sulfide concentrates have been revealed. Theoretical issues related to the mechanism of the aluminum-thermal recovery process were clarified.

Keywords: molybdenum concentrate, dispersion crushing, mechanochemical conversion, metal-thermal process, high-temperature self-propagating synthesis, ferromolibdenum.

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

ԱԷԿ-Ի ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԽԱՓԱՆՄԱՆ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ՆՎԱԶԵՑՈՒՄԸ ՌԻՍԿ-ՏԵՂԵԿԱՑՎԱԾ ՍՏՈՒԳՈՒՄՆԵՐԻ ԻՐԱԿԱՆԱՑՄԱՆ
ՄԻՋՈՑՈՎ

ԱԷԿ-ում իրականացվող ստուգումների շրջանակներում ստուգվում են բազմաթիվ համակարգերի տարրեր: Ավանդական դետերմինիստական ստուգումները հիմնվում են շահագործման փորձից հայտնի տվյալների վրա, և հաշվի չեն առնվում տարրերի ռիսկ - նշանակալիությունները: Ներկայանային ստուգումների երթուղիներից մեկը ներառում է ՊՄՀ-ի (պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի) պոմպակայանների և տարրերի ստուգումը: Համակարգի օրինակով ցույց է տրվել, որ ավանդական դետերմինիստական ստուգումների փոխարինումը ռիսկ-տեղեկացված ստուգումներով հնարավորություն կտա ստուգումների ընթացքում ճիշտ թիրախավորել ստուգվող տարրերը՝ այդպիսով նպաստելով ստուգման արդյունավետության էական բարձրացմանը և համակարգի խափանման հավանականության մի քանի անգամ նվազեցմանը:

Առանցքային բառեր. ռիսկ-տեղեկացված ստուգումներ, անվտանգության հավանականային վերլուծություն, ԱԷԿ:

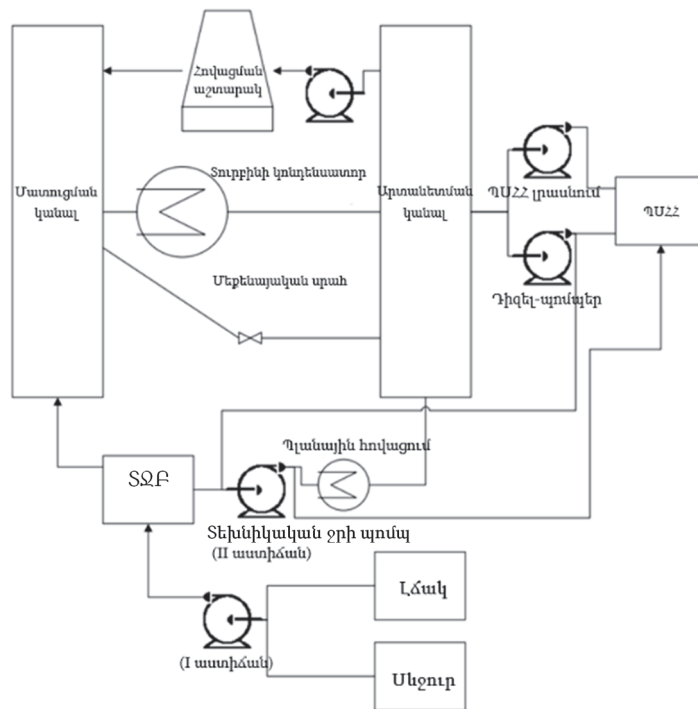
Ներածություն. Կայանի կենսացիկլի ցանկացած փուլում կարևորագույն խնդիր է կայանի անվտանգության ապահովումը՝ անվտանգության հիմնարար գործառնությունների իրականացմամբ: Վերջիններիս թվում է ակտիվ գոտու հուսալի հովացումը, որը պետք է իրականացվի անգամ ռեակտորը կանգնեցնելուց հետո՝ մնացորդային ջերմանջատման առկայությամբ պայմանավորված: Այսպիսով, ռեակտորի ակտիվ գոտու հուսալի հովացումը պահանջվում է թե՛ հզորությամբ աշխատելու, թե՛ կանգնեցված վիճակում [1]:

Ռեակտորի ակտիվ գոտուց վերջնական ջերմահեռացումն իրականացվում է ՊՄՀ (պատասխանատու սպառիչների հովացման) և տեխնիկական ջրամատակարարման համակարգերով: ԱՄԿ-ի (աշխատած միջուկային վառելիքի) պահման ավազաններից ջերմահեռացումն իրականացվում է միայն ՊՄՀ համակարգով:

Վերջնական ջերմահեռացումն ապահովող ՀԱԷԿ-ի (Հայկական ատոմային էլեկտրակայանի) համակարգերի սխեմատիկական փոխկապակցվածությունը ներկայացված է նկ.1-ում:

Ռիսկ-տեղեկացված ստուգումների իրականացումը ենթադրում է անվտանգության համակարգերի խափանման ռիսկի նվազեցում: Աշխատանքի նպատակն է

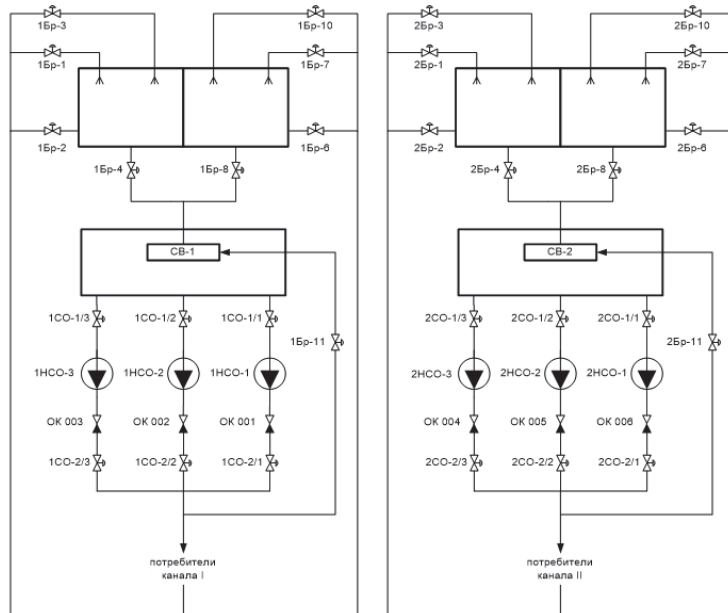
ՊՄՀՀ-ի օրինակով պարզել և ցույց տալ ավանդական դետերմինիստականից ռիսկ-տեղեկացված ստուգումներին անցնելու պարագայում համակարգի խափանման հավանականության փոփոխությունը:



Նկ.1. Վերջնական ջերմահեռացում ապահովող ՀԱԷԿ-ի համակարգերի սխեմատիկական փոխկապակցվածությունը [2]

Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգը. Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգը ըստ անվտանգության դերի կատարումն ապահովող համակարգ է: Հովացնող ջրով ապահովում է ԱԷԿ-ի անվտանգության համար կարևոր համակարգերը (պատասխանատու սպառիչները), որոնք պահանջում են հովացնող ջրի անխափան մատակարարում նորմալ շահագործման ռեժիմում, վթարային իրավիճակներում, ՋԱՎ-ի (ջերմակրի արտահոսքով վթարների), հոսանքազրկման, ինչպես նաև սեյսմիկ ներգործությունների դեպքերում: ՊՄՀՀ-ի պարզեցված սխեման ներկայացված է նկ.2-ում:

Համակարգը կազմված է երկու անկախ ուղուց՝ երեքական պոմպերով: Երկու ուղիներից յուրաքանչյուրը միացված է մեկ ցայտավազանի: Առկա է նաև պաշարային ցայտավազան: Հովացման համակարգը շրջապտուտային է, մեկուսացված է արտաքին ջրամբարներից, գրունտային ջրերից և հովացման այլ համակարգերից:



Նկ.2. ՊՄՀՀ-ի պարզեցված սխեման [3-6]

Ցայտավազանում (ԵրԾ) հովացած ջուրը խողովակագծով տրվում է պոմպայկայան, մաքրվում պտտվող ցանցով (ՇԵ), տրվում պոմպերի (HCO) ներածման մաս: Վերջիններս ջուրը մղում են դեպի ռեակտորային տեղակայանքի սպառիչները, մեքենայական սրահի տեխնիկական ջրի բաքերը (ՏՋԲ) (ԵԴԲ-1,2), ինչպես նաև դիզել-գեներատորները:

ՊՄՀՀ-ի հովացնող ջրի սպառիչները՝ ըստ համակարգի ուղիների, բերված են աղ. 1-ում [3-6]:

Անվտանգության հավանականային վերլուծությունը (ԱՀՎ) որպես կայանի անվտանգության գնահատման մեթոդ. Կայանի անվտանգությունը գնահատվում է հետևյալ երկու մեթոդների կիրառմամբ՝

- դետերմինիստական մեթոդ,
- անվտանգության հավանականային վերլուծության մեթոդ:

Ընդ որում, վերոհիշյալ մեթոդները կիրառվում են համատեղ:

Դետերմինիստական մեթոդը հիմնված է վթարների զարգացման ընթացքի և դրանց պոտենցիալ հետևանքների ճարտարագիտական վերլուծության վրա: Մոտեցումն ամբողջովին իրագործվում է ըստ կարգավորող և կանոններ սահմանող կազմակերպությունների կանոնների և ուղեցույցների:

Հավանականային վերլուծության մեթոդը օգտագործվում է որևէ կոնկրետ պատահարի վթարային շղթայի հավանականությունը և նրա հետևանքները որոշելու համար: ԱՀՎ-ը թույլ է տալիս ի հայտ բերել նախագծում անվտանգության

տեսանկյունից թույլ կողմերը և վերացնել դրանք: ԱՀՎ մեթոդների միջոցով որոշվում է պարզ կամ առավել բարդ ֆունկցիաների կորստի արդյունքում «անընդունելի հետևանքների» առաջացման հավանականությունը:

Աղյուսակ 1

ՊՄՀՀ-ի հովացնող ջրի սպառիչները՝ ըստ համակարգի ուղիների [3-6]

Կայան / տեղակայանք	I ուղի	II ուղի
Ռեակտորային տեղակայանք	Ցայտաջրմուղային համակարգի ջերմափոխանակիչ (2TOC-1), վթարային կոնդենսատոր (2AK-1), վթարային լրասնման պոմպ (2APIH-1÷3), վթարային կոնդենսատային պոմպ (2AKH-1), պահման ավազանի հովացման ջերմափոխանակիչ (2TOBB-1)	Ցայտաջրմուղային համակարգի ջերմափոխանակիչ (2TOC-2), վթարային կոնդենսատոր (2AK-2), վթարային լրասնման պոմպ (2APIH-4÷6), վթարային կոնդենսատային պոմպ (2AKH-2), պահման ավազանի հովացման ջերմափոխանակիչ (2TOBB-2)
Դիզել-գեներատորային կայան	Դիզել-գեներատորներ (ՃԴ-4,6)	Դիզել-գեներատորներ (ՃԴ-3,5)

ԱՀՎ-ը ներմուծվել է դետերմինիստական մոտեցումը ոչ թե փոխարինելու, այլ փոխլրացնելու նպատակով:

Խափանումների ծառը տրամաբանական կառուցվածք է, որը դեդուկտիվ կապ է հաստատում անցանկալի իրադարձության (համակարգի խափանում) և դրա առաջացմանը հանգեցնող տարրական իրադարձությունների (տարրերի խափանում) միջև:

Խափանումների ծառերի մեթոդով վերլուծություն կատարելու համար կարևոր է հասկանալ՝

- համակարգի կառուցվածքը և ֆունկցիան,
- համակարգի սահմանները,
- տարրերի ֆունկցիաները համակարգում,
- ապահովող համակարգերի հետ կապերը,

• տվյալ խափանումների ծառն ընդգրկող պատահարների հաջորդականության վերլուծության պահանջները (օրինակ՝ հաջողության կամ տապալման չափանիշները),

• անհրաժեշտության դեպքում՝ սպասարկման, փորձարկման, շահագործման ժամանակ անձնակազմի միջամտությունները:

Ընդհանուր դիսկի գնահատման նպատակը ոչ թե մեծ անորոշություններ պարունակող՝ ակտիվ գոտու հալման, ճառագայթաակտիվ արտանետումների և

մահացու ելքերի որոշումն է, այլ այդ հավանականության առանձին բաղադրիչների և դրանցից յուրաքանչյուրի կշռի մասին առավել ամբողջական տեղեկույթի հավաքագրումը:

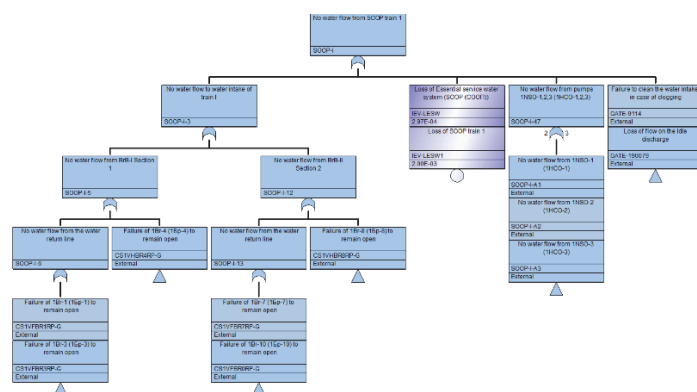
Անվտանգության վերլուծության երկու մեթոդները կիրառվում են համատեղ, և չկա դետերմինիստական վերլուծությունը ԱՀՎ-ով փոխարինելու նպատակադրում [7]:

Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի մեկ ուղու խափանումների ծառի դիտարկումը. Ստորև դիտարկված է պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի մեկ ուղու խափանումների ծառը (նկ.3): Խափանումների ծառի հաշվարկումը SAPHIRE կամ Risk-Spectrum ծրագրային միջավայրերում թույլ է տալիս գտնել համակարգի կանալի խափանմանը հանգեցնող ամենահավանական տարրական պատահարների համադրությունները (աղ.2): Խափանումների ծառի հաշվարկման միջոցով ստացվում են նաև տարրերի ռիսկ-նշանակալիության ցուցանիշները: Այս ամենի վերլուծության միջոցով հնարավոր է պարզել, թե որ տարրերի փոխարինումը և/կամ առավել հաճախ ստուգումը/նորոգումը կնպաստի համակարգի հուսալիության բարձրացմանը:

Աղյուսակ 2

Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի առաջին կանալի խափանմանը հանգեցնող ամենահավանական տարրական պատահարների համադրությունները

#	%	Տարրական պատահար 1-ի նշանակումը	Տարրական պատահար 2-ի նշանակումը
1	38.1	CS1VFBR2GA (1Եր-2 ամրանը չի փակվում)	SOOP-WINTER (տարվա ձմեռային շրջան)
2	38.1	CS1VFBR6GA (1Եր-6 ամրանը չի փակվում)	SOOP-WINTER (տարվա ձմեռային շրջան)



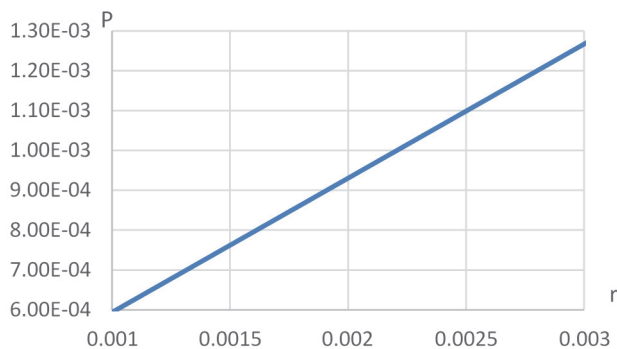
Նկ.3. Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի առաջին կանալի խափանումների ծառը SAPHIRE միջավայրում

Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի առաջին կանալի խափանման հավանականությունը կազմում է $1.14E-03$: Ստացված արժեքի անորոշության բաշխվածությանը վերաբերող տվյալները բերված են աղ.3-ում: Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի առաջին կանալի խափանման P հավանականության կախումը $CS1VFBR2GA$ և $CS1VFBR6GA$ տարրական պատահարների r հաճախությունից ներկայացված է նկ.4-ում: Կախումը ստացվել է r հաճախության տարբեր արժեքների դեպքում՝ P հավանականությունը վերահաշվարկելով: Այդ գծային կախման ուսումնասիրության արդյունքում մշակվել են հաջորդ երկու գրաֆիկները (նկ.5, 6):

Աղյուսակ 3

Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի առաջին կանալի խափանման հավանականության անորոշությանը վերաբերող արժեքներ

Միջին	5%	Մեդիան	95%
$1.13E-03$	$8.34E-04$	$1.10E-03$	$1.50E-03$



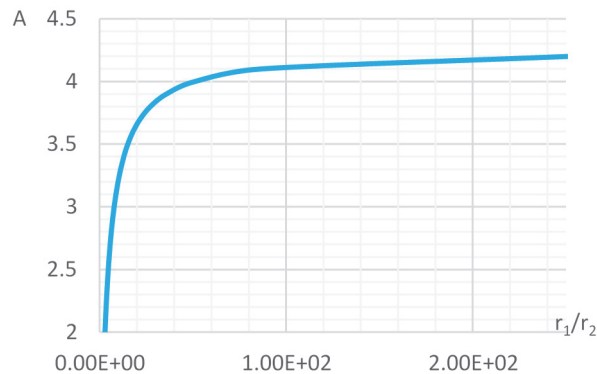
Նկ. 4. Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի առաջին կանալի խափանման հավանականության կախումը $CS1VFBR2GA$ և $CS1VFBR6GA$ տարրական պատահարների հաճախությունից

Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի ուղու խափանման հավանականության նվազման A չափ է սահմանվել հետևյալ հարաբերությունը՝

$$A = \frac{P_1}{P_2}, \quad (1)$$

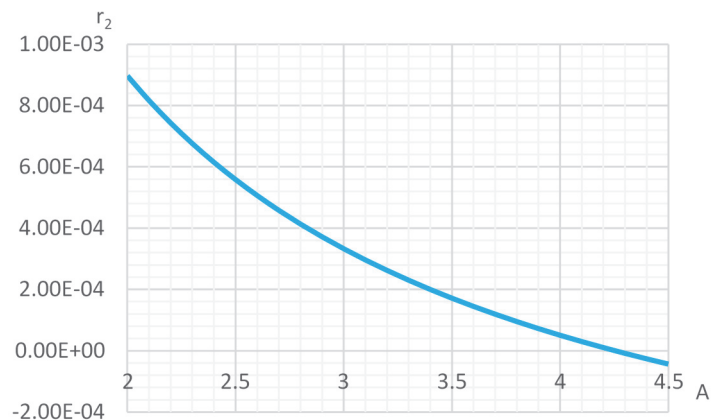
որտեղ P_1 -ը համակարգի ուղու խափանման հավանականությունն է $CS1VFBR2GA$ և $CS1VFBR6GA$ տարրական պատահարների r_1 հաճախության դեպքում, իսկ P_2 -ը՝ r_2 -ի դեպքում: Ընդ որում, r_1 արժեքը համապատասխանում է հաճախության ելակետային իրական արժեքին, իսկ r_2 -ը նվազեցված արժեքն է:

Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի ուղու խափանման հավանականության նվազման A չափը՝ կախված CS1VFBR2GA և CS1VFBR6GA տարրական պատահարների խափանման հաճախությունների նվազման r_1/r_2 չափից, ներկայացված է նկ.5-ում:



Նկ. 5. Պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի ուղու խափանման հավանականության նվազման չափը՝ կախված CS1VFBR2GA և CS1VFBR6GA տարրական պատահարների խափանման հաճախությունների նվազման չափից

Քանի որ r_1 արժեքը հաստատուն է, իսկ r_2 -ը՝ փոփոխական, ուստի նպատակահարմար է ներկայացնել CS1VFBR2GA և CS1VFBR6GA տարրական պատահարների խափանման հաճախությունների նվազեցված r_2 արժեքի՝ պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի ուղու խափանման հավանականության նվազման A չափից կախումն արտահայտող գրաֆիկը (նկ.6):



Նկ. 6. CS1VFBR2GA և CS1VFBR6GA տարրական պատահարների խափանման հաճախությունների նվազեցված արժեքը՝ կախված պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի ուղու խափանման հավանականության նվազման չափից

Կառուցված գրաֆիկների դիտարկումից նկատելի է, որ CS1VFBR2GA և CS1VFBR6GA տարրական պատահարների հաճախությունների նվազեցման միջոցով տեսականորեն հնարավոր է նվազեցնել պատասխանատու սպառիչների հովացման համակարգի մեկ ուղու խափանման հավանականությունը 4,25 անգամ, սակայն գործնականում դրան հասնել հնարավոր չէ:

Եզրակացություն. ԱԷԿ-ից վերջնական ջերմնդոնիչը շրջակա միջավայրն է: Ջերմության վերջնական ընդունիչ համակարգերն են տեխնիկական ջրամատակարարման և ՊՄՀ համակարգերը: Վերջինիս վերաբերյալ կատարված ուսումնասիրությունը ցույց է տվել ձմռան ռեժիմում կիրառվող երկու ամրանների (Եր-2, Եր-6)՝ համակարգի ուղու խափանման տեսանկյունից ունեցած մեծ կշիռը: Կատարված հաշվարկների արդյունքում ցույց է տրվել, որ ավանդական դետերմինիստական ստուգումների փոխարինումը ռիսկ-տեղեկացված ստուգումներով կարող է հանգեցնել ԱԷԿ-ի համակարգերի խափանումների հավանականության նվազեցմանը, որը ՊՄՀ համակարգի կանալի դեպքում կարող է ապահովել առավելագույնը 4,25 անգամ նվազեցում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Գևորգյան Ա.Ա., Հովհաննիսյան Լ.Ս., Խուդավերդյան Ա.Գ. ՀԱԷԿ-ի ռեակտորային տեղակայանքի ֆիզիկա և շահագործման հիմունքներ. - Երևան: ՀՊՃՀ, 2002. - 393 էջ:
2. National action plan of Armenia On Strengthening Nuclear Safety of Armenian Nuclear Power Plant decided upon lessons learnt from Fukushima Daiichi accident. - ANRA, 2017.
3. Инструкция по эксплуатации системы технического водоснабжения насосной станции I подъема "Севджур". - 2001.
4. Инструкция по эксплуатации системы технического водоснабжения I подъема "Пруд". - 2001.
5. Система охлаждения ответственных потребителей (ARMPSA). - 2013.
6. Инструкция по эксплуатации насосной станции системы охлаждения ответственных потребителей энергоблока №2 И ДГС ААЭС. - 2000.
7. TNO Red Book, 4 Methods for Determining and Processing Probabilities, 2005.

«Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան» հիմնադրամ (ՀԱՊՀ), «Միջուկային և ռադիացիոն անվտանգության գիտատեխնիկական կենտրոն» ՓԲԸ. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 16.12.2021:

А.Г. ХАЧАТРЯН, Г.Р. КАНЕЦЯН, А.А. ГЕВОРГЯН
СНИЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОТКАЗОВ СИСТЕМ АЭС ПУТЁМ
ПРОВЕДЕНИЯ РИСК-ИНФОРМИРОВАННЫХ ИНСПЕКЦИЙ

В рамках инспекций, проводимых на АЭС, проверяется множество компонентов систем. Традиционные детерминистические инспекции основаны на данных из известного опыта эксплуатации, не принимая во внимание риск-значимость компонентов. Один из маршрутов внутростанционных инспекций включает в себя проверку компонентов и насосных станций СООП (Системы охлаждения ответственных потребителей). На примере системы показано, что замена традиционных детерминистических инспекций риск-информированными позволит правильно определить компоненты, подлежащие проверке во время инспекций, что значительно повысит эффективность инспекции и снизит вероятность отказа системы в несколько раз.

Ключевые слова: риск-информированные инспекции, вероятностный анализ безопасности, АЭС.

A.G. KHACHATRYAN, G.R. KANETSYAN, A.A. GEVORGYAN
REDUCING THE PROBABILITY OF NPP SYSTEMS' FAILURES THROUGH
RISK-INFORMED INSPECTIONS

During the inspections performed at the NPP, many system components are checked. Traditional deterministic inspections are mostly based on the data from the known operating experience, without considering the risk-significance of the components. One of the in-service inspection routes includes checking the components and pumping stations of ESW (Essential service water) system. For the system, it is shown that replacing the traditional deterministic inspections by risk-informed ones will allow to correctly identify the components to be checked during inspections, which will significantly increase the efficiency of inspection and reduce the probability of the system failure several times.

Keywords: risk-informed, inspections, probabilistic safety analysis, NPP.

Խ.Հ. ՄԱՆԱՍԵԼՅԱՆ, Ա.Գ. ՂՈՒԼՅԱՆ, Ս.Ա. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ՌԵԳԵՆԵՐԱՑԻՈՆ ԶԵՐՄԱ-ԷԼԵԿՏՐԱՔԻՄԻԱԿԱՆ ԱՂԲՅՈՒՐ

Նկարագրված է փոքր հզորությամբ էլեկտրական էներգիայի՝ ակտիվացված փայտածխային հիմքով ջերմա-էլեկտրաքիմիական աղբյուր, որը կարող է կիրառվել որպես առանձին էներգահավաք սարք, ինչպես նաև համակցվել էլեկտրական էներգիայի այլ աղբյուրների հետ:

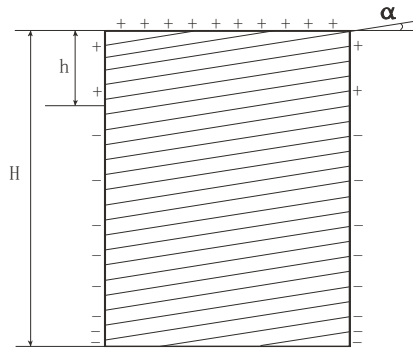
Առանցքային բառեր. ակտիվացված փայտածուխ, էլեկտրաքիմիական աղբյուր, ռեգեներացիոն բևեռափոխություն:

Ներածություն: Բնապահպանական, էներգախնայողական և հրատապ բնույթի այլ քաղաքակրթական պահանջներից ելնելով՝ աշխարհի զարգացած երկրների շատ գիտնականներ ինտենսիվ հետազոտություններ են կատարում էլեկտրական էներգիայի նոր, առավել արդյունավետ և թարմացվող (Renewable Electric Sources - RES) աղբյուրներ ստեղծելու ուղղությամբ: Էլեկտրական էներգիայի այդպիսի այլընտրանքային աղբյուրների հիման վրա ստեղծվում և շահագործման են հանձնվում զանազան նոր տեխնիկական սարքեր, մրցունակ տրանսպորտային միջոցներ, կենցաղային հարմարավետ էլեկտրական սարքեր, տեղայնացված փոքր և միջին հզորությամբ էլեկտրակայաններ, ավելի հզոր ու տարողունակ կուտակիչներ, փոքրածավալ ու շարժունակ լիցքավորող սարքեր և այլն:

Էներգետիկական նպատակներով օգտագործվող նյութերից մեկը՝ փայտածուխը, կիրառվում է անհիշելի ժամանակներից: Սակայն փորձերը ցույց են տալիս [1], որ փայտածուխն ունի դեռևս չբացահայտված հատկություններ և որակներ, որոնք լրացուցիչ հետազոտությունների կարիք ունեն:

Աշխատանքը վերաբերում է էլեկտրական էներգիայի՝ փայտածխային հիմքով ջերմա-էլեկտրաքիմիական աղբյուր ստեղծելուն, որը կարող է կիրառվել որպես առանձին EH սարք, ինչպես նաև համակցվել էլեկտրական էներգիայի այլ աղբյուրների հետ: Հատկապես արդյունավետ կարող է լինել այդ սարքի համակցումն արևային էներգիայի ֆոտովոլտային կամ ջերմային փոխակերպիչների հետ:

Աշխատանքի նկարագրությունը: [1]-ում նկարագրված է փայտածխի կտորի ակտիվացման ուրույն եղանակ, որի շնորհիվ դրա հակադիր հարթ մակերևույթները ջրային և ոչ ջրային էլեկտրոլիտների միջավայրերում ձեռք են բերում հակառակ նշանով լիցքեր, ինչի շնորհիվ նշված մակերևույթների էլեկտրաքիմիական պոտենցիալների միջև առաջանում է որոշակի տարբերություն (նկ. 1):



Նկ. 1. H-փայտածխի կտորի բարձրությունը, h-դրական լիցքերի տիրույթը, α -փայտածխի բնական շերտերի և ակտիվացված մակերևույթի միջև կազմված անկյունը ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$)

Փայտածխի նմուշի միակողմանի ակտիվացվածության Z աստիճանը գնահատվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$Z = \ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right), \quad (1)$$

որտեղ ρ_1 -ը փայտածխային նմուշի ակտիվացված մակերեսի տեսակարարար դիմադրությունն է, ρ_2 -ը՝ փայտածխային նմուշի չակտիվացված մակերեսի տեսակարարար դիմադրությունը:

Փայտածխի դեռևս չակտիվացված նմուշի դեպքում $\rho_1 = \rho_2 \approx 10^5 \dots 10^8$ Օմ-սմ, $\rho_1 / \rho_2 = 1$, $Z = 0$:

Որքան բարձր է Z – ի արժեքը, այնքան փայտածխային նմուշի էլշուն ավելի մեծ է ստացվում տվյալ էլեկտրոլիտի միջավայրում: Աղ. 1-ում բերված են $Z=3$ միակողմանի ակտիվացվածության աստիճան և հիմքի 1,5 սմ² մակերես ունեցող սկավառակաձև ($H=0,3$ սմ) 8 միատեսակ փայտածխային նմուշների էլշունների մեծությունները՝ սենյակային ջերմաստիճանի 18...25°C բնական փոփոխության պայմաններում, իսկ աղ. 2-ում՝ նույն չափսերն ունեցող փայտածխային նմուշի էլշունի արժեքները՝ Z-ի տարբեր արժեքների և 20°C սենյակային ջերմաստիճանի դեպքում, երբ այն ընկղմվում է մեթանոլի 98%-անոց լուծույթի մեջ:

Աղյուսակ 1

Փայտածխային նմուշների էլշունների արժեքները տարբեր էլեկտրոլիտներում

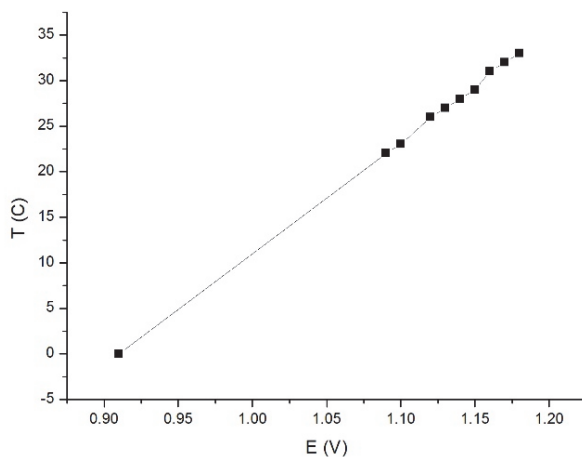
Էլեկտրոլիտ	Թորած ջուր	Հագեցած աղաջուր	Հագեցած սոդայաջուր	20% HCl	20% KOH	5% KMnO ₄	15% H ₂ SO ₄	98% CH ₃ OH
E(V)	0.13...0.18	0.15...0.20	0.23...0.28	0.18...0.23	0.25...0.30	0.28...0.32	0.30...0.35	0.45...0.50

Էլշուի կախվածությունը ակտիվացման Z աստիճանից

Z	2.5	3.0	4.0	4.5
$E(V)$	0.23...0.35	0.45...0.50	0.53...0.58	0.62...0.75

Աղ. 1-ում նշված էլեկտրոլիտների չորանալուց կամ ցնդելուց հետո էլշուների արժեքները հավասարվում են զրոյի: Ուստի, որպեսզի փայտածխային նմուշն ավելի երկար ժամանակով պահպանի էլշուի մեծությունը, հետագա փորձերը կատարվել են այնպիսի էլեկտրոլիտով, որն օժտված է շրջակա միջավայրից ջուր կլանելու հատկությամբ և միաժամանակ ունի բարձր իոնային հաղորդականություն: 85 և ավելի բարձր տոկոսանոց օրթոֆոսֆորական թթուն (H_3PO_4), որը, ինչպես հայտնի է, կիրառվում է ժամանակակից PAFC տիպի թարմացվող աղբյուրներում [2], օժտված է հենց այդպիսի հատկություններով և ջերմաստիճանների լայն տիրույթում ($0...200^\circ C$) երկար ժամանակ ($40\ 000$ ժ և ավելի [2]) պահպանում է իր հեղուկ վիճակը և իոնային հաղորդականությունը: Վերջինս մեծանում է ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց, սակայն ավելի բարձր ջերմաստիճանների դեպքում օրթոֆոսֆորական թթուն լրիվ ջրազրկվում է՝ վերածվելով պիրոֆոսֆորական թթվի ($H_4P_2O_7$):

Վերը նշված թույլատրելի ջերմաստիճանների տիրույթում միակողմանի ակտիվացված և օրթոֆոսֆորական թթվով խոնավացված փայտածխի կտորի էլշուի մեծությունը կարող է ծառայել որպես տվյալ միջավայրի ջերմաստիճանի ցուցիչ (ջերմաչափ), եթե այն նախապես տրամաչափարկվի ջերմաստիճանի փոփոխությանը համապատասխան (նկ. 2):

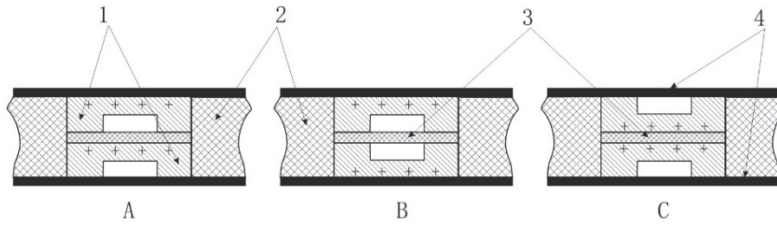


Նկ. 2. Փայտածխային հիմքով էլեկտրաքիմիական աղբյուրի էլշուի կախվածությունը միջավայրի ջերմաստիճանից

Փայտածխային նմուշի ակտիվացված և չակտիվացված մակերևույթներին միևնույն մետաղից պատրաստված (Zn, Al, Fe, Ti և այլն) հոսանքահավաք էլեկտրոդներ ամրակայելու կամ պարզապես հպելու դեպքում այն վերածվում է պարզ կառուցվածք ունեցող հոսանքի աղբյուրի, որի արտաքին շղթային միացված բեռով անցնող հոսանքի մեծությունը գծայնորեն կախված է միջավայրի ջերմաստիճանից:

Ելքային հզորության մեծացման նպատակով աղբյուրի ներքին կառուցվածքի հետագա մի քանի բարդացումների հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ ջերմաստիճանից ելքային հոսանքի կախվածության ուղղագծային կապը որոշ դեպքերում կարող է խախտվել և ձեռք բերել անկայուն, ռեզոնանսային բնույթ, ինչը կարող է հանգեցնել նաև աղբյուրի բևեռների նշանափոխության: Մասնավորապես, աղբյուրի ներքին կառուցվածքի բարդացման այդպիսի օրինակ է մեկի փոխարեն երկու միակողմանի ակտիվացված և նույն չափսերն ունեցող փայտածխային նմուշների օգտագործումը, որոնք իրարից առանձնացված են օրթոֆոսֆորական թթվով ներծծված զատիչով (separator): Փորձերը ցույց են տալիս, որ այդպիսի աղբյուրը ձեռք է բերում ցայտուն արտահայտված ջերմա-էլեկտրաքիմիական աղբյուրի հատկություններ:

Աղբյուրի ներսում փայտածխային նմուշների և զատիչի փոխդասավորության հնարավոր երեք տարբերակները պատկերված են նկ. 3-ում: Նկ. 3-A-ում փայտածխային նմուշների ակտիվացված և չակտիվացված մակերևույթների փոխդասավորությունը կենտրոնում տեղադրված զատիչի նկատմամբ պայմանականորեն անվանել ենք ներաղբյուրային կամ ներքին հաջորդական միացում (ՆՀՄ), իսկ նկ. 3-ի B և C դեպքերը՝ ներքին զուգահեռ միացում (ՆԶՄ): Էլեկտրատեխնիկայում կիրառվող աղբյուրների հաջորդական և զուգահեռ արտաքին միացումներից դրանք տարբերվում են նրանով, որ հոսանքի աղբյուր հանդիսացող փայտածխային նմուշների զույգերը գտնվում են միևնույն էլեկտրոլիտի միջավայրում և, հետևաբար, իրենց ներքին հոսանքի առումով անկախ չեն: Այդ պատճառով, եթե նմուշներն ունեն նույն երկրաչափական չափսերն ու միակողմանի ակտիվացվածության նույն Z աստիճանը, և աղբյուրն օրվա ընթացքում գտնվում է ջերմադինամիկական քիչ թե շատ կայուն հավասարակշռության վիճակում (երբ ամբողջ աղբյուրը կամ դրա մետաղական էլեկտրոդներից մեկը հատուկ չի տաքացվում որևէ ջեռուցիչով), ապա ՆՀՄ դեպքում ընդհանուր էլշուն փոքր է ստացվում փայտածխային նմուշների առանձին էլշունների գումարից, իսկ ՆԶՄ դեպքում՝ ընդհանուր էլշունի արժեքը որոշակի փոքր լայնությամբ և անկանոն պարբերությամբ տատանվում է զրոյական արժեքի շուրջը:

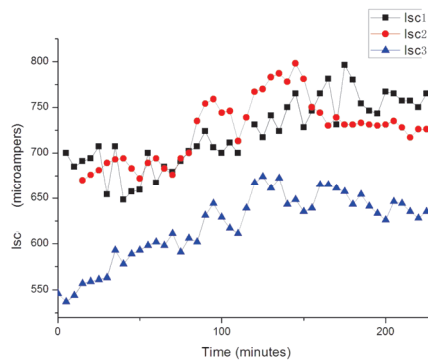


Նկ. 3. A-ՆՀՄ, B և C-ՆՁՄ. 1 – փայտածխային նմուշներ, 2 – դիֆուզիոն կրիչ, 3 – գառիչ, 4 – հոսանքահավաք մետաղական էլեկտրոդներ

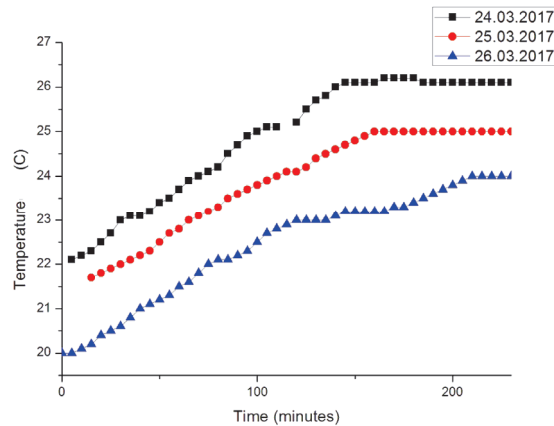
Նկ. 3-ում «+» նշանով նշված են միակողմանի ակտիվացված փայտածխային նմուշների ակտիվացված մակերևույթները: Որպես դիֆուզիոն կրիչ (2) բոլոր երեք տարբերակներում օգտագործվել է ֆտորապլաստե թիթեղ, որն օժտված է հիդրոֆոր հատկությամբ, ջերմակայուն է և ունի ծավալի ջերմային ընդարձակման փոքր գործակից:

ՆՀՄ դեպքի համար (A), երբ աղբյուրի բևեռների միջև անընդհատ ռեժիմով միկրոամպերմետր է միացված, կարճ միացման հոսանքի (Isc) փոփոխությունները, կախված սենյակային ջերմաստիճանի եռօրյա (ցերեկային 4 ժամերի) փոփոխությունից, բերված են համապատասխանաբար նկ. 4-ում և 5-ում: Ինչպես երևում է նկ. 4-ում, այս դեպքում հոսանքի (և էլշուրի) ջերմաստիճանային կախվածությունը ոչ թե ուղղագծային բնույթ է կրում, այլ պարզորոշ նկատելի են հոսանքի միջին արժեքի շուրջը փոքր լայնությամբ անկանոն տատանումներ:

Այդ տատանումների լայնությունը խիստ աճում է՝ ժամանակ առ ժամանակ հանգեցնելով բևեռների նշանափոխության, երբ ՆՀՄ կամ ՆՁՄ (B, C) աղբյուրների հոսանքահավաք մետաղական երկրենո էլեկտրոդներից մեկը որոշակի կարճ ժամանակով (5...10 րոպեի ընթացքում) տաքացվում է որևէ ջեռուցիչով, օրինակ՝ շիկացման լամպով, արևի էներգիայի խտացուցիչով և այլն:



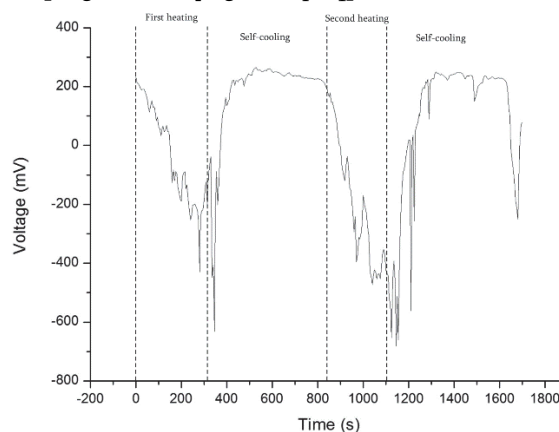
Նկ. 4. ՆՀՄ տիպի աղբյուրի կարճ միացման հոսանքի փոփոխությունը՝ կախված ժամանակից



Նկ. 5. Սենյակային ջերմաստիճանի փոփոխությունը՝ կախված ժամանակից

Նկ. 6-ում բերված է ՆՀՄ տիպի աղբյուրի բաց շղթայի լարման փոփոխության ժամանակային պատկերը, երբ հոսանքահավաք մետաղական (Zn) էլեկտրոդներից մեկը (դրական բևեռը) կարճատև ժամանակահատվածներով տաքացվում է և ապա, մի փոքր ավելի երկար ժամանակահատվածի ընթացքում, բնական ճանապարհով (ինքնաբերաբար) հովացվում:

Նույնպիսի բուռն գործընթացներ են դիտվում նաև ՆԶՄ տիպի աղբյուրի բևեռներից մեկի տաքացման-հովացման դեպքում:



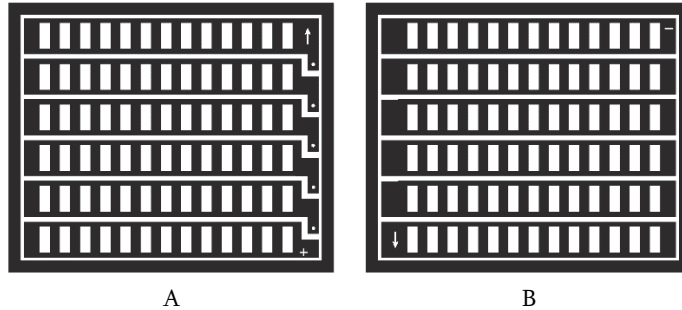
Նկ. 6. ՆՀՄ տիպի աղբյուրի բաց շղթայի լարման փոփոխության ժամանակային պատկերը

Հետազոտության արդյունքները: Փայտածխային հիմքով ջերմա-էլեկտրաբիմական աղբյուրի մի քանի փորձնական նմուշների համար անընդհատ ռեժիմով երկարաժամկետ (1 տարի և ավելի) իրականացված՝ ելքային պարամետրերի չափումների արդյունքները (որոնց մի փոքր մասն է միայն ներկայացված նկ. 4-ի և

6-ի միջոցով) ցույց են տալիս, որ բաց շղթայի լարման առումով դրանք համեմատելի են և որոշ ջերմային ռեժիմների դեպքում նաև գերազանցում են արևային էներգիայի ֆոտովոլտային փոխակերպիչների մոնո-բջիջներին, որոնք աշխարհագրական միջին լայնություններում արևի ուղիղ ճառագայթների տակ ապահովում են 0,6...0,7 Վ լարում:

Օգտագործվող էլեկտրոլիտի իոնային հաղորդականության բավարար մեծացման շնորհիվ՝ կարող են համեմատելի դառնալ նաև էլեկտրաէներգիայի այդ երկու տեսակի աղբյուրների արտաքին շղթաներով անցնող հոսանքների մեծությունները: Ուստի նախատեսում ենք հետագա աշխատանքի ընթացքում մանրակրկիտ հետազոտություններ կատարել՝ օգտագործվող էլեկտրոլիտի տեսակի և բաղադրության հնարավորինս ճիշտ ընտրության նպատակով: Օրինակ՝ մեր նախնական փորձերը ցույց են տալիս, որ օրթոֆոսֆորական թթվին որոշակի փոքր քանակությամբ մանգանի օքսիդի (MnO_2) և/կամ ջրածնի գերօքսիդի (H_2O_2) հավելումը զգալիորեն մեծացնում է աղբյուրի արտաքին շղթայով անցնող հոսանքի մեծությունը: Ուշագրավ հեռանկարային արդյունքներ է խոստանում նաև օրթոֆոսֆորական թթվի փոխարեն ծծմբով հարստացված մոլիբդենի սուլֆիդի (MoS_x , $x=3^{2/3}$) օգտագործումը, որը, բացի այն բանից, որ օրթոֆոսֆորական թթվին զգալիորեն գերազանցում է շրջակա միջավայրից ջուր կլանելու հատկությամբ (hygroscopicity), ունի նաև լույսի ազդեցությամբ ջուրն առանց էլեկտրոլիզի դիսոցելու հատկություն [3]: Վերջին հատկությունը լայն հնարավորություններ կարող է ընձեռել, որպեսզի սույն աշխատանքում նկարագրված փայտածխային հիմքով ջերմա-էլեկտրաքիմիական աղբյուրներն արդյունավետ կերպով համակցվեն ինչպես արևային էներգիայի ֆոտովոլտային փոխակերպիչների, այնպես էլ ջրածնային «վառելիքով» աշխատող՝ PAFC և այլ տիպի էլեկտրաքիմիական գեներատորների հետ:

ՆՀՄ կամ ՆՋՄ տիպի մի քանի միանման աղբյուրներ ընդհանուր դիէլեկտրիկական կրիչի վրա արտաքին հաջորդական-գուգահեռ միացումների միջոցով տեղակայելով՝ հնարավոր է ստեղծել կիրառական նշանակություն ունեցող ջերմա-էլեկտրաքիմիական գեներատոր կամ EH սարք, որը հնարավոր կլինի օգտագործել ինչպես առանձին՝ որպես էլեկտրաէներգիայի անկախ կամ պահուստային աղբյուր, այնպես էլ որևէ այլ տիպի աղբյուրի, օրինակ՝ արևային էներգիայի ֆոտովոլտային կամ ջերմային փոխակերպիչների հետ համակցելով: Նկ. 7-ում պատկերված է մեր կողմից այդ նպատակի համար նախագծված ընդհանուր դիէլեկտրիկական կրիչի տեսքը, որի A (դրական բևեռ) և B (բացասական բևեռ) մակերևույթային կողմերից երևացող պրիզմայաձև խոռոչները նախատեսված են ՆՀՄ կամ ՆՋՄ տիպի միանման աղբյուրների տեղակայման համար:



Նկ. 7. Բջջային ջերմա-էլեկտրաքիմիական աղբյուրի դիէլեկտրիկական կրիչը՝ դրական (A) և բացասական (B) բևեռներով

Քանի որ այստեղ նկարագրված ՆՀՄ և ՆՁՄ տիպի աղբյուրների արտաքին շղթայով անցնող հոսանքը, կարճաժամկետ տաքացումների և հովացումների ընթացքում և դրանց հետևանքով, նշանափոխ բնույթ է կրում, ապա ներկայացվող նախագծի շրջանակներում անհրաժեշտ է ստեղծել նաև փոփոխական հոսանքը հաստատունի վերածող սարք (AC to DC Convertor), առանց որի, ըստ էության, հնարավոր չէ առանձին EH սարքերը համակցել ինչպես իրար հետ, այնպես էլ էլեկտրական էներգիայի այլ տիպի աղբյուրների հետ: Խնդրի իրագործման դժվարությունն այն է, որ հոսանքի աղբյուրի լարման մեծության բացարձակ արժեքը տատանվում է 0...2Վ լարման տիրույթում, և դասական ուղղման մեթոդներից (օրինակ՝ դիոդների միջոցով) օգտվելն էներգետիկ առումով լրիվ անիմաստ է՝ դրանց չափազանց ցածր օ.գ.գ. ունենալու պատճառով: Նմանատիպ EH սարք և նշված խնդրին լուծում տվող AC/DC փոխակերպիչը նկարագրված են, օրինակ, [4]-ում, որտեղ միջավայրում առկա վիբրացիաների մեխանիկական էներգիան անշարժ կոճի և շարժական մագնիսի միջոցով վերածվում է նշանափոխ էլեկտրական հոսանքի:

Սակայն [4]-ում ներկայացված AC/DC փոխակերպիչի սխեման, որը պարունակում է անկախ սնուցման աղբյուր, օգտագործվող էլեկտրոնային սխեմաների նախնական սնուցումն ապահովելու առումով մեր դեպքում կիրառելի չէ, քանի որ 0,4 Վ-ը գերազանցող և հակառակ բևեռականություն ունեցող լարումից կարող են բացվել [4]-ում նկարագրված սխեմայում առկա այն կիսահաղորդչային էլեմենտների p-ո անցումները, որոնք տվյալ բևեռականության դեպքում պարտադիր պետք է փակ մնային: Անհրաժեշտ է նաև, որ լրացուցիչ սնուցման աղբյուրից ծախսված նախնական էներգիան լինի չափազանց փոքր այն էներգիայից, որն ակնկալում ենք ստանալ մեր հոսանքի աղբյուրից՝ դրա մի մասը հատկացնելով լրացուցիչ սնուցման աղբյուրի վերալիցքավորմանը: Նախատեսվում է օգտագործել լարման փոխակերպման այնպիսի մեթոդներ և փոխակերպող էլեկտրոնային

սխեմաների այնպիսի բազա, որոնք թույլ կտան նաև համեմատաբար էժան գներով էներգիա կուտակել մեծ թվով հոսանքի աղբյուրներից՝ ապահովելով փոխակերպիչ սարքերի բարձր արդյունավետությունը:

Նախատեսում ենք AC/DC փոխակերպիչի նոր, ավելի արդյունավետ սխեմա մշակելու և պատրաստելու միջոցով լուծում տալ նաև այդ մասնավոր խնդրին:

Եզրակացություն: Հոսանքահավաք միևնույն մակերեսների դեպքում փայտածխային հիմքով ջերմա-էլեկտրաքիմիական աղբյուրն ակնհայտ առավելություններ ունի նաև կիսահաղորդչային ջերմաէլեմենտների համեմատ, ինչպես էլքային հզորության ու էներգատարողության, այնպես էլ գնային առումներով: Ի տարբերություն ֆոտովոլտային փոխակերպիչներում և ջերմաէլեմենտներում կիրառվող կիսահաղորդչային նյութերի, որոնք թանկարժեք են և իրենց բնական պաշարներով սահմանափակ, փայտածուխն էժան է և բնական ճանապարհով վերարտադրվող:

Աղբյուրի երկարաժամկետ օգտագործման առումով ՆԶՄ տիպի աղբյուրն ավելի գերադասելի կարող է լինել, քան ՆՀՄ տիպի աղբյուրը, քանի որ ՆԶՄ տիպի աղբյուրի ներսում ընթացող օքսիդա-վերականգնողական ռեակցիաների ուղղության քվադի-պարբերական փոփոխությունը՝ կապված աղբյուրի ջերմաստիճանային բևեռափոխությունների հետ, ավելի արդյունավետ կերպով կարող է կանխել հոսանքահավաք մետաղական էլեկտրոդներից մեկի միակողմանի քայքայման գործընթացը՝ ժամանակ առ ժամանակ վերականգնելով այն:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Patent RA № 3009 A. The Method of Preparing Electro-chemical Source/**Kh.H. Manaselyan.** - 2016.
2. **Sammes N., Bove R., Stahl K.** Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications // Current Opinion in Solid State and Materials Science.- 2004.- 8.- P. 372–378.
3. Surface Water Dependent Properties of Sulfur Rich Molybdenum Sulfides - Electrolyteless Gas Phase Water Splitting/ **T. Daeneke, N. Dahr, P. Atkin, et al** //ACS Nano.- 2017.- Vol. 11, issue 7.- P. 6782-6794.
4. **Madhuri K., Srujana A.** Low Voltage Energy Harvesting by an Efficient AC-DC Step-Up Converter// IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering.- 2013.- Vol. 7, issue 3.- P. 32-47.

ՀՀ ԳԱԱ ՌՖԷԻ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.08.2021:

Х.А. МАНАСЕЛЯН, А.Г. ГУЛЯН, С.А. САРГСЯН
РЕГЕНЕРАЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК

Описывается маломощный термоэлектрохимический источник электричества на основе активированного древесного угля, который может использоваться в качестве автономного устройства для сбора энергии, а также в сочетании с другими источниками электричества.

Ключевые слова: активированный уголь, электрохимический источник, регенерационная перемена полюсов.

KH.H. MANASELYAN, A.G. GHOULYAN, S.A. SARGSYAN
A REGENERATIVE ELECTROCHEMICAL SOURCE

A low-power thermo-electrochemical source of electricity based on activated charcoal, which can be used as a stand-alone device for energy harvesting system, as well as in combination with other sources of electricity is described.

Keywords: activated carbon, electrochemical source, regenerative pole reversal.

Ա.Ա. ԴՌՆՈՑԱՆ

ՀԱՄԱԿԱՐԳԱՅԻՆ ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՀՀ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՏՆՏԵՍՈՒԹՅԱՆ
ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ 2050 ԹՎԱԿԱՆԻ ԿԱՆԽԱՏԵՍՈՒՄՆԵՐԸ

Իրականացվել է էներգետիկ տնտեսության մոդելավորում՝ ըստ համակարգային դինամիկայի, Simantics System Dynamics ծրագրի միջոցով: Արտածվել են համակարգի կառուցվածքը, փոխազդեցությունները և 2021-2050 թթ. համակարգի վիճակի պարամետրերի փոփոխությունները: Արդյունքում՝ 2050 թվականին Հայաստանի էներգահամակարգում մեծ կշիռ են ձեռք բերելու Արևի և քամու էներգետիկ կայանները: Մյուս կողմից՝ իրենց դերը չեն կորցնի նաև Հայկական ԱԷԿ-ը և Հայաստանի ՋԷԿ-երը: Բնակչության աճը և արդյունաբերության զարգացումը կունենան նաև իրենց կարևոր ազդեցությունը էներգիայի պահանջարկի հարցում:

Առանցքային բառեր. համակարգային դինամիկա, էներգահամակարգ, էներգետիկ տնտեսության մոդելավորում:

Ներածություն: Էներգետիկ բնագավառի զարգացումը թափ է առնում բավական արագ տեմպերով: Ամբողջ աշխարհում, ինչպես նաև Հայաստանում փոփոխվում են էներգիայի աղբյուրների համամասնությունները ողջ էներգետիկական համակարգում: Այս փոփոխությունները ենթադրում են տնտեսական և տեխնիկական մարտահրավերներ, որոնց մոդելավորումը հնարավորություն է ընձեռում՝ ուսումնասիրելու մեծությունների փոխազդեցությունները:

Համակարգային դինամիկան ներկայացնում են մեծությունների կապերը, համակարգում դրանց փոխազդեցությունները, փոփոխման արագությունները և ազդող գործոնները [1]: Մեծ մասամբ համակարգային դինամիկան ներկայացվում են հոսքային դիագրամների միջոցով, որոնք ունենում են 4 հիմնական տարրեր՝ վիճակի պարամետրեր, փոփոխման արագություններ, հաստատուններ, փոփոխականներ [2]: Հոսքային դիագրամներում տարբերվում են նյութական և տեղեկատվական հոսքերը: Նյութական հոսքերը միավորում են վիճակի պարամետրերն իրենց փոփոխման արագություններին, իսկ տեղեկատվական հոսքերը հաստատում են փոխազդեցությունների կապեր բոլոր չորս տարրերի միջև: Կապերը լինում են ինչպես դրական, այնպես էլ բացասական: Համակարգային դինամիկան դիֆերենցիալ հավասարումների շարքերն են՝ ներկայացված գրաֆիկական եղանակով [3]:

Արդյունաբերության տարբեր ոլորտներում, տնտեսական կանխատեսումներում համակարգային դինամիկան ունի լայն կիրառություն և կախված հաշվի առնվող գործոններից՝ մեծ ճշգրտությամբ որոշում է համակարգի առաջխաղացման սցենարները [4]: 1972 թվականին իրականացված հետազոտությունը Երկրի ռեսուրսների սպառման կանխատեսման վերաբերյալ համակարգային դինամիկայի ամենամեծ կիրառություններից մեկն է [5]: World3 մոդելը պարունակում էր աշխարհի տնտեսության ճյուղերը, արդյունաբերությունը, բնակչության աճը, ռեսուրսների ծախսը, վերականգնվող ռեսուրսների հայտնաբերումն ու դրանց օգտագործումը, շահավետությունը: Մոդելի տարատեսակ սցենարներով կանխատեսվում էր գազի և նավթի ռեսուրսների սպառում մինչև 2045 թվականը:

Մեկ այլ մոդելով նիդերլանդական Shell ընկերությունը կանխատեսում էր 21-րդ դարում տրանսպորտի և վառելիքի ծախսի ոլորտներում գազի, նավթի, վերականգնվող էներգիայի մասնաբաժինները [6]: Այս մոդելով պարզ է դառնում, որ նավթի դուրսմղման և վերականգնվող էներգիայի առաջխաղացման արդյունքում տրանսպորտի ոլորտում անհրաժեշտ է նաև այլ էներգակիր, որը երկու տարբեր սցենարներում նախատեսվում էր մեթան գազը կամ ջրածինը:

Մեկ այլ աշխատանքում մոդելավորվել է Գերմանիայի էներգետիկ համակարգի ապագան մինչև 2050 թվականը, գնահատվել են վերականգնվող էներգետիկայի հնարավորությունները, որոշվել անհրաժեշտ գազի մթնոլորտ արտանետումների քանակները [7]:

Այս մոդելները ցույց են տալիս, որ 21-րդ դարում վերականգնվող էներգետիկան դառնալու է էներգիայի արտադրության առաջնային նշանակության ուղղություն [8,9]: Մյուս կողմից, հաշվի առնելով վերականգնվող էներգիայի աղբյուրների ոչ հաստատուն արտադրություն ապահովելու փաստը, անհրաժեշտ է ծածկել պահանջարկի մի մասը ավանդական էներգիայի աղբյուրներով: Մթնոլորտում աղտոտումներից խուսափելու համար ուսումնասիրվել են վերականգնվող էներգետիկ կայանքների աճի հնարավոր տեմպերը ՀՀ-ում մինչև 2050 թվականը, գնահատվել ՋԷԿ-երի միջոցով արտադրվող էներգիայի քանակը նույն ժամանակահատվածում, և որոշվել մթնոլորտ արտանետված CO₂-ի քանակը:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Համակարգային դինամիկայով մոդելների կառուցման համար օգտագործվում են հաստատուն մեծություններ՝ մուտքային տվյալներ և գործակիցներ, վիճակի պարամետրեր՝ ժամանակից և այլ գործոններից կախված փոփոխվող մեծություններ, որոնք բնութագրում են համակարգի վիճակը, և փոփոխման արագություններ [10]:

Հայաստանի Հանրապետության էներգետիկական համակարգի մոդելավորման համար որպես վիճակի պարամետրեր ընդունվել են՝

- ՀՀ բնակչությունը,

- էլեկտրաէներգիայի պահանջարկը,
- համախառն ներքին արդյունքը,
- շրջակա միջավայրի պաշտպանությանը վերաբերող պետական քաղաքականությունն արտահայտող գործակիցը,

- մթնոլորտ արտանետված ածխաթթու գազի ընդհանուր քանակը,
- ատոմային էլեկտրակայանների դրվածքային հզորությունը,
- քամու էլեկտրակայանների դրվածքային հզորությունները,
- արևային էլեկտրակայանների դրվածքային հզորությունները:

Վիճակի պարամետրերի փոփոխությունները կայանում են փոփոխման արագություններով: Մոդելում ներկայացված արագություններն են՝

- բնակչության աճ (ծնունդներ),
- բնակչության նվազում (մահեր),
- էլեկտրաէներգիայի պահանջարկի փոփոխություն,
- ածխաթթու գազի արտանետում,
- ՀՆԱ-ի աճ,
- պետական քաղաքականության փոփոխություն,
- ատոմային էլեկտրակայանների կառուցում,
- քամու էլեկտրակայանների կառուցում,
- արևային էլեկտրակայանների կառուցում,
- արևային էլեկտրակայանների ապամոնտաժում:

Համակարգում մուտքային պարամետրերից կախված օգտագործված փոփոխականներն են՝

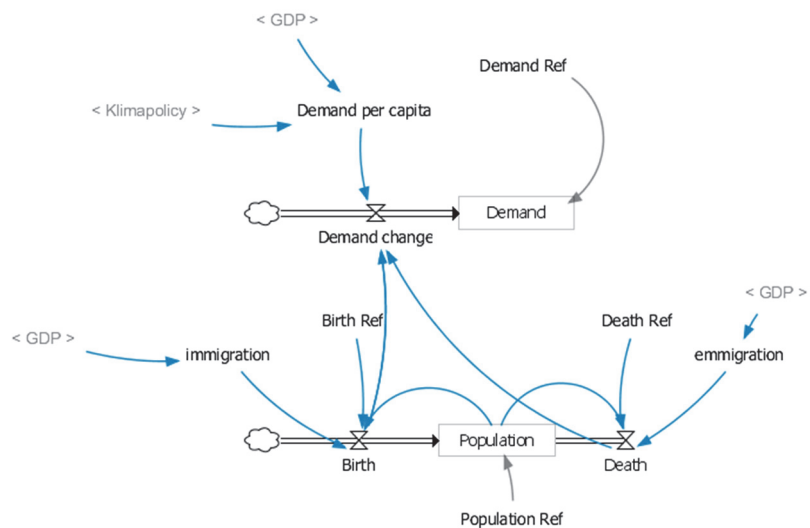
- էլեկտրաէներգիայի մեկ շնչին հասնող պահանջարկը,
- ներգաղթը,
- արտագաղթը,
- ատոմային էլեկտրական էներգիայի տարեկան արտադրանքը,
- հիդրոէլեկտրակայանների արտադրած էներգիան,
- գազային էլեկտրակայանների տարեկան արտադրած էներգիան,
- քամու էլեկտրակայանների տարեկան արտադրած էներգիան,
- արևային կայանների տարեկան արտադրած էներգիան,
- քամու էլեկտրակայանների կառուցման դիմադրությունը հասարակության կողմից,

- արևային էլեկտրակայանի տարեկան աշխատանքային ժամերը,
- արևային էլեկտրակայանների համար նախատեսված տարածքների սահմանափակումը:

Մոդելի ներկայացումն իրականացվել է համակարգային դինամիկայի դասական մեթոդով՝ գրաֆիկական պատկերման եղանակով՝ Simantics System Dynamics

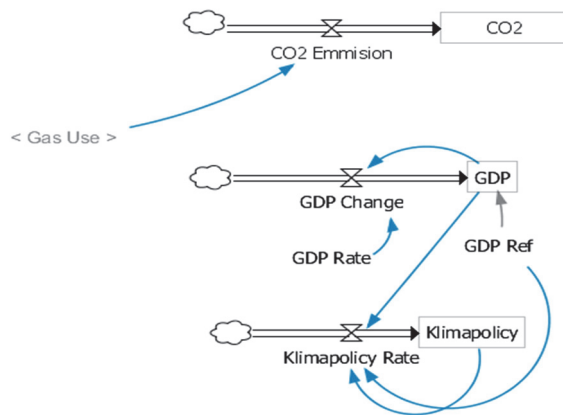
ծրագրային ապահովման միջոցով [9]: Ծրագիրը հնարավորություն է տալիս սիմուլացնել համակարգը՝ նշելով սկզբնական և վերջնական տարեթվերը, սիմուլյացիայի մեկ քայլի երկարությունը: Ծրագրում հնարավոր է ընտրել նաև դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգի լուծման մեթոդը: Մեր խնդրի ընթացքում ընտրվել է Էյլերի մեթոդը: Ծրագիրը հնարավորություն է տալիս սիմուլացնել համակարգը ինչպես դիտարկվող ողջ ժամանակահատվածում, այնպես էլ քայլ առ քայլ՝ տեսնելով փոփոխությունները և ընթացքում, անհրաժեշտության դեպքում, միջամտելով համակարգի աշխատանքին:

Նկ.1-ում բնակչության սկզբնական արժեքը՝ Population Ref-ը, կազմում է 2.935.000, Birth փոփոխման արագությունը արտահայտում է տվյալ ժամանակային փուլում ծնունդների և ներգաղթածների թվի գումարը, իսկ Death-ը՝ արտագաղթածների և մահերի գումարը: Ներգաղթյալների և արտագաղթածների թվերը որոշվում են՝ կախված պետության ՀՆԱ արժեքից:



Նկ. 1. ՀՀ էներգետիկ համակարգի մոդելի՝ բնակչության և էներգիայի պահանջարկի վիճակի պարամետրերի հոսքային դիագրամը

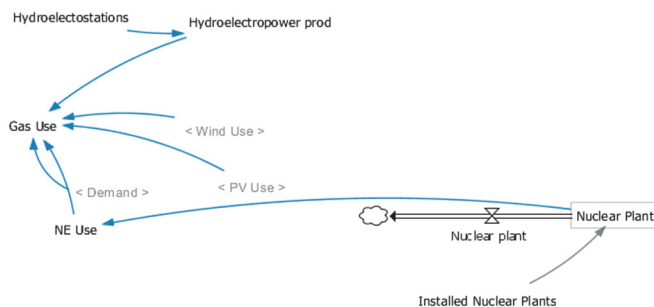
Նկ.2-ում ածխաթթու գազի մթնոլորտ արտանետումը որոշվում է ՋԷԿ-երի տարեկան օգտագործման և դրա հետևանքով արտանետված գազի քանակով: Մեկ շնչին բաժին հասնող ՀՆԱ-ի արժեքի տարեկան աճը սահմանվում է ՀՆԱ-ի աճի ներկայիս տեմպերով:



Նկ. 2. ՀՀ էներգետիկ համակարգի մոդելի 'ածխաթթու գազի արտանետման, ՀՆԱ-ի և շրջակա միջավայրի պահպանման պետական քաղաքականության վիճակի պարամետրերի հոսքային դիագրամը

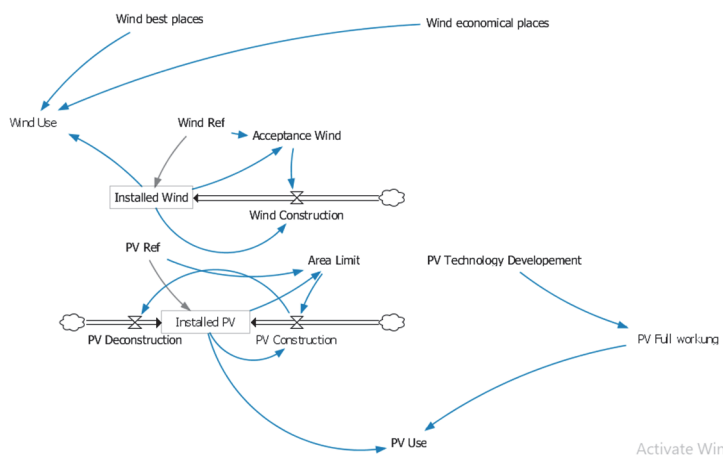
Շրջակա միջավայրի պաշտպանության գործակիցը կախված է ՀՆԱ-ի աճից, այսինքն՝ պետության զարգացածության աստիճանից:

Մոդելում ընդունվել է, որ պայմանավորված ջրային պաշարների սահմանափակմամբ, ինչպես նաև հիդրոէներգետիկայի բավարար զարգացածության աստիճանով՝ ՀՀ-ում մինչև 2050 թվականը նոր մեծամասշտաբ հիդրոէլեկտրակայաններ չեն կառուցվելու: Ուստի հիդրոէներգետիկայի օգտագործումը որոշվում է տարեկան աշխատանքային ժամերի և դրվածքային հզորության արտադրյալով: Ատոմային էներգետիկայի դեպքում հաշվի է առնվել, որ 2026 թվականին ՀՀ ԱԷԿ-ի դրվածքային հզորությունը նոր ռեակտորի կառուցմամբ հասցվելու է 600 ՄՎտ-ի: Ըստ մոդելի՝ տարվա ընթացքում ՋԷԿ-երը օգտագործվելու են այն դեպքում, երբ արևային, քամու, հիդրո- և ատոմային էներգիաները չեն բավարարի էլեկտրական էներգիայի պահանջարկը (նկ.3):



Նկ. 3. ՀՀ էներգետիկ համակարգի մոդելի 'ատոմային էլեկտրակայանների դրվածքային հզորության վիճակի պարամետրի և հիդրոէներգետիկայի ու ՋԷԿ-երի տարեկան արտադրած էներգիայի քանակի հոսքային դիագրամը

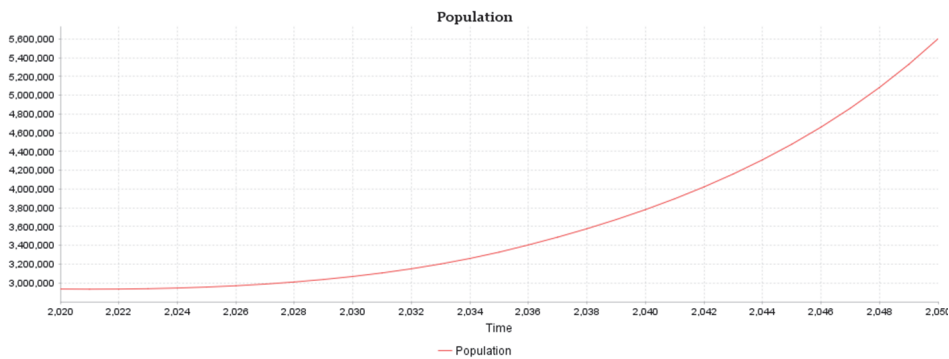
Նկ.4-ում որպես ներմուծվող պարամետրեր ներկայացվել են ՀՀ-ում քամու էլեկտրակայան տեղադրելու լավագույն և տնտեսապես շահավետ տարածքներում քամու էլեկտրակայանների տարեկան միջին աշխատանքային ժամերի քանակը, ներկայումս տեղադրված հզորությունը, արևային կայանների տեղադրված հզորությունը և աշխատանքային ժամերի միջին քանակը: Քամու և արևի էլեկտրակայանների տեղադրման տեմպերը հաշվարկելու համար օգտվել ենք երկու խոչընդոտող գործոններից՝ արևի դեպքում տարածքի սահմանափակումները, քամու դեպքում՝ հասարակության կողմից ընդունելիության գործակիցը:



Նկ. 4. ՀՀ էներգետիկ համակարգի մոդելի՝ քամու և արևային էլեկտրակայանների դրվածքային հզորությունների վիճակի պարամետրերի հոսքային դիագրամը

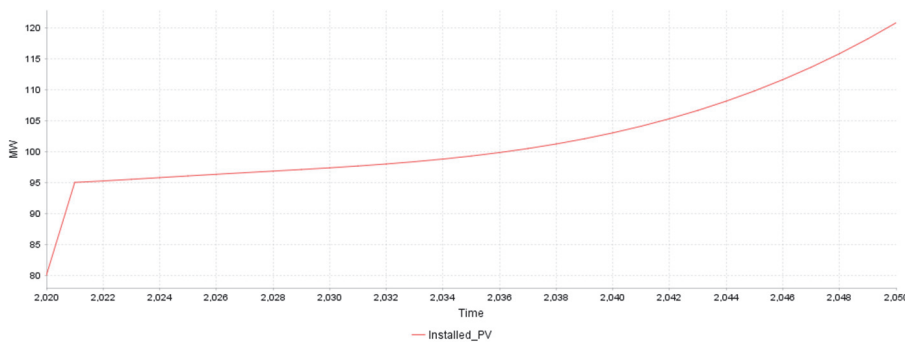
Մոդելում ներկայացված տարբեր ենթամոդելներն աշխատում են միասին մի ընդհանուր համակարգում: Ծրագրային ապահովման միջոցով հնարավոր է կառուցել ՀՀ էներգետիկ համակարգի փոփոխությունների կախվածությունը ժամանակից մինչև 2050 թվականը:

Հետազոտության արդյունքները: Որպեսզի ամփոփվեն հետազոտության արդյունքները, առանձնացվել են վիճակի պարամետրերից մի քանիսը, որոնք առանցքային են էներգահամակարգի համար: Նախ էներգիայի պահանջարկի և պետության զարգացման համար կարևոր նշանակություն ունի բնակչության փոփոխությունը: Մոդելավորված տվյալներով 2050 թվականին ՀՀ բնակչությունը կհասնի 5.6 մլն-ի և կցուցաբերի էքսպոնենցիալ աճի վարք (նկ.5):

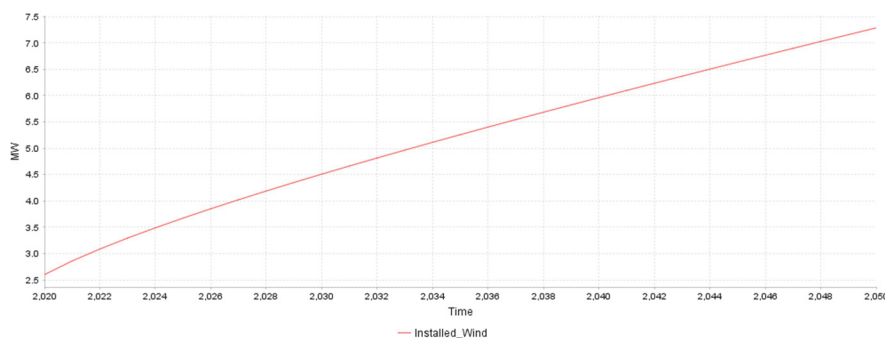


Նկ. 5. ՀՀ բնակչության աճը մինչև 2050 թվականը

Քանի որ վերականգնվող էներգիայի աղբյուրները ամենաարագ զարգացողն ու դինամիկն են, անհրաժեշտ է ուշադրություն դարձնել նաև 2050-ին արևային և քամու էլեկտրակայանների դրվաճքային հզորություններին (նկ.6,7): Մյուս կողմից՝ նմանատիպ կայանների տեղադրումն ու շահագործումը առաջացնում են մարտահրավերներ ցանցի կայուն աշխատանքի համար, ինչը պարտադիր է հաշվի առնել:



Նկ. 6. Արևային էլեկտրակայանների դրվաճքային հզորությունը ՀՀ-ում 2020-2050 թթ.



Նկ. 7. Քամու էլեկտրակայանների դրվաճքային հզորությունը ՀՀ-ում 2020-2050 թթ.

Ինչպես երևում է նկարներից, ի տարբերություն էքսպոնենցիալ աճող արևային էլեկտրակայանների հզորության, քանի որ էլեկտրակայանների հզորությունն աճում է լոգարիթմական գրաֆիկով և որոշակի արժեքի հասնելով՝ կայունանալու է: Արևային էլեկտրակայանների դրվածքային հզորությունը իր հերթին նույնպես հասնելու է մաքսիմումի կետին, ինչը, սակայն, տեղի չի ունենում դիտարկվող ժամանակահատվածի ընթացքում: Ըստ մոդելի՝ 2050-ին ՀՀ-ում կառուցված կլինեն 120 ՄՎտ արևային և 7.5 ՄՎտ քամու էլեկտրակայաններ: Այս արժեքներում հաշվի են առնվել նաև էլեկտրակայանների շարքից դուրս գալն ու ամորտիզացիոն ժամկետի ավարտը:

Եզրակացություն.

- մոդելավորվել է Էներգետիկ տնտեսության համակարգ՝ համակարգային դինամիկայի մեթոդով,
- իրանականացվել է մոդելի աշխատանքի սիմուլյացիա՝ մինչև 2050 թվականը, օգտագործելով 2020 թվականի տվյալները,
- արտածվել են Էներգիայի աղբյուրների տարեկան օգտագործման քանակները, էլեկտրակայանների դրվածքային հզորությունները, երկրի բնակչության, ՀՆԱ-ի արժեքները, մթնոլորտ արտանետված CO₂ գազի քանակը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. System dynamics review: The journal of the System Dynamics Society. - 1985.- 369 p., <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/10991727>
2. **Hamacher T., Gawlik J., Bujandric A., Vesperman N.** Modellierung von Energiesystemen: Lectures of TUM.- 2020.- 8 p.
3. **Dangerfield B.** System Dynamics: Theory and Applications // Springer.- 2020.- P. 3-7.
4. **Karnopp D., Margolis D., Rosenberg R.** System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems, fifth edition.- Wiley, 2012.- 5 edition.- 636 p. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118152812>
5. **Bardi U.** The limits to growth revisited // Springer Briefs in energy.- 2011.- P. 1-29, <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4419-9416-5>
6. Energy Needs, Choices and Possibilities.- Shell Group, 2001.- 64 p.
7. **Drnoyan A., Kälber S.** Modellierung des Energiesystems Deutschland / Teamprojekt an der TUM.- 2021.- 113 p.
8. **Knopf B., Nahmmacher P., Schmid E.** The European renewable energy target for 2030 – An impact assessment of the electricity sector // Energy policy.- 2015.- Vol. 85.- P. 50-60.
9. ՀՀ Էներգետիկայի բնագավառի զարգացման ռազմավարական ծրագիր (մինչև 2040).- 2020.- 61 էջ:
10. **Machowski J., Lubosny Z., Bialek J.** Power system dynamics: stability and control .- Wiley, 2012.-888 p.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան. Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 22.11.2021:

А.А. ДРНОЯН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИКИ РА МЕТОДОМ
СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ И ПРОГНОЗЫ НА 2050 ГОД**

Проведено моделирование энергетической экономики методом системной динамики с помощью программного обеспечения Simantics System Dynamics. Выражены структура системы, взаимодействия и изменения параметров состояния системы на 2021-2050 годы. Прогнозируется, что к 2050 году солнечная и ветровая энергетики получат большую долю в энергосистеме Армении. С другой стороны, Армянская атомная электростанция и Армянские тепловые электростанции не будут терять своей роли. Значительное влияние на спрос энергии оказывают также рост населения, развитие промышленности.

Ключевые слова: системная динамика, энергосистема, моделирование энергетической экономики.

A.A. DRNOYAN

**MODELING OF RA ENERGY ECONOMY BY THE METHOD OF SYSTEM
DYNAMICS AND FORECASTS FOR 2050**

Modeling of energy economy through system dynamics was carried out through Simantics System Dynamics software. The structure of the system, interactions, the changes of the parameters of the system state for 2021-2050 are expressed. As a result, by 2050 the Solar and wind power will gain a large share in the energy system of Armenia. On the other hand, the Armenian NPP and the Armenian thermal power plants will not lose their role. Population growth, industry development also have a significant impact on energy demand.

Keywords: system dynamics, energy system, modeling of energy economy.

Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

ՍԵՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՇԵՐՏՈՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԱՐԱՏՆԵՐԻ ՀԵՏԵՐԱՑՄԱՆ
ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Դիտարկվել է սիլիցիումային հարթակների կառուցվածքային արատների՝ սև սիլիցիումի (b-Si) մերձակերևության շերտով հետերացման հնարավորությունը: Հետերացման արդյունավետությունը գնահատվել է թեստային և ստուգիչ հարթակների տեսակարար դիմադրության, արատների խտության և ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողության հետազոտման արդյունքներով: Ցույց է տրվել, որ ջերմային օքսիդացման ընթացքում b-Si-ի շերտը հանդես է գալիս որպես հավելյալ միջանցուցային ատոմների և մետաղական խառնուրդների արդյունավետ կլանիչ (հետեր), դրանով իսկ էականորեն նվազեցնելով կառուցվածքային արատների սաղմերի խտությունը սիլիցիումում: Արդյունքում նվազում է հարթակների տեսակարար դիմադրությունը, և մեծանում է լիցքակիրների կյանքի տևողությունը: Նպատակահարմար է b-Si-ի շերտը որպես կլանիչ ձևավորել հարթակների թիկունքային՝ ոչ աշխատանքային կողմում:

Առանցքային բառեր. սև սիլիցիում, հետեր, կառուցվածքային արատ, տեսակարար դիմադրություն, լիցքակիրների կյանքի տևողություն:

Ներածություն: Սև սիլիցիումը (black silicon - b-Si) բյուրեղային սիլիցիումի նանոկառուցվածքային շերտ է՝ կազմված մեծ խտությամբ բարակ ասեղիկներից, որոնց բարձրությունը կարող է կազմել 0,3...10,0 մկմ, իսկ տրամագիծը՝ 0,05...1,0 մկմ [1]: Ասեղիկների առկայությունն այս նյութին տալիս է մուգ երանգավորում, որից էլ այն ստացել է իր անվանումը: Գրականության մեջ հաճախ b-Si-ն բնութագրվում է որպես ծակոտկեն սիլիցիումի տարատեսակ: Ինչպես և ծակոտկեն սիլիցիումը [2, 3], այն ևս ունի լուսային ճառագայթների կլանման բարձր գործակից, քանի որ մեծ խտությամբ հարակից ասեղիկներից տեղի են ունենում լուսային ճառագայթի բազմաթիվ անդրադարձումներ: Այդ հատկության շնորհիվ b-Si-ն հեռանկարային է որպես արևային էլեմենտների հակաանդրադարձնող մակերևութային շերտ, և ներկայումս իրականացվող հետազոտությունները կենտրոնացված են հենց այս խնդրի ուղղությամբ [4-6]:

Ծակոտկեն սիլիցիումի հետ կառուցվածքային նմանությունը թույլ է տալիս ենթադրել, որ b-Si-ն, ինչպես և իր նախորդ տարատեսակը, կարող է ունենալ գործառական այլ նշանակություններ ևս: Մասնավորապես, մեր նախորդ աշխատանքներում դիտարկվել էր ծակոտկեն սիլիցիումի շերտով կառուցվածքային

արատների արտաքին պլանար հետերացման (external planar gettering - EPG) արդյունավետությունը [7, 8]: Հիմնավորվել էր, որ սիլիցիումային հարթակի դիմային կողմի ոչ աշխատանքային տիրույթներում (օրինակ, հարթակների կտրատման համար նախատեսված մասերում) ձևավորված ծակոտկեն սիլիցիումի շերտը, մեծ մակերևութային մակերեսի շնորհիվ, բարձրջերմաստիճանային թրծման ընթացքում ներքաշում և կլանում է հարթակում առկա ոչ ցանկալի խառնուրդները (հիմնականում՝ մետաղական) և դրանով իսկ հետագա տեխնոլոգիական գործընթացների ժամանակ արգելակում աշխատանքային տիրույթներում այնպիսի կառուցվածքային արատների առաջացումը, ինչպիսիք են դիսլոկացիաները, օքսիդացման փաթեթավորման արատները (oxidation induced stacking faults - OISF) և այլն: Արդյունքում լավանում են այդպիսի հարթակների հիման վրա պատրաստվող կիսահաղորդչային սարքերի և ինտեգրալ միկրոսխեմաների աշխատանքային բնութագրերը, և մեծանում է պիտանի արտադրանքի ելքի տոկոսը:

Աշխատանքում դիտարկվել է սիլիցիումային հարթակների կառուցվածքային արատների՝ b-Si-ի մերձմակերևութային շերտով հետերացման հնարավորությունը:

Նմուշների պատրաստումը և հետազոտության մեթոդները: Որպես ելակետային կիրառվել են Չոխրալսկու մեթոդով աճեցված, բյուրեղագիտական (100) կողմնորոշմամբ, 2,0 *O_h* տեսակարար դիմադրությամբ և երկկողմանի ողորկված P-տիպի միաբյուրեղային արևային դասի (solar-grade) սիլիցիումային հարթակներ: Հարթակների չափսերն էին 100x100 *մմ*, իսկ հաստությունը՝ 350 *մկմ*:

Հարթակները ենթարկվել են 45 *րոպե* տևողությամբ բարձրջերմաստիճանային (1200°C) թրծման մաքրված ազոտի միջավայրում՝ կառուցվածքային արատների սաղմերի ներմուծման նպատակով: Այնուհետև հարթակները կտրատվել բաժանվել են 10x10 *մմ*² չափսերով առանձին թեստային և հսկիչ նմուշների, որից հետո 10 *րոպե* մաքրվել են երկմեթիլ ֆորմամիդի և ացետոնի լուծույթով, լվացվել իոնազրկված ջրով:

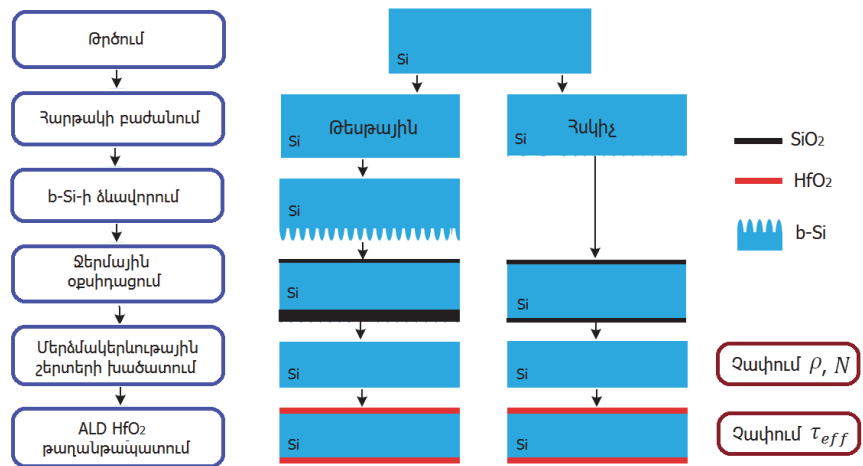
Մերձմակերևութային b-Si-ի շերտի ձևավորումն իրականացվել է իոնապլազմային մշակման սարքավորումում ռեակտիվ իոնային խաձատման մեթոդով SF₆-ի և O₂-ի գազային խառնուրդի միջավայրում թեստային նմուշների կողմերից մեկում: Խաձատման սարքավորումը և ռեժիմները նկարագրված են [9] աշխատանքում: Սև սիլիցիումի շերտի հաստությունը կազմում էր 0,9 *մկմ*:

Թեստային և հսկիչ նմուշներն օքսիդացվել են 850, 950 կամ 1100 °C ջերմաստիճաններում, 80 *րոպե* տևողությամբ չոր թթվածնի միջավայրում: Առաջացած օքսիդի երկկողմանի թաղանթները, այդ թվում՝ թեստային նմուշների b-Si-ի գրեթե ամբողջովին օքսիդացված շերտը, հեռացվել են նոսր HF-ի լուծույթում, որից հետո հարթակները 3 *րոպե* տևողությամբ ընկղմվել են KOH-ի լուծույթում: Արդյունքում հարթակների երկու կողմից էլ խաձատվել են մոտավորապես 4 *մկմ*

հաստությամբ մերձակերկության շերտեր: Վերջում նմուշներն ատոմաշերտային նստեցման (atomic layer deposition - ALD) մեթոդով երկկողմանի թաղանթապատվել են HfO_2 -ի մեկուսացնող բարակ ծածկույթներով [10]:

Հետերացման արդյունավետությունը գնահատելու համար հետազոտվել են նմուշների ρ տեսակարար դիմադրությունը (հպակային քառամիտցային մեթոդ, IYC-3 սարք), կառուցվածքային արատների N խտությունը (ընտրողական խաճատման և օպտիկական մանրադիտակով տեսազննման մեթոդ, Սիրտլի $\text{HF}:\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{O}$ խաճատիչ և MII-4 մանրադիտակ) և ոչ հիմնական լիցքակիրների τ_{eff} արդյուարար կյանքի տևողությունը (քվադիստացիոնար ֆոտոհաղորդականության մեթոդ, WCT-120 սարք):

Նմուշների պատրաստման և հետազոտման երթուղին պատկերված է նկ. 1-ում:

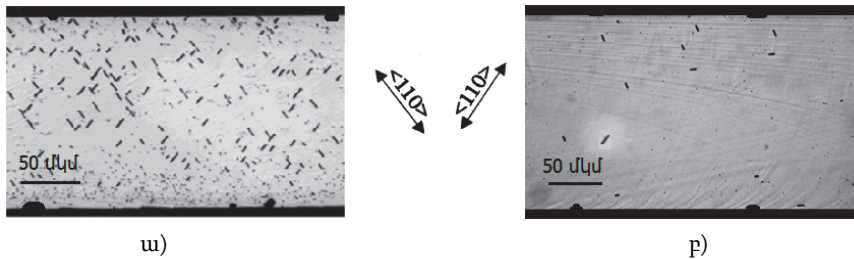


Նկ. 1. Նմուշների պատրաստման և հետազոտման գործընթացը

Հետազոտության արդյունքները: Նկ. 2-ում բերված են հսկիչ և թեստային հարթակների լայնական կտրվածքներին բնորոշ ֆոտոպատկերները ընտրողական խաճատումից հետո: Հստակ երևում են երկչափանի OISF-ների խաճատման հետքերը, որոնք ունեն մուգ գծիկների տեսք: Դրանք տեղաբաշխված են $\langle 110 \rangle$ բյուրեղագիտական ուղղություններով և միմյանց հետ կազմում են 60° անկյուն: OISF-ների հետ մեկտեղ ձևավորվում են նաև այլ տիպի արատներ, որոնց խաճատման հետքերն ունեն հարթ հատակով և տարբեր չափսերով մուգ փոսիկների տեսք: Վերջիններս SiO_x մետաղական տեղակալումներ (precipitations) և դիսլոկացիոն հանգույցներ են:

Նկ. 2-ից պարզորոշ հետևում է, որ b-Si-ի շերտի առկայությունը թեստային հարթակներում հանգեցնում է ներմուծված կառուցվածքային արատների խտու-

թյան մի քանի կարգով նվազմանը: Այսպես, 950°C ջերմաստիճանում օքսիդացումից հետո հսկիչ հարթակների մակերևույթին կառուցվածքային արատների խտությունը կազմում էր $(4...8) \times 10^5 \text{ սմ}^{-2}$, իսկ թեստային հարթակների դեպքում չէր գերազանցում 100 սմ^{-2} -ը:



Նկ. 2. Հսկիչ (ա) և թեստային (բ) հարթակների լայնական կտրվածքների ֆոտոպատկերները

Համաձայն պինդմարմնային բյուրեղագիտական տեսության՝ OISF-ները ներդրման արատներ են, որոնց առաջացումը պայմանավորված է օքսիդացման ընթացքում սիլիցիումի մակերևութային և ծավալային հավելյալ միջհանգուցային ատոմների վերակազմավորմամբ [11]: Տեղակալումների առաջացմանը նպաստում են հարթակներում առկա ոչ ցանկալի արագ դիֆուզիոն այնպիսի մետաղական խառնուրդներ, ինչպիսիք են Au-ն, Cu-ը, Fe-ը, Ni-ը և այլն: Կարելի է եզրակացնել, որ b-Si-ի շերտը, մեծ մակերևութային մակերեսի շնորհիվ, օքսիդացման ընթացքում ապահովում է նշված կառուցվածքային արատների առաջացման սաղմերի ներքաշում-կլանումը:

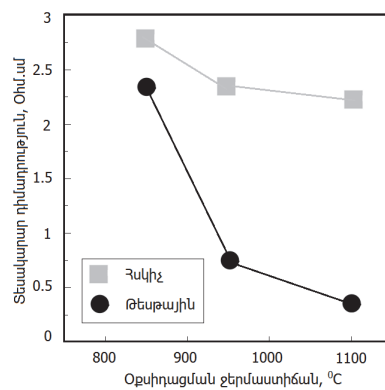
Նկ. 3-ում բերված են նմուշների տեսակարար դիմադրության արժեքները՝ կախված օքսիդացման ջերմաստիճանից: Ինչպես և ակնկալվում էր, կառուցվածքային արատների հետերացումը հանգեցնում է հսկիչ հարթակների համեմատ թեստային հարթակների տեսակարար դիմադրության առավել զգալի փոքրացմանը, քանի որ արատները փոքրացնում են կիսահաղորդիչների հաղորդականությունը [11]: Նմանատիպ արդյունքներ գրանցվել են նաև ծակոտկեն սիլիցիումի շերտով արատների հետերացման ժամանակ [12]:

Նկ. 4-ում բերված են նմուշների ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողություն կախվածությունները լիցքակիրների խտությունից (գեներացիայի մակարդակից): Նմուշների օքսիդացման ջերմաստիճանը կազմում էր $T=950^{\circ}\text{C}$: Նկարում ցույց են տրված նաև թեստային հարթակների τ_{eff} -ի արժեքներն օքսիդացման ջերմաստիճանի $T=850^{\circ}\text{C}$, 1100°C արժեքների և լիցքակիրների խտության 10^{15} սմ^{-3} արժեքի դեպքում:

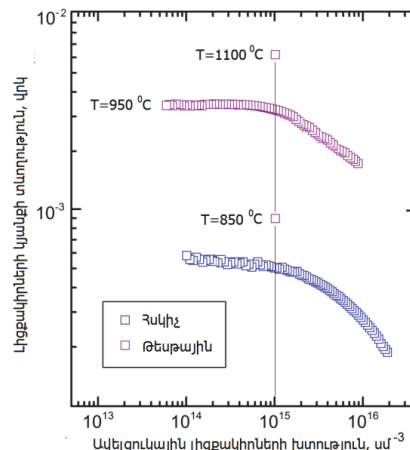
Ընդհանուր առմամբ ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունավետ կյանքի տևողությունը որոշվում է հետևյալ արտահայտությամբ [13].

$$\frac{1}{\tau_{eff}(\Delta n)} = \frac{(0,t)S_{front}(\Delta n)}{\Delta n_{av}(t)W} + \frac{1}{\Delta n_{av}(t)W} \int_0^W \frac{\Delta n(x,t)}{\tau_{bulk}(\Delta n)} dx + \frac{\Delta n(0,t)S_{rear}(\Delta n)}{\Delta n_{av}(t)W}, \quad (1)$$

որտեղ Δn -ն հավելյալ ոչ հիմնական լիցքակիրների խտությունն է, W -ն՝ հարթակի հաստությունը, S_{front} -ը և S_{rear} -ը՝ համապատասխանաբար հարթակի դիմային և թիկունքային մակերևույթների լիցքակիրների վերամիավորման արագությունները, τ_{bulk} -ն՝ ծավալային լիցքակիրների կյանքի տևողությունը, “ av ” ենթատողային ինդեքսով նշանակված է պարամետրի միջինացված արժեքը, t -ն բնութագրում է ժամանակը:



Նկ. 3. Հսկիչ և թեստային հարթակների տեսակարար դիմադրության արժեքները՝ կախված օքսիդացման ջերմաստիճանից



Նկ. 4. Հսկիչ և թեստային հարթակների ոչ հիմնական լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողությունը՝ կախված լիցքակիրների խտությունից

Ընդունելով, որ լիցքակիրների խտությունը հավասարաչափ է բաշխված հարթակի ծավալով,

$$\Delta n(x, t) \approx \Delta n_{av}(t) \text{ և } \Delta n(0, t) = \Delta n(W, t), \quad (1)$$

արտահայտությունից կստանանք.

$$\frac{1}{\tau_{eff}(\Delta n_{av})} = \frac{S_{front}(\Delta n_{av})}{W} + \frac{1}{\tau_{bulk}(\Delta n_{av})} + \frac{S_{rear}(\Delta n_{av})}{W}. \quad (2)$$

Մեր փորձերում լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողությունը չափելու փուլում դիմային և թիկունքային մակերևույթներն ամբողջովին նմանատիպ էին մշակված, հետևաբար՝

$$S_{front}(\Delta n_{av}) = S_{rear}(\Delta n_{av}) = S(\Delta n_{av}):$$

Բացի այդ, ինչպես ցույց է տրվել [14] աշխատանքում, ALD HfO_2 -ի ծածկույթն արդյունավետորեն մեկուսացնում է սիլիցիումային հարթակի մակերևույթները, հետևաբար՝ կարող ենք անտեսել մակերևութային վերամիավորման ներդրումը լիցքակիրների արդյունաբար կյանքի տևողության ընդհանուր արժեքի մեջ: Դա նշանակում է, որ $\tau_{eff}(\Delta n_{av})$ -ի չափումների արդյունքները մեծ ճշտությամբ արտահայտում են ծավալային լիցքակիրների կյանքի տևողությունը.

$$\tau_{eff}(\Delta n_{av}) \approx \tau_{bulk}(\Delta n_{av}): \quad (3)$$

Այսպիսով, հիմնվելով նկ. 4-ի տվյալների վրա, կարելի է փաստել, որ b-Si-ի շերտը խոչընդոտում է կառուցվածքային արատների առաջացմանը սիլիցումային հարթակների ծավալում, որն էլ հանգեցնում է ծավալային լիցքակիրների կյանքի տևողության մեծացմանը: Հետերացման արդյունավետությունը մեծանում է օքսիդացման ջերմաստիճանի բարձրացմանը զուգընթաց:

Գործնական տեսակետից նախընտրելի է b-Si-ի շերտը որպես կլանիչ (հետեր) ձևավորելը հարթակների թիկունքային՝ ոչ աշխատանքային կողմում: Այդպիսի արտաքին հետերացումն անվանում են կողմնային (external lateral gettering - ELG), և դրա կիրառման առավելությունը EPG-ի համեմատ պայմանավորված է հետևյալ հանգամանքով: EPG-ի դեպքում կառուցվածքային արատների ներքաշման առավելագույն հետավորությունը կազմում է մի քանի μm [7], հետևաբար՝ հետերացումն արդյունավետ է միայն փոքր չափսեր ունեցող չիպերով ինտեգրալ միկրոսխեմաների դեպքում: Դիսկրետ կիսահաղորդչային սարքերի (օրինակ, ուժային տրանզիստորներ և դիոդներ, վարիկապներ) չափսերը կազմում են տասնյակ μm , հետևաբար՝ արատների ներքաշումը սարքերի ոչ եզրային տիրույթներից դառնում է անհնարին: Ասվածն առավել ևս վերաբերում է արևային էլեմենտներին, որոնց ներկայիս չափսերը կազմում են $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ -ից մինչև $210 \times 210 \mu\text{m}^2$, իսկ հաստությունը չի գերազանցում 1 μm -ը: Այս դեպքերում նախընտրելի է կիրառել ELG՝ ձևավորելով հետերային մերձմակերևութային շերտը սիլիցիումային հարթակների թիկունքային կողմում:

Եզրակացություն: b-Si-ի շերտն օքսիդացման ընթացքում հանդես է գալիս որպես հավելյալ միջհանգուցային ատոմների և մետաղական խառնուրդների արդյունավետ կլանիչ, դրանով իսկ էականորեն նվազեցնելով կառուցվածքային արատների սաղմերի խտությունը: Արդյունքում որոշակիորեն փոքրանում է հարթակների տեսակարար դիմադրությունը, և նվազում է գեներացման-վերամիավորման կենտրոնների խտությունը սիլիցիումում: Դրա անմիջական վկայությունն է նաև լիցքակիրների կյանքի տևողության մեծացումը: Նախընտրելի է b-Si-ի շերտի՝ որպես կլանիչի ձևավորումը հարթակների թիկունքային՝ ոչ աշխատանքային կողմում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ayvazyan G.Y.** Crystalline, Porous and Black Silicon: Research and Application.- Yerevan: Chartaraget, 2020.- 240 p.
2. **Korotcenkov G.** Porous Silicon. From Formation to Application.- CRC Press, 2016.- 439 p. DOI: 10.1201/b19342.
3. **Omar K., Salman K.** Porous Silicon Solar Cell with Anti-reflection Coating Layer for Efficiency Improved // Pontr. – 2016. -V. 72, N. 5.- P. 190-208. DOI: 0.21506/j.ponte.2016.5.32.
4. **Katkov M.V., Ayvazyan G.Y., Shayapov V.R., Lebedev M.S.** Modeling of the Optical Properties of Black Silicon Passivated by Thin Films of Metal Oxides // J. of Contemp. Phys.- 2020. – V. 55, N 1. – P. 16-22. DOI: 10.3103/S106833722001003X.
5. **Lv J., Zhang T., Zhang P, Li S.** Review Application of Nanostructured Black Silicon // Nanoscale Res. Lett.- 2018.- V. 13.- P. 1-10. DOI: 10.1186/s11671-018-2523-4.
6. Black Silicon Photovoltaics / **M. Otto, M. Algasinger, H. Branz,** et al // Adv. Optical Mat. – 2015. – V. 3 (2). - P. 147-164. DOI: 10.1002/adom.201400395.
7. **Айвазян Г.Е.** Планарное геттерирование слоев пористого кремния // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2001.- Т. LIV, № 3. - С. 471-474.
8. **Айвазян Г.Е., Скворцов А.М.** Эффективность геттерирования структурных дефектов полупроводниковых пластин слоем пористого кремния // Изв. вузов. Сер. Приборостроение.- 2002.- Т. 45, № 7.- С. 63-65.
9. **Ayvazyan G.Y., Barseghyan R.N., Minasyan S.A.** Optimization of Surface Reflectance for Silicon Solar Cells // Green Energy and Smart Grids. E3S Web of Conferences. – 2018. - V. 69, 01008. - P. 1-4. DOI: 10.1051/e3sconf/20186901008.
10. Passivation Properties of Atomic-Layer-Deposited Hafnium Oxide on Black Silicon Surface / **G.Y. Ayvazyan., M.V. Katkov, M.S. Lebedev,** et al // Proc. of the 32nd Int. Conf. on Microelectronics.- 2021.- P. 145-147. DOI: 10.1109/ICMEL.2000.840575.
11. **Seibt M., Kveder V.** Gettering Processes and the Role of Extended Defects //Advanced Silicon Materials for PV Applications. - John Wiley & Sons Ltd., India, 2012.- P. 127-188. DOI: 10.1002/9781118312193.ch1.
12. **Kuzma-Filipek I., Hariharsudan S.R.** Porous Silicon Gettering // Handbook of Porous Silicon.- Springer, 2018.- P. 1121-1132. DOI: 10.1007/978-3-319-71381-6.
13. Application of Quasi-steady-state Photoconductance Technique to Lifetime Measurements on Crystalline Germanium Substrates / **I. Martin, A. Alcañiz, G. Lopez,** et al // IEEE J. of Photovoltaics.- 2020.- V.10 (4).- P. 1068-1075. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.2981839.

14. Anti-Reflection Properties of Black Silicon Coated with Thin Films of Metal Oxides by Atomic Layer Deposition / **G.Y. Ayvazyan., M.V. Katkov, M.S. Lebedev**, et al // J. of Contemp. Phys.- 2021. – V. 56, N 3. – P. 240-246. DOI: 10.3103/S1068337221030075.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 05.10.2021:

Г.Е. АЙВАЗЯН

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ СЛОЕМ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ

Рассмотрена возможность геттерирования структурных дефектов кремниевых подложек с приповерхностным слоем черного кремния (b-Si). Эффективность геттерирования оценивалась по результатам исследования удельного сопротивления, плотности дефектов и эффективного времени жизни неосновных носителей заряда на тестовых и контрольных подложках. Показано, что в процессе термического окисления слой b-Si служит эффективным стоком для избыточных межузельных атомов и металлических примесей, тем самым значительно уменьшая плотность зародышей структурных дефектов в кремнии. В результате снижается удельное сопротивление подложек и увеличивается время жизни носителей заряда. Целесообразно в качестве геттера слой b-Si формировать на обратной нерабочей стороне подложек.

Ключевые слова: черный кремний, геттер, структурный дефект, удельное сопротивление, время жизни носителей заряда.

G.Ye. AYVAZYAN

EFFICIENCY OF GETTERING STRUCTURAL DEFECTS BY A BLACK SILICON LAYER

The possibility of gettering structural defects of silicon substrates with a near-surface layer of black silicon (b-Si) is considered. The gettering efficiency was estimated according to the results of studying the resistivity, defect density, and effective minority carrier lifetime on test and control substrates. It is shown that in the thermal oxidation process, the b-Si layer serves as an effective drain for excess interstitial atoms and metallic impurities, thereby significantly reducing the density of nuclei of structural defects in silicon. As a result, the resistivity of the substrates decreases, and the carrier lifetime increases. It is advisable to form a b-Si layer as a getter on the rear non-working side of the substrates.

Keywords: black silicon, getter, structural defect, resistivity, carrier lifetime.

Գ.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ԿԱՊՈՒՂՈՒ ԶԵՎԱՎՈՐԻՉ

Նկարագրված են ալգորիթմ և FPGA-ի (Field-Programmable Gate Array)՝ վերակառ-
գավորվող ինտեգրալային միկրոսխեմայի կիրառմամբ իրականացված թեստավորման
արդյունքները: Ներկայացվող ալգորիթմի միջոցով հնարավոր է մուտքային թվայնացված
լայնաշերտ ազդանշանը տրոհել առանձին հաճախականային տիրույթների՝ վերջիններս
առանձին-առանձին մշակելու նպատակով: Տրոհված ազդանշանների տիրույթների առա-
վելագույն քանակը 1024 է: Ալգորիթմն ունի բազմաթիվ կարգավորումների հնարավորույթ-
յուն, յուրաքանչյուր առանձին տիրույթի տրոհման պարամետրերը հնարավոր է փոխել
աշխատանքի ընթացքում՝ իրական ժամանակում: Որպես կանոն, մուտքային ազդանշանի
դիսկրետացման հաճախականությունն ավելի մեծ է, քան առանձնացված առանձին տի-
րույթների դիսկրետացման հաճախականությունները: Այս ալգորիթմը հիմնականում կի-
րառվում է հարմարվողունակ ռադիոհամակարգերում և ազդանշանների ավտոմատ ճա-
նաչման համակարգերում, երբ անհրաժեշտ է լինում հետագոտել մուտքային ազդանշան-
ների պարամետրերը՝ առանձնացնելով դրանք առանձին տիրույթների և ենթատիրույթների:

Առանցքային բառեր. հարմարվողունակ ռադիոհամակարգ, ազդանշանի սպեկտր,
ճանաչողական ռադիոհամակարգ, կապուղու ձևավորիչ:

Ներածություն: Ներկայումս լայն կիրառում ունեն ծրագրային կառավար-
մամբ ռադիոհամակարգերը (Software Defined Radio): Դրանց առավելություններից
մեկն այն է, որ նմանակա-թվային փոխակերպիչը՝ ՆԹՓ և թվա-նմանակային փո-
խակերպիչը՝ ԹՆՓ, հնարավորինս մոտ են գտնվում անտենային, և ազդանշանի
մշակման գործընթացը տեղի է ունենում ծրագրային միջավայրում [1]: Նախնա-
կան փուլում անհրաժեշտ է ուսումնասիրել հաճախականային տիրույթի թվայ-
նացված հատվածի կառուցվածքը: Այդ նպատակով կատարվում է թվայնացված
տիրույթում առկա բոլոր ազդանշանների դասակարգում՝ ըստ թողարկման շերտի և
հզորության: Դասակարգման արդյունքում կազմվում է ազդանշանների ցուցակ՝
ըստ հզորության մակարդակի, այնուհետև տիրույթների տրոհման ալգորիթմի մի-
ջոցով այդ ազդանշաններն առանձնացվում են առանձին տիրույթների: Համա-
կարգի հիմնական բաղկացուցիչ հանգույցներն են՝ կապուղու ձևավորման վերա-
կարգավորվող բլոկը, հաճախականության վերակառգավորման բլոկը, համակար-
ման բլոկը, կրկնվող դիսկրետացման բլոկը:

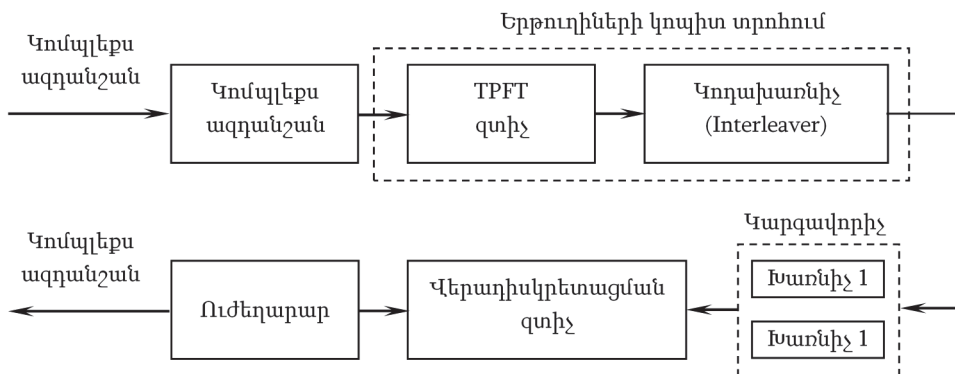
Հետազոտության մեթոդը: Առաջարկվում է մուտքային ազդանշանի առանձին ենթատիրույթների տրոհման սխեմա, որը թույլ կտա մի քանի տիրույթներում համատեղ օգտագործել ազդանշանների փոխակերպման վերակարգավորվող բլոկը:

Բազմապատկիչը և համատեղ կիրառվող բլոկերն օգտագործվում են՝ կրճատելու համար մաթեմատիկական միավորները՝ ազդանշանի վերակարգավորվող փոխակերպիչ բլոկում [2]:

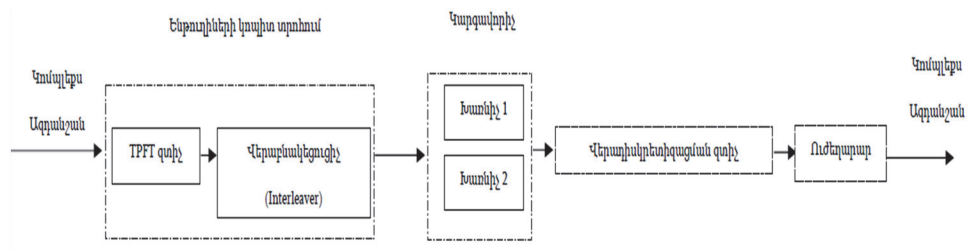
Համակարգի հիմնական գործառույթներից մեկն իրական ժամանակում ազդանշանի ենթատիրույթների տրոհումն է: Այս համակարգը ճկուն վերակարգավորվում է՝ հնարավորություն տալով աշխատելու կապի տարբեր ստանդարտներով: Մուտքային ազդանշանի տրոհումը ենթատիրույթների տեղի է ունենում մի քանի փուլերով, որոնք իրականացվում են ստորև ներկայացված հանգույցների միջոցով՝

- հաճախականության վերակարգավորող փոխակերպիչ,
- կոդախառնիչ՝ Interleaver,
- բազմուղի թվային խառնիչ՝ Mixer,
- բազմուղու փոփոխվող հապաղմամբ գտիչ՝ Ֆարրոյի ալգորիթմի կիրառմամբ,
- բազմուղի փուլային գտիչ [3]:

Հաճախականային շերտի տրոհման հանգույցների կառուցվածքը բերված է նկ. 1-ում, իսկ հաճախականային շերտի տրոհիչը ամբողջությամբ ներկայացված է նկ. 2-ում:



Նկ. 1. Հաճախականային շերտի տրոհման հանգույցների կառուցվածքը



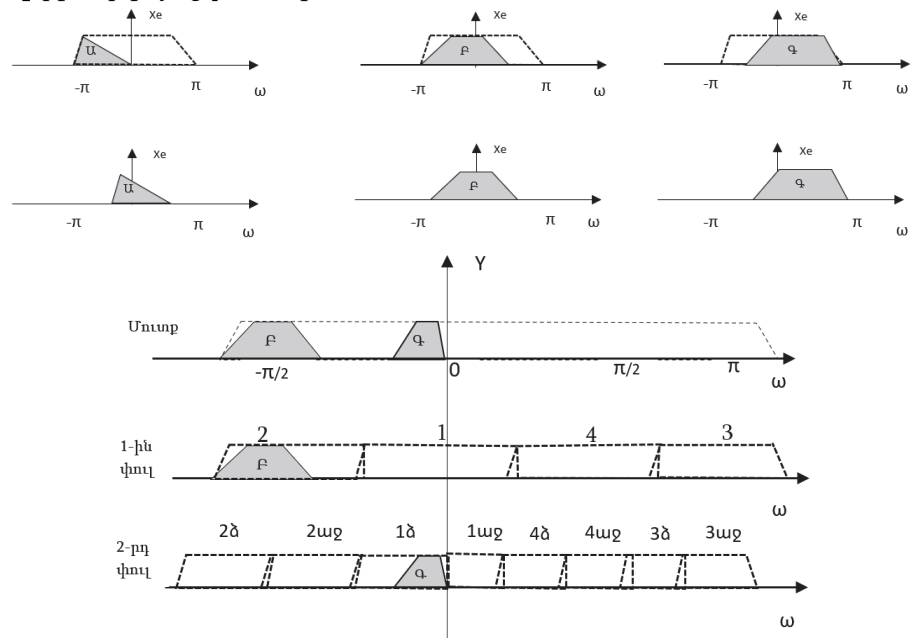
Նկ. 2. Հաճախականային շերտի տրոհիչը

Առաջարկված համակարգում յուրաքանչյուր առանձին տիրույթի ելքային դիսկրետացման արագությունը և «հարթեցման» թողունակությունը սահմանվում է հետևյալ կերպ.

$$F_s/20=12.8 \text{ և } F_s = 256 \text{ (ՄՀգ)}, \quad (1)$$

որտեղ F_s -ն մուտքային դիսկրետացման արագությունն է. դինամիկ տիրույթը գերազանցում է 70 ղԲ [3]: Կարևորագույն խնդիրներից է մուտքային ազդանշանի տրոհումը առանձին ենթատիրույթների, և այդ ենթատիրույթների պարամետրերը, օրինակ՝ կենտրոնական հաճախականությունը և դիսկրետացման արագություն, կարող են լինել տարբեր:

Հաճախականային շերտի տրոհումը առանձին ենթատիրույթների՝ ըստ փուլերի ներկայացված է նկ.3-ում:



Նկ. 3. Հաճախականային շերտի տրոհումը առանձին ենթատիրույթների՝ ըստ փուլերի

Կապուղիների տրոհումը տեղի է ունենում հետևյալ փուլերով.

- **Հաճախականության վերակարգավորող փոխակերպիչ**

Մուտքային ազդանշանի սպեկտրը տրոհվում է մի քանի առանձին հաճախականային շերտերի: Այս հանգույցի ելքային հաճախականային շերտը կիսով չափ փոքր է մուտքային ազդանշանի շերտից:

- **Հաճախականային տիրույթի տեղափոխում**

Այս փուլում ենթատիրույթների բաժանված ազդանշանները տեղափոխվում են կենտրոնական զրո հաճախականության վրա [4]:

- **Իռացիոնալ դիսկրետացման գտիչ**

Առանձնացված ազդանշանները լրացուցիչ մշակվում են իռացիոնալ դիսկրետացման գտիչով: Այս գտիչի աշխատանքի հիմքում օգտագործվել է Լագրանժի ձևափոխումը և փոփոխական կոտորակային հապաղմամբ գտիչը՝ VFD՝ Variable Fractional Delay, փոփոխված տարբերակով, որը հնարավորություն է տալիս՝ մշակելու մի քանի ենթատիրույթ՝ օգտագործելով միևնույն հանգույցը: Այս մեթոդով հնարավոր է ստանալ դիսկրետացման արժեքներ՝ $1 \dots 2$ տիրույթում ցանկացած արժեք $1/(2^{32})$ քայլով [4]:

- **Կողախառնիչ (Interleaver)**

Մշակման բոլոր տարրերի ելքային արդյունքները ստացվում են՝ շնորհիվ կասկադային կառուցվածքի: Հետևաբար՝ հնարավոր է առանձնացնել հաճախականային շերտեր, որոնք ունեն տարբեր հաճախականային տիրույթներ և կենտրոնական հաճախականություն:

$$\text{Կենտ. հաճ.} = \text{Round2-i } 32X F_c / F_s,$$

որտեղ F_c -ն կրող ազդանշանի կենտրոնական հաճախությունն է, երբ $F_s = 256 \text{ ՄԱ/վ}$, ստացված սիմվոլային արագության ճշտությունը կլինի՝ 0.0599 Հց.

Արդյունաբար թվայնացման հաճախություն՝

$$R = F_s / F_{tbp} = R_1 \times R_2 \times R_3, \quad (2)$$

$$U_{raw} = \sim (2^{32} \times F_{tbp}) / F_s = \sim (2^{32} \times F_{tbp}) / F_s / R_1 \times R_2 \times R_3, \quad (3)$$

որտեղ R -ը արագությունն է, R_1, R_2, R_3 -ը՝ արագությունները տարբեր հանգույցներում, F -ը՝ հաճախականությունը: Ուղու ձևավորիչի հանգույցը ներառում է երկու կողախառնիչ (interleaver), որոնցից յուրաքանչյուրը կարող է գեներացնել կոմպլեքս արժեքներ՝ մինչև 512 ուղի: Այն բաղկացած է 32 երկակի պորտ ունեցող հիշասարքերից (RAM), մեկ բազմապատկից և մեկ դեկավարող տարրից: Մշակվող 2,3...9 տարրերի ելքային արդյունքները գրանցվում են հիշասարքի մեջ (RAM 1,2,...,8): Յուրաքանչյուր հիշասարքի ծավալը հավասար է ելքային տիրույթների քանակի կեսին [5]:

- Վերակարգավորվող վերամշակիչ հանգույց

Վերակարգավորվող վերամշակիչ հանգույցը կազմված է երկու զուգահեռ 512 ուղի ունեցող խառնիչներից:

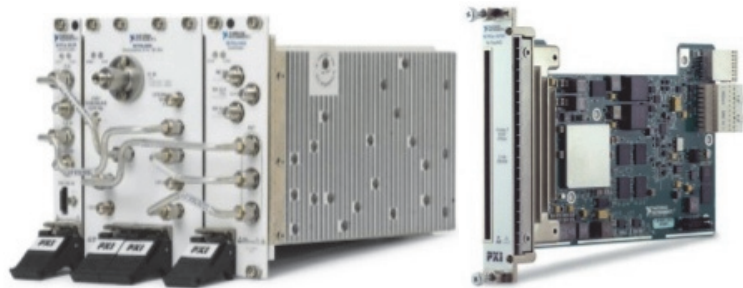
Յուրաքանչյուր խառնիչ բաղկացած է մեկ 512-ուղիանոց թվային դեկավարման հանգույցից և մեկ կոմպլեքս բազմապատկից:

Փոփոխական թվային գտիչի հաճախականային բնութագիրը ներկայացվում է հետևյալ կերպ՝

$$H_{VFD}(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega(D+\phi)}, & 0 \leq |\omega| \leq 0.2\pi, \\ 0 & 0.8\pi \leq |\omega| \leq \pi, \end{cases} \quad (4)$$

որտեղ $D + \phi$, 0.2π և 0.8π գտիչի խմբային հապաղումն են [6]:

Համակարգը ամբողջությամբ դեկավարվում է ծրագրի միջոցով: Մշակման ընթացքում կիրառվել են NI կազմակերպության NI PXI համակարգը, բարձր հաճախականությունների գեներատորը և անալիզատորը (նկ.4):



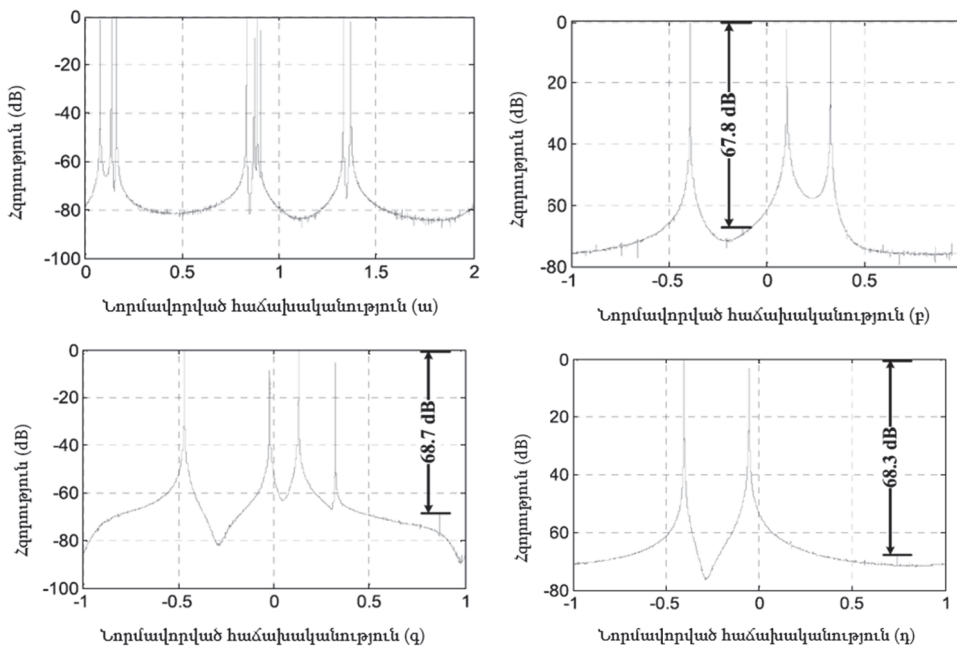
Նկ. 4. Ռադիոազդանշանների հաճախականությունների գեներատորը և անալիզատորը, FPGA միկրոսխեման

Ծրագրային մասն իրականացվել է LabVIEW գրաֆիկական միջավայրում, տվյալների միաժամանակյա արագ մշակման համար կիրառվել է LabVIEW FPGA տեխնոլոգիան՝ տվյալների մշակումը մեծ արագությամբ և իրական ժամանակում իրականացնելու համար:

Փորձական չափումների արդյունքները. Կատարված աշխատանքի արդյունքները բերված են ստորև՝ աղյուսակային և գրաֆիկական տեսքով:

Կատարված աշխատանքի արդյունքները

Չափվող պարամետրի անվանումը	Ստացված արդյունքը
Մուտքային արագությունը (I/Q)	≤ 250 Մս/վ
Ելքային ուղիների քանակը	512 / 1024
Տվյալների ծավալը՝ I և Q	I -ը՝ 16-բիթ, Q-ն՝ 16-բիթ
Ելքային կապուղու կենտրոնական հաճախությունը	fin / 232
Ելքային կապուղու դիսկրետացման արագությունը	Նվազագույնը՝ fin / 32768 առավելագույնը՝ fin / 2
Առավելագույն թողունակությունը	250 Մս/վ
Ազդանշան/աղմուկ	> 90 դԲ
Զտիչների քանակը	32



Նկ. 5. Կատարված աշխատանքի արդյունքները գրաֆիկական տեսքով

Նկ. 5-ում բերված արդյունքներից երևում է, որ թողարկման շերտից դուրս ազդանշանի ճնշման արժեքը դեցիբելներով կազմում է նվազագույնը 67,8 դԲ, ինչը համընկնում է տեսական հաշվարկների հետ:

Եզրակացություն: Մշակված է ծրագրային կառավարմամբ ռադիոհամակարգ, որի շնորհիվ հնարավոր է ընդունվող ազդանշանից առանձնացնել որոշակի հաճախականային շերտեր և դրանք մշակել առանձին – առանձին: Սիմվոլային

արագությունը 250 ՄԶ/վ, է առանձնացված կապուղիների քանակը՝ 1024: Այս երևույթը հայտնի է որպես կապուղու ձևավորիչ կամ «channelizer»: Այն ունի լայն կիրառություն ազդանշանների սպեկտրի, հարմարվողունակ, ճանաչողական ռադիո-համակարգերի և այլ դեպքերի ուսումնասիրության ժամանակ:

Համակարգը ամբողջությամբ ղեկավարվում է ծրագրի միջոցով: Մշակման ընթացքում կիրառվել են NI կազմակերպության NI PXI համակարգը, բարձր հաճախականությունների գեներատորը և անալիզատորը: Ծրագրային մասն իրականացվել է LabVIEW գրաֆիկական միջավայրում, տվյալների միաժամանակյա արագ մշակման համար կիրառվել է LabVIEW FPGA տեխնոլոգիան՝ տվյալների մշակումը մեծ արագությամբ և իրական ժամանակում իրագործելու համար:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Porat B. A.** Course in Digital Signal Processing.- John Wiley & Cons, 1997.
2. **Moon T. K., Stirling W.C.** Mathematical Methods and Algorithms for Digital Signal Processing.- Prentice Hall, 2000.
3. **Stewart R. W.** The DSPedia: A Multimedia Resource for DSP.- BlueBox Multimedia, UK, 2000
4. <http://www.ni.com/en-us.html>
5. <http://www.olympengineering.com/home.html>
6. http://yea-engineering.com/ru/revoke_portfolio/high-performance-demodulator-library-for-fpga/

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 28.06.2021:

Г.А. ВАРДАНЯН

ФОРМИРОВАТЕЛЬ КАНАЛОВ

Описан алгоритм и представлены результаты тестирования с использованием FPGA (Field-Programmable Gate Array) регулируемого интегрированного чипа. С помощью данного алгоритма можно разделить цифровой входной широкополосный сигнал на отдельные полосы частот, чтобы последние обрабатывались отдельно. Максимальное количество диапазонов разделенного сигнала - 1024. Представленный алгоритм имеет множество настроек, параметры разделения каждого отдельного диапазона могут быть изменены в процессе работы в режиме реального времени. Как правило, входная частота входного сигнала выше, чем частоты дискретизации отдельных полос. Этот алгоритм в основном используется в адаптивных радиосистемах и системах автоматического распознавания сигналов, когда необходимо изучать параметры входящих сигналов, разделяя их на отдельные диапазоны и подполосы.

Ключевые слова: адаптивная радиосистема, спектр сигнала, когнитивная радиосистема, формирователь каналов.

G.A. VARDANYAN

A CHANNELIZER

The algorithm and test results with the use of FPGA (Field-Programmable Gate Array) are described. Using the given algorithm, it is possible to split the digital input wideband signal into separate frequency bands so that the latter are processed separately. The maximum number of ranges of the split signal is 1024. The presented algorithm has many settings, the parameters of the split of each individual range can be changed during operation in real time. Typically, the input frequency of the input signal is higher than the sampling rates of the individual bands. This algorithm is mainly used in adaptive radio systems for automatic signal recognition, when it is necessary to study the parameters of incoming signals, dividing them into separate ranges and subbands.

Keywords: adaptive radio system, signal spectrum, cognitive radio system, channelizer.

UDC 621.3.049.77

MICROELECTRONICS

DOI 10.53297/0002306X-2021.v74.4-450

S.A. HARUTYUNYAN

**A UNIVERSAL VERIFICATION METHODOLOGY TEST
ENVIRONMENT GENERATOR**

A tool that will generate UVM test environment is presented. After the verification plan has been finalized, the verification process starts by creating the test environment. During some period, there are no verification results, since the test environment is not ready. The tool which is presented here is an automated way of generating the test environment from GUI, which provides a complete test environment in a complete state leading to drastic time reduction in the verification process.

Keywords: verification, UVM, automation, generation.

Introduction. Nowadays the System-on-chip design is becoming more and more complicated and is using multiple IP cores. As the systems get bigger the complexity of their verification is growing rapidly as well. To verify the design special verification methodologies have been developed, such as Verification Methodology Manual (VMM), Open Verification Methodology (OVM) and Universal Verification Methodology (UVM) [1]. Currently, in the market, the UVM is the most widely used one. All these methodologies are coverage-based verification methodologies [2].

Fig. 1 Illustrates the basic operational model of such methodologies. These methodologies have several pros and cons compared to directed testcase style verification. In the directed testcase verification style, there is a small amount of pre-simulation work. Simple test top will work. This allows to make the simulation run fast. For coverage-based methodologies, it is first required to build the test environment from specific components. Unlike the directed style, here the test environment creation is quite a big task which can take a significant amount of time. It requires special components (driver, agent, environment, monitor, scoreboard, etc.), and all those components need to be coded separately.

The pro for such an approach is that once the test environment is completed, it can be easily enhanced, modified, and can run constrained random simulations which will cover most of the possible combinations of signals. Based on the object-oriented approach of such methodologies, adding testcases also becomes easier as the only thing that is required is to derive the new testcase from the older one and perform minimum modifications.

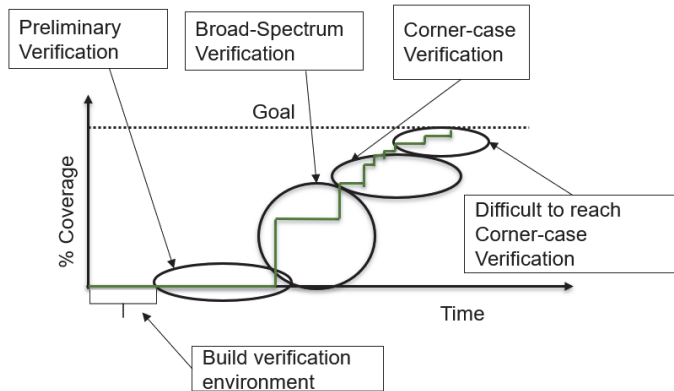


Fig. 1. Phases of Coverage-based Verification

To sum up the coverage-driven verification starts slower but accelerates drastically once the test environment is created. The tool which is presented here is meant to decrease the time of creation of the test environment itself which will allow to have coverage-driven methodologies without long test environment development.

Typical test environment architecture. Since the most widely used verification methodology is the UVM, the tool is initially made to generate the test environment for it. A quick introduction to UVM building blocks is shown in Fig. 2 [3-6].

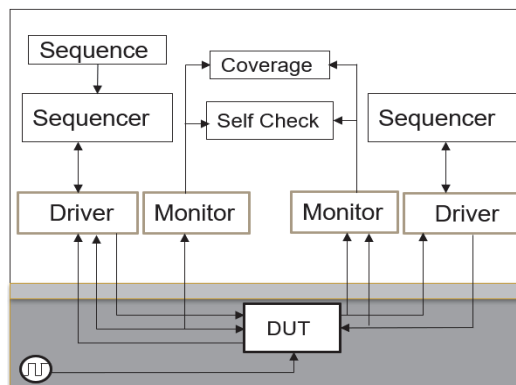


Fig. 2. A typical test environment architecture

Sequencer: sequencer is the generator of the stimuli. During the test environment development, it is configured to work with a certain type of type (class). During the simulation, it generates that type of simulation objects and passes them to the driver. It is important that the sequencer have the same object type as the driver, otherwise the TE will not operate correctly.

Driver: this component sends the data to the Device Under Test (DUT). It gets the packet from the sequencer and based on the logic implemented in it, sends the packet to the DUT. That logic is based on the interface that the DUT is using (could be AXI, UART, AHB, etc.). Once the packet is sent, it responds to the sequencer and the packet is retired.

Monitor: the monitor follows the bus activity and collects the coverage data. That data can be used to control the simulation flow (example: stop it if certain percentage of coverage is reached). Also, checks can be implemented to make sure that the driver is sending specification compliant data to DUT.

Agent: this is a hierarchical unit. It is mostly used to encapsulate monitors, drivers and sequencers. it can also be used as a separate unit and swapped with a different one if needed.

Subscriber components: other components such as scoreboards and functional coverage blocks work based on the subscriber design pattern. They are derived from the subscriber class and are connected to the agents. Once the Monitor inside the Agent captures a packet, it sends it to the agent analysis port, which transmits it to all its subscribers.

Environment: hierarchical component. It is one level higher than the agent and can have multiple of them. It is also used to set up general high-level configuration variables in the configuration database.

Sequences: the stimuli object. It is based on the initial configuration. If the sequencer is configured to generate a sequence during a specific run phase, the sequencer creates a sequence object and passes to the driver. In complex designs, sequences could be embedded sequences. One sequence can trigger multiple other sequences.

Tool GUI and functionality. The tool targets the test environment build section of verification. Using C++ QT library, a tool has been created to automate the creation of the test environment. Fig. 3 shows the general user interface of the tool.

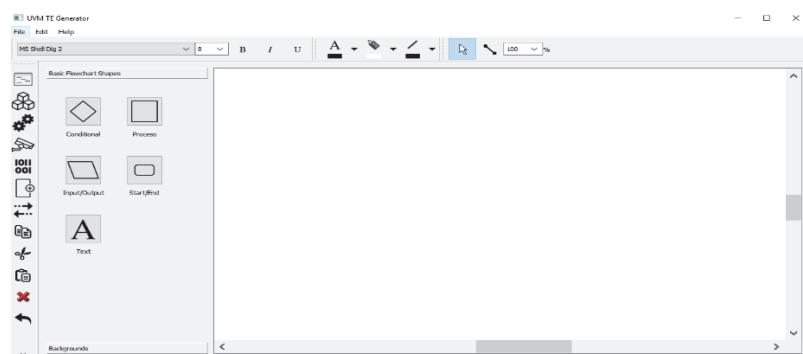


Fig.3. Tool Graphic User Interface

It provides the work environment to pull and drop components such as monitors, drivers, environments. From the left tool bar, the user can generate UVM environment components. When creating the components, the tool allows configuring the components per user needs. Add user defined functions, add default phases in the generated code, configure if the agent is active/passive etc. An example of configuration dialog is presented in Fig. 4 and Fig. 5.

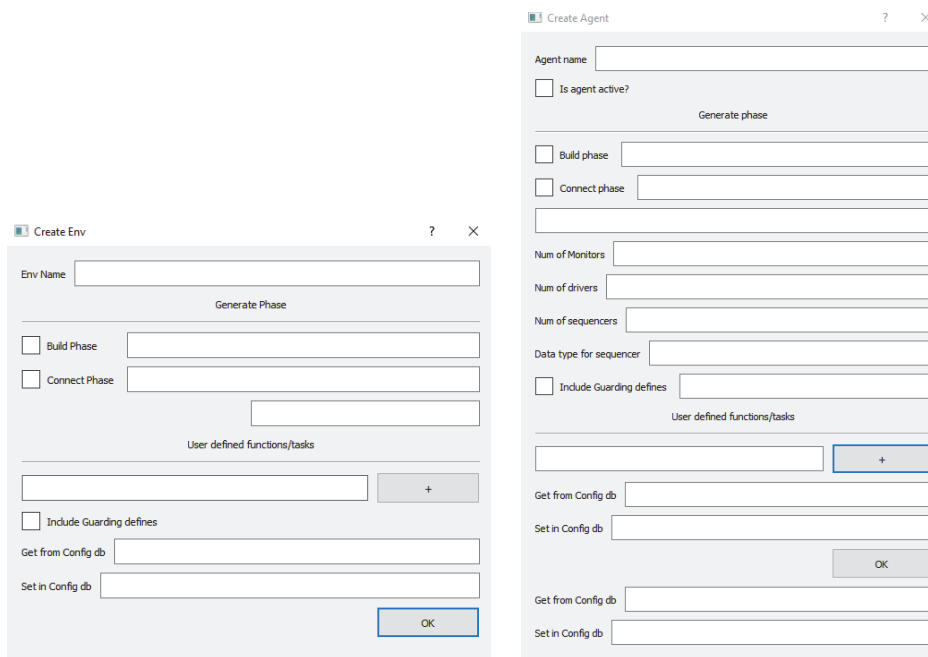


Fig.4. A create environment and create agent dialogues

Fig. 4 shows the configuration dialogues of the environment component. For the UVM environment, it allows to set the environment name, configure what default UVM phases will be generated (this will allow further modifications if needed), if guarding defines are needed for the current component and what elements to put and get from the configuration database.

Another example of more complex items – agents. Fig. 4 also shows the configuration options available for it. Other than the same items mentioned for the environment dialogue, here you may configure whether the agent is active or passive, how many divers, monitors, and sequencers it has, what type of data object will be used within this agent. Other than this, the user can always add tasks/functions that it needs. That part is also available from generate Agent dialogue.

Likewise, it is possible to create the interfaces and use them to connect the newly created components with the device under verification. For environment

components in the tool, GUI point-to-point connection is available which is sufficient for the tool to understand the connections and generate a correct environment. If for some reason an unusual hierarchy is needed, the tool gives those options too. After creating the components, you may use the “Group” function to make collect them and create top level components which includes subcomponents. The completed test environment is presented in Fig. 5.

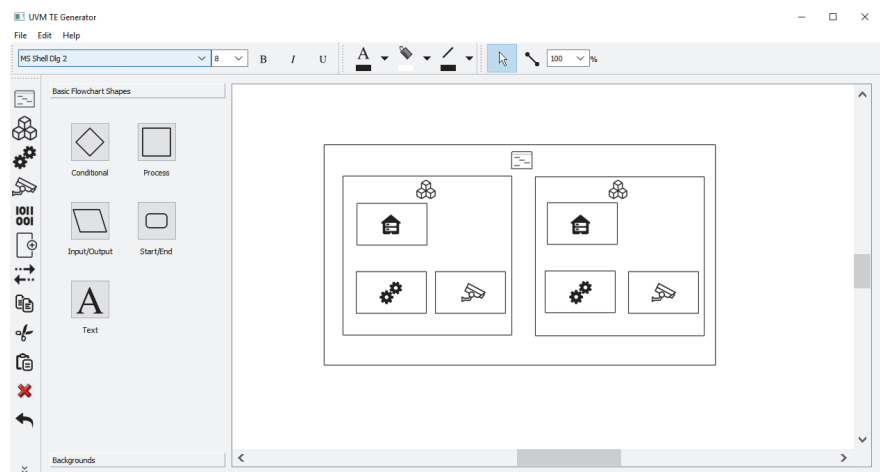


Fig.5. The complete test environment setup

After the test environment is ready and configured the tool allows to generate the test environment. To do that, the tool uses base UVM classes, for drivers it extends the UVM_DRIVER and does the modification which is configured through GUI. An example design for UART interface has been developed and is presented in Fig. 6.

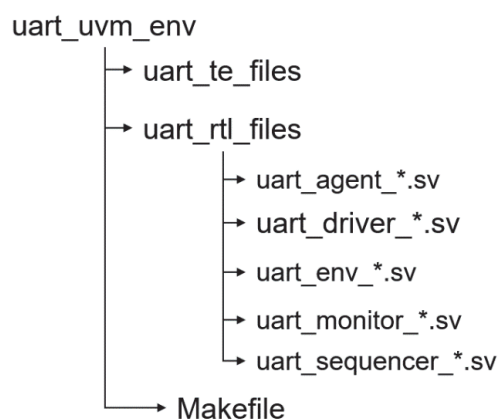


Fig.6. The output hierarchy of the tool

The output consists of a top folder, which is project dependent. The tool creates two folders - one for design files names “<_rtl_files” and one for test environment files that it generates names “<_te_files”. The tool also generates Makefile for an easier usage of the test environment. This kind of output structure and Makefile make the simulation run extremely easy. The only thing the user should do so simply is to copy the design files into the *_rtl_files folder and run commands from the Makefile. The Makefile is designed to have the basic VCS simulation with UVM enabled options. Additional options in the Makefile can generate waveforms of the simulation and add debug options. Note: In Fig. 6 the “*” stand for the indexes of the appropriate components as in GUI you may configure them differently.

Further enhancements planned for the tool. At present, most companies have already designed test environments. The modifications that Verification engineers are doing is adding components to it. The next feature planned for this tool is the ability to read and understand other verification environments built using UVM. This will allow the tool to read already built test environments and present them in the user friendly block scheme view. This will allow easy modifications of the test environment. Finally, this will allow new engineers to easily by understand the huge and complex environment that they are using.

Conclusion. A tool to generate a UVM test environment from scratch has been developed. It targets the test environment creation part of coverage-based verification methodologies and allows to drastically lower the time required to start the constrained random simulations. The tool allows to configure the test environment architecture, each component separately, pick interfaces, their connections in user friendly GUI. After everything is configured, the tool generates the test environment in the mentioned location with additional Makefile to help to run the simulations.

REFERENCES

1. **Salemi R.** The Uvm Primer: A step-by-step introduction to the universal verification methodology. - United States: Boston Light Press, 2013. – 194 p.
2. **Bhojak A. and Prasad T.** A UVM Based Methodology for Processor Verification //DVCON.- 2015. - P.183-194.
3. **Jain A., Bonanno G., Gupta H., and Goyal A.** Generic System Verilog Universal Verification Methodology based reusable verification environment for efficient verification of image signal processing IPs/SOCs // International Journal of VLSI design & Communication Systems (VLSICS).- 2012.- Vol.3, no. 6.
4. Universal Verification Methodology 1.2 User Guide.- Accellera, 2015. -190p.

5. **Harutyunyan S., Kaplanyan T., Kirakosyan A., & Khachatryan H.** Configurable Verification IP for UART //IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - April 2020.-P.234-237.
6. **Harutyunyan S., Kaplanyan T., Kirakosyan A., & Momjyan A.** Design And Verification Of Autoconfigurable UART Controller //IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Apr. 2020.-P. 347-350.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 26.11.2021.

Ս.Ա. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ

ՀԱՄԱՊԻՏԱՆԻ ՎԵՐԻՖԻԿԱՑԻԱՅԻ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅԱՄԲ ԹԵՍՏԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐ

Ցույց է տրվել համապիտանի վերիֆիկացիայի մեթոդաբանությամբ թեստավորման միջավայր գեներացնելու գործիք: Ստուգման պլանի վերջնականացումից հետո ստուգման գործընթացը սկսվում է թեստավորման միջավայրի ստեղծումից: Որոշ ժամանակ որևէ ստուգման արդյունք դեռևս հասանելի չէ, քանի որ ստուգման միջավայրը դեռ պատրաստ չէ: Գործիքը, որը ցուցադրվում է, թույլ է տալիս ավտոմատացված կերպով գեներացնել թեստավորման միջավայր գրաֆիկական ինտերֆեյսի (ԳԻ) միջոցով: Այն տալիս է ամբողջական թեստավորման միջավայրը՝ պատրաստի վիճակում, որը հանգեցնում է ստուգման գործընթացի տևողության կտրուկ նվազման:

Առանցքային բաներ՝ ստուգում, ՈԻՎՄ, ավտոմատացում, գեներացում:

С.А. АРУТЮНЯН

ГЕНЕРАТОР ТЕСТИРУЕМОЙ СРЕДЫ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПРОВЕРКИ

Представлена программа генерации тестируемой среды универсальной методологии проверки. После завершения плана верификации процесс верификации начинается с создания тестируемой среды. Некоторое время никаких результатов верификации не получено, так как тестируемая среда не готова. Представленная в работе программа - это автоматизированный путь генерации тестируемой среды с графического интерфейса, которая предоставляет эту среду в завершенном виде, что кардинально снижает время процесса верификации.

Ключевые слова: верификация, универсальная методология проверки (УВМ), автоматизация, генерация.

A.M. MOMJYAN

DEVELOPING A NEW SENSE AMPLIFIER BY APPLYING THE METHOD OF THE DISSIPATION POWER REDUCTION FOR SRAM

A voltage latch sense amplifier by applying the power consumption reduction method is introduced. The presented sense amplifier is compared with the classical voltage latch-type sense amplifier and an amplifier with a leakage control (LECTOR) technique is applied. The designs are carried out by 14 nm FinFET technology. The results of simulations show that in the case of the proposed design, the power dissipation and propagation delay is improved. Simulation is performed for typical-typical (tt), slow-slow (ss), and fast-fast (ff), process voltage temperature (PVT) corners.

Keywords: static random-access memory, sense amplifier, LECTOR, power reduction, FinFET.

Introduction. Nowadays, the variety of the battery-powered mounts has led to more demanding requirements for the design of low-power integrated circuits. Particularly, in the static random-access memories (SRAM), power consumption is one of the important parameters.

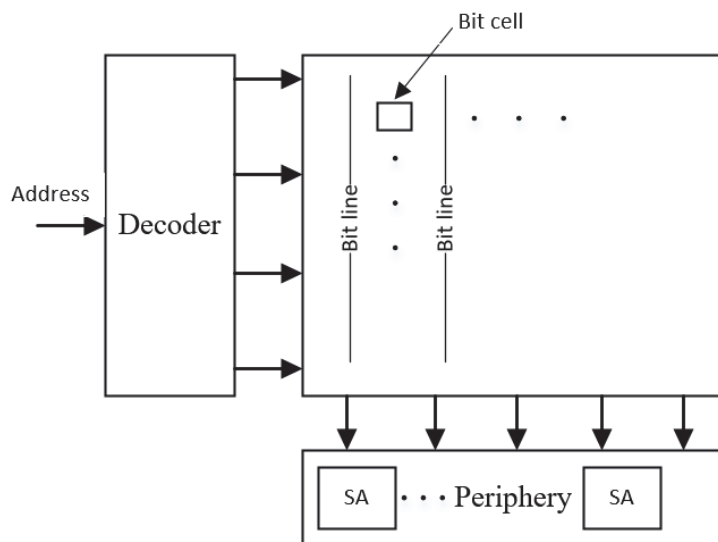


Fig. 1. A high level SRAM block diagram

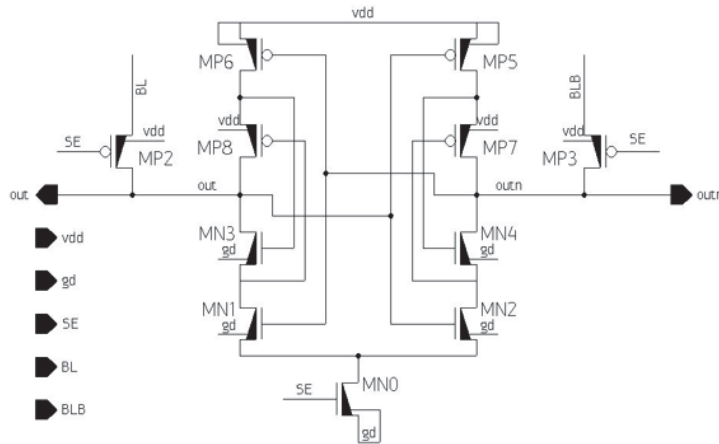


Fig. 3. An amplifier with a LECTOR-technique applied scheme

Here, MN3, MP8 and MN4, MP7 extra transistors are to restrict the flow of current when MP6, MN1 and MN2, MP5 are in the subthreshold region. The disadvantage of this technique is the additional delay introduced by the method [4].

The diode-connected approach. The CMOS inverter application by this method is presented in [5]. The approach is presented in Fig. 4. The idea of this method is to decrease the voltage between the source and the drain. As shown in Fig. 4-b, there are two additional transistors, diode-connected P2 and N2. The objective of transistor P2 is to provide a leakage current to N1. That causes a rise of the potential of the N1 source node, therefore the V_{DS} voltage of the N1 transistor will decrease, while the output node will have logical “1” [5].

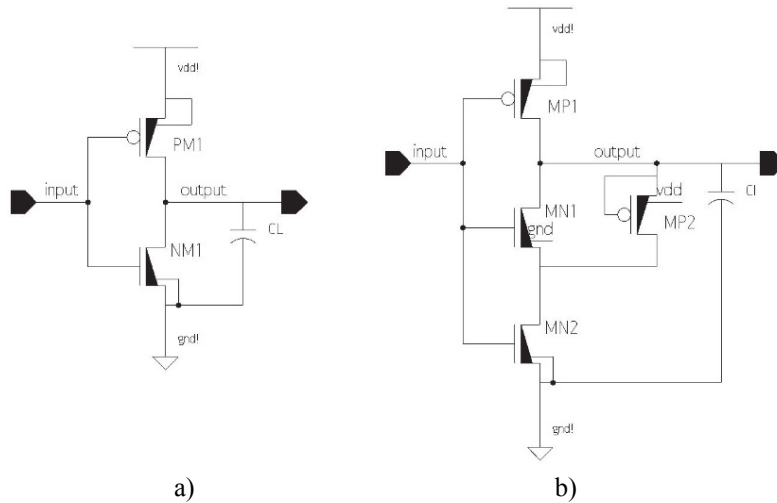


Fig. 4: a CMOS inverter, b – CMOS inverter with the diode-connected method

The new voltage latch sense amplifier is presented in the next section. VLSA is designed by the above described technique using the SAED 14 nm technology [6]. The power consumption and the delay are analyzed. The results are compared with those of the amplifier shown in Fig. 2 and Fig. 3.

Since the designed circuit in Fig. 3 does not have a full swing, the output buffers of the sense amplifier need to solve that issue.

Fig. 5. The proposed latch sense amplifier

The total power consumption and the delay are analyzed. The results are compared with those of the amplifier shown in Fig. 3-b.

Simulations and results. The simulation results of the amplifier with LECTOR technique applied and the proposed amplifier are introduced in Fig. 6 and Fig. 7 respectively. Simulations are performed for tt, ss, ff processes voltage temperature (PVT) corners with a supply voltage of $VDD = 0.75V \pm 10\%$. The power consumption and propagation delay of typical, LECTOR-connected, and proposed sense amplifiers for tt corner, are introduced in Fig. 6 and Fig. 7.

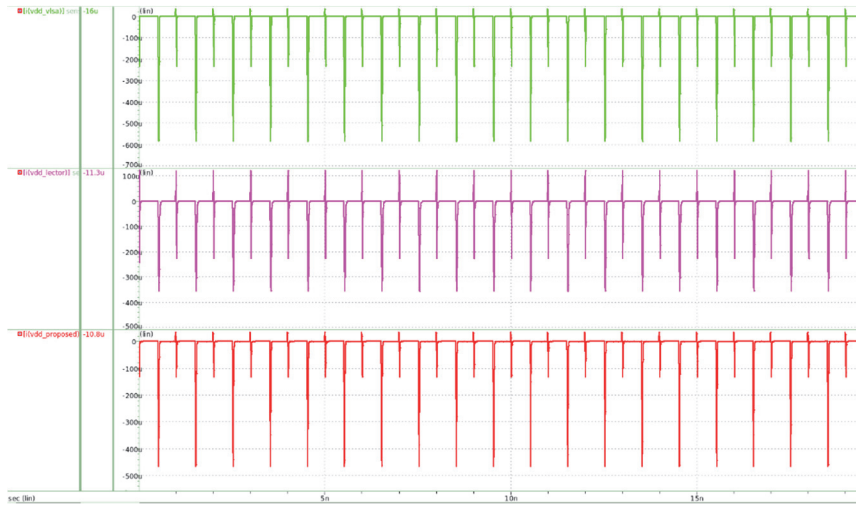


Fig. 6. Power consumption of sense amplifiers in the TT corner

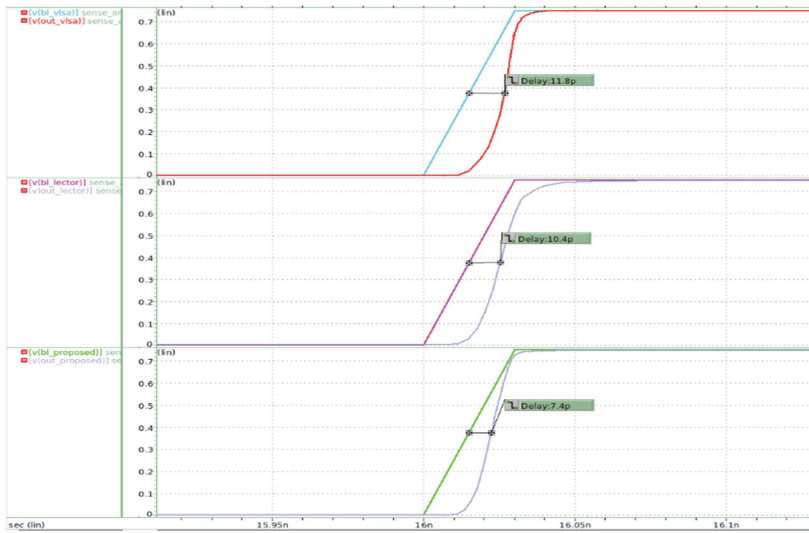


Fig. 7. Propagation delay of sense amplifiers in the TT corner

The table below presents the results of power consumption and propagation delay for the typical, LECTOR-connected and proposed SAs.

Results of consumed power and propagation delay

Sense amplifiers	Power, μW			Propagation delay, ps		
	tt	ff	ss	tt	ff	ss
Typical SA	12	20.7	5.6	11.8	9.9	15.2
LECTOR SA	8.4	16	4.2	10.4	7.9	14.6
Proposed SA	8.1	14.6	4.1	7.4	5	12.2

Conclusion. The sense amplifier for SRAM is introduced by the method of power consumption reduction. As an object of comparison, a typical VLSA and a sense amplifier with a LECTOR technique is applied. The design is performed with the SAED 14nm FinFET technology. The simulations are carried out in tt, ss, ff technological processes. The results of simulations show that the average power consumption and propagation delay of the proposed amplifier is 32.5% and 37.3% less than typical VLSA in the TT corner. The results of the comparison show that the proposed SA has a 4% less consumed power than the LECTOR sense amplifier. Another important advantage of the proposed approach is the 28.9% less propagation delay than in case of the LECTOR sense amplifier due to the absence of two extra transistors in the current path, which causes instability within PVT variations.

REFERENCES

1. **Hemaprabha A. and Vivek K.** Comparative analysis of sense amplifiers for memories // 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). – 2015. -P. 1-6.
2. **Amuthavalli G., Gunasundari R. and Palani U.** Investigation on the Impact of Supply Voltage in Subthreshold Leakage Mitigation // 2020 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN). – 2020. -P. 1-4.
3. **Gatkal R. and Mali S. G.** Low power CMOS inverter in nanometer technology // 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). – 2016. - P. 1982-1986.
4. **Pousia S. and Manjith R.** Design of Low Power High Speed SRAM Architecture using SK-LCT Technique // 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT). – 2018. -P. 1-7.
5. **Nandyala V. R. and Mahapatra K. K.** A circuit technique for leakage power reduction in CMOS VLSI circuits // 2016 International Conference on VLSI Systems, Architectures, Technology and Applications (VLSI-SATA). – 2016. -P. 1-5.
6. 14 nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future / **V. Melikyan, M. Martirosyan, A. Melikyan, et al** // Proceedings of the 7th Small Systems Simulation Symposium, 12th-14th 2018.- Niš, Serbia, 2018.-P 37-41.

7. Current Scaling of Multi-fin Devices in FinFET Process / **S. Avushyan, et al** // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2019. -P. 206-209.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 12.08.2021.

Ա.Մ. ՄՈՄՋՅԱՆ

**ՍՏՍՏԻԿ ՕՊԵՐԱՏԻՎ ՀԻՇՈՂ ՍԱՐՔԻ ՀԱՄԱՐ ՆՈՐ ԸՆԹԵՐՑՈՂ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐ՝
ՀՁՈՐՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈՂԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ**

Ներկայացված է նոր լաչ ընթերցող ուժեղարար՝ հզորության նվազեցման միջոցի կիրառմամբ: Զգայուն ուժեղարարը համեմատվել է դասական լարման լաչ և կորստի հոսանքի կառավարման (ԼԵԿՏՈՐ) մեթոդի կիրառմամբ ուժեղարարի հետ: Նախագծումը կատարվել է 14nm FinFET տեխնոլոգիայով: Նմանական արդյունքները ցույց են տալիս, որ առաջարկված նախագծի դեպքում ունենք բարելավված հզորության ցրում և հապաղում: Նմանակումները կատարվել են տիպային-տիպային (tt), դանդաղ-դանդաղ, արագ-արագ գործընթաց, լարում, ջերմաստիճան (ԳԼՋ) եզրային պարամետրերով:

Առանցքային բաներ. ստատիկ օպերատիվ հիշող սարք, ընթերցող ուժեղարար, ԼԵԿՏՈՐ, հզորության նվազեցում, FinFET:

А.М. МОМДЖЯН

**НОВЫЙ СЧИТЫВАЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА
УМЕНЬШЕНИЯ РАССЕИВАЕМОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ
ОПЕРАТИВНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Представлена новая схема чувствительного усилителя типа латч с применением метода уменьшения энергопотребления. Проведено сравнение предложенного чувствительного усилителя с классическим усилителем типа латч и с усилителем, к которому применена техника контроля утечного тока (ЛЕКТОР). Схема разработана по технологии FinFET 14 нм. Результаты симуляции схемы показывают, что в случае предложенной схемы были улучшены рассеиваемая мощность и задержка распространения. Выполнено моделирование с применением следующих граничных значений по напряжению и температуре: типичное-типичное, медленное-медленное и быстрое-быстрое.

Ключевые слова: статическое оперативное запоминающее устройство, считывающий усилитель, ЛЕКТОР, понижение мощности, FinFET.

T.K. KAPLANYAN

A NOVEL PULSE SYNCHRONIZER DESIGN WITH THE PROPOSED SYNC CELL MODEL

The behavioral model of previously proposed novel sync cell and pulse synchronizer design is presented. The behavioral model is developed using Verilog HDL. Pulse synchronizer designed is based on the sync cell model and verified with X-injection during the simulations to identify failures in early design stages. The use of the designed synchronizers reduces overall area and the clock cycle required for synchronization which improves the performance of the overall system where they are used.

Keywords: clock domain crossing (CDC), synchronizer, metastability.

Introduction. Modern System on Chip (SoC) designs have multiple high frequency clocks due to high interface requirements. Inaccurate clock domain crossing (CDC) handling in early design stage can bring critical issues to system inoperability. CDC issues occur while it is required to transfer data or control signals from one clock domain to another. Unsynchronized data or control signals can cause destination flops to get into metastable state. Metastability is caused by setup and hold violations, which occur because of timing issues, different clock phases at destination and source domain, etc.



Fig. 1. A metastability simulation example

Metastability in such cases stands for state where the output of the flop is unknown and unpredictable. At the end of metastability, the output of the flip flop

settles down to either logical '1' or '0'. An example of metastability is shown in Fig. 1. As shown in the Figure, metastable state X occurs when the input data of the flop changes right before the clock edge causing a setup time violation. Same will occur if the data is changed too early after the clock edge. In this case, metastability will occur because of the hold time violation. When the flop is in a metastable state, the output of the flop can be somewhere in between the logical '1' and '0'. This can cause a damage to the circuit to which it is connected. Not only that, but the unstable state can also propagate through the logic and result in functional issues [1].

The duration of the metastability is also unknown. It can stabilize in a short period of time which will lower the risk of any potential logical issue, but it can also take some significant time which will most likely lead to problems. The potential issues described above are the reasons why metastability should be avoided, otherwise the design cannot be stable. The highest risk of metastability is in between the clock domain crossing (CDC). To lower the risk, special CDC circuits are developed to mitigate the risk. One of such circuits is described in this paper.

Previous work. The novel synchronizer cell design and the timing diagram are presented in the paper [2]. The schematic design of the synchronization scheme is presented in Fig. 2.

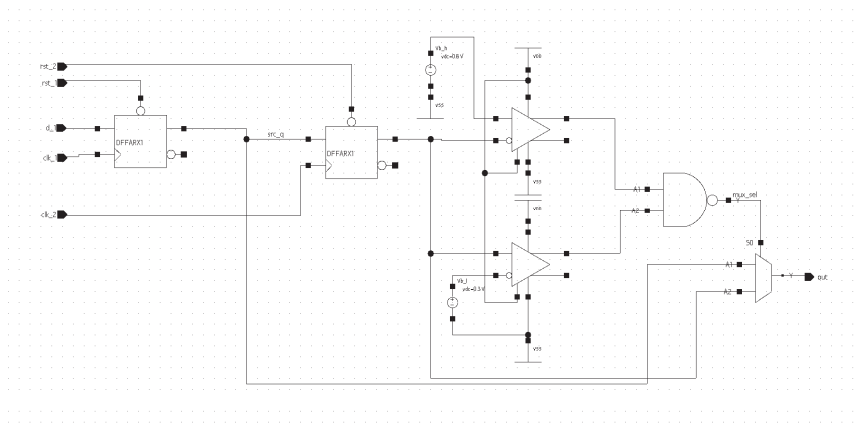


Fig. 2. The proposed sync cell scheme

This design allows to transfer control signals from asynchronous clock domains without losing additional 2...3 clock cycle delay compared with the traditional synchronization method. Also, for high-speed applications, where 3...4 synchronization stages are required, at least 30% area reduction is achieved.

The designed Verilog model. To create a pulse synchronizer for multi-bit data and stream data synchronizers based on a mixed-signal synchronizer cell, the

behavioral model's developed with Verilog hardware description language (HDL). This model has configurable parameters for setup hold time and output buffer delays. These parameters can be overridden on the instantiation of the cell and help to identify issues on early design stages. While the setup/hold violations are occurring, inside the model the X value is injected on the output of the meta D-flip-flop, which is done to simulate the metastability inside the synchronizer. Once timing violations have occurred on the meta D flip-flop and X value is injected, it forces the flop output to random value – logical '1' or '0'. The metastability duration is also parametrized [3]. Based on these numbers, the developed model is accurately simulating the design and providing realistic waveforms. There are strict timing requirements on the output delay of the synchronizer cell and meta flop D input delay propagation. As the analog comparator circuits detect the metastability, the multiplexer passes meta input D signal to the output, and if a corresponding delay is not inserted, the same metastability issue can occur on the flip-flop, in the destination domain driven by the synchronizer. In (1), the timing requirements are given:

$$\begin{cases} T_{DO} = T_{MMD} & (T_{MMD} > T_{su} + T_h), \\ T_O = T_{su} + T_h & (T_{MMD} \leq T_{su} + T_h). \end{cases} \quad (1)$$

In (1), T_{DO} stands for the delay from meta D input to sync cell output, T_{MMD} is the maximum possible metastability duration, T_O -the minimum output delay, T_{su} and T_h -the setup and hold time of the destination flop. These delays need to be handled in the design synthesis stage by inserting the corresponding buffers to meet the timing requirements. The corresponding design timing constraints should be applied on the design. The required delays are already inserted in the behavioral model, so simulations will show accurate results and the designer can validate its design even before doing synthesis and running gate level simulation.

In Fig. 3, simulation waves are presented. The first group contains the inputs of the sync cell: $_s$ and $_d$ correspond to the source and destination domain signals. From the Figure, it is seen that dff_s change causes meta flip-flop to get into metastable state, for which output of meta is marked as X. Then, due to the random value of the output, the meta flop is forced to 0, which means it is settled down after metastability. After mandatory delay which is calculated based on formula (1), $sync_out$ signal is assigned to dff_s value. This delay is enough to have stable input on the dff_d and the corresponding value will be assigned on the next destination clock cycle. Here is the scenario when the changed value has passed to the output of the synchronizer without violating the setup/hold time on the sampling flop.

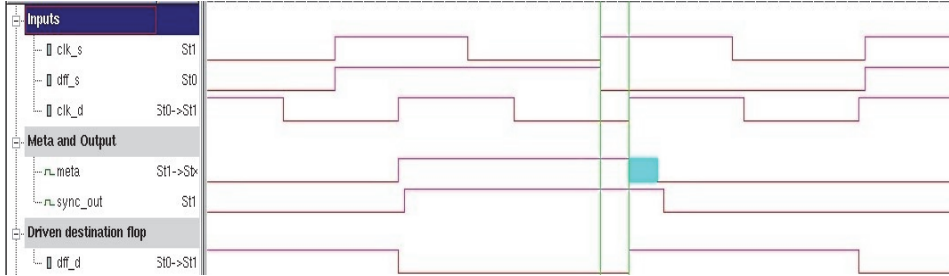


Fig. 3. The synchronizer cell model simulation waves 1

The other scenario is the one where the changed input value hasn't propagated directly to the output of the meta flip-flop. It is shown in Fig. 4. Once the meta flop has got into a metastable state, on the output, the mux picks the data coming from the source domain. This results in a small glitch. If in the scheme T_{DO} is increased, there is a possibility to filter that glitch, but even in this scenario, if delay calculated from (1) is kept during the design stage, this glitch will not be passed to the destination sampling flop, which will not cause any functional violation. If the source and destination frequencies are close, the output delay in case of 2 missamples can be maximum 2 clock cycles.

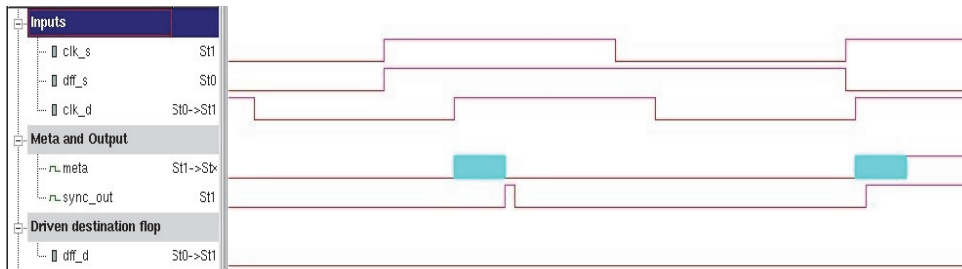


Fig. 4. The synchronizer cell model simulation waves 2

Comparison with conventional synchronizer. In Fig. 5, the waveform comparison of the novel sync cell and the conventional synchronizer is shown. For the conventional synchronization 2-stages are used and even in this case it is seen that 1 clock cycle improvement is achieved. If 3...4 stages are used, improvement in the face of more saved clock cycles will be achieved. This will bring to a performance improvement in complex multi-clock domain Integrated Circuits (ICs).

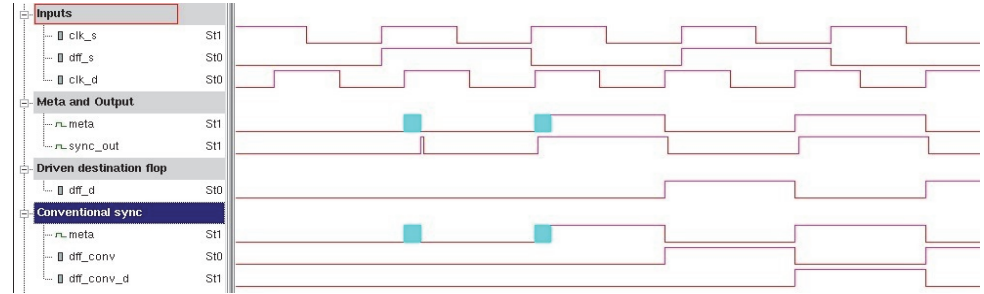


Fig. 5. Comparison with a conventional synchronizer

Pulse synchronizer design and comparison. Pulse synchronizer is designed based on a novel synchronization cell. The pulse synchronizer is used, when it is required to transfer pulse-type data/control signal from fast domain to slow domain [4]. The issue occurs when the slow destination domain is not able to capture the pulse because of the absence of the active clock edge during source pulse duration. Inside the pulse synchronizer, there is feedback driven from destination to the source domain [5]. Due to the low latency of the novel sync cell, the modified pulse synchronizer asserts the pulse in the destination domain at least 1 clock cycle earlier compared with the standard pulse synchronizer. In Fig. 6, the simulation results for both, standard and modified pulse synchronizer, is presented.

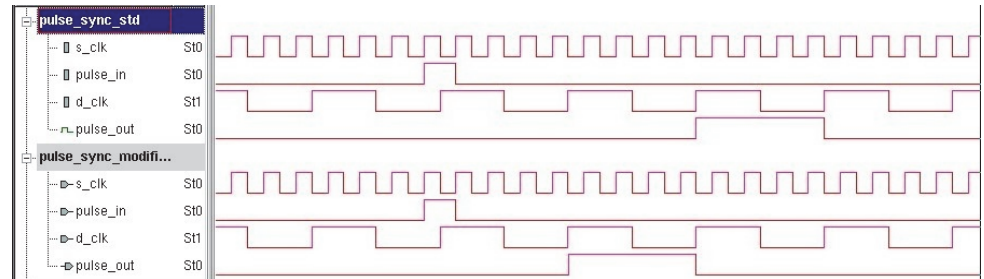


Fig. 6. Comparison of a standard pulse synchronizer

Future work. The complex multi-bit data synchronizer with different approaches will be presented based on the novel sync cell. It is expected to get more performance improvement for the implementation of 2-clock FIFO. The main idea will be removing gray encoding logic and use binary pointers. With this, area reduction will also be achieved.

Conclusion. The behavioral Verilog model for previously presented sync cell and pulse synchronizer cell is designed and presented. The design handles the major CDC issues and filters the metastability. The use of the synchronizer cell improves the synchronization latency by at least 1 clock cycle compared with 2-stage

conventional synchronizer, but it consumes 20% more area. In high frequency applications, where 3 and more synchronization stages are used, the latency is improved by more than 2 clock cycles, and at least 30% area reduction is achieved. The power consumption is expected to increase due to the mixed-signal design. The comparison will be presented in future works in scope of SoC.

REFERENCES

1. **Cummings C.E.** Clock domain crossing (CDC) design & verification techniques using systemverilog (SNUG-2008).- United States: Boston, 2008. -170p.
2. Design and Verification of Novel Sync Cell / **V. Melikyan, T. Kaplanyan, et al** // 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). -2021. -P. 1-5.
3. **Polzer T. and Steininger A.** An Approach for Efficient Metastability Characterization of FPGAs through the Designer // 2013 IEEE 19th International Symposium on Asynchronous Circuits and Systems. -2013. -P. 174-182.
4. **Hatture S. and Dhage S.** Open loop and closed loop solution for clock domain crossing faults // Global Conference on Communication Technologies (GCCT). -2015. -P. 645-649.
5. **Thote V.S. and Khetade V.E.** Modified synchronizer for protection from metastability // 2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). -2016. -P. 1393-1397.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 08.12.2021.

Տ.Կ. ԿԱՊԼԱՆՅԱՆ

ՆՈՐ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՀԱՄԱԺԱՄԱՆԱԿԱՑՈՒՑՉԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ ԱՌԱՋԱՐԿՎԱԾ ՀԱՄԱԺԱՄԱՆԿԵՑՄԱՆ ԲԶՋԻ ՍՈՂԵԼՈՎ

Ներկայացված են մեր նախորդ աշխատանքում առաջարկված նոր համաժամանակեցման բջջի վարքագծային մոդելի և իմպուլսային համաժամանակեցման սխեմայի նախագծերը: Վարքագծային մոդելը նախագծված է Verilog ՄՆԼ-ով: Իմպուլսային համաժամանակեցման սխեման նախագծված է վերը նշված վարքագծային մոդելի հիման վրա և ստուգված է “X”-ներմուծման մեթոդով նմանակման ժամանակ, ինչը հնարավորություն է տալիս հայտնաբերել սխալները նախագծման նախնական փուլերում: Նախագծված համաժամանակեցման սխեմաների կիրառումը նպաստում է մակերեսի և համաժամանակեցման համար անհրաժեշտ տակտային ազդանշանների հապաղման նվազեցմանը, ինչը լավացնում է ընդհանուր համակարգերի արագագործությունը, որտեղ դրանք կիրառվում են:

Առանցքային բառեր. տակտային ազդանշանների կոդյակների հատում (SUԿՀ), համաժամանակացուցիչ, մետակայունություն:

Т.К. КАПЛАНЯН

**РАЗРАБОТКА НОВОГО ИМПУЛЬСНОГО СИНХРОНАЙЗЕРА НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СИНХРОНИЗИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА**

Представлена модель предложенной ранее новой схемы синхронизации, а также синхронизатора импульсов. Поведенческая модель разработана с помощью ЯОА Verilog. Разработан импульсный синхронайзер на основе созданной модели, который верифицирован с X-инъекцией во время моделирования для выявления дефектов на ранних стадиях разработки. Использование разработанных синхронайзеров уменьшает использованную площадь и число тактовых задержек, требуемых для синхронизации, что приводит к улучшению производительности всей системы, в которой они используются.

Ключевые слова: пересечение тактовых доменов (ПТД), синхронайзер, метастабильность.

H.V. GUMROYAN

**A VOLTAGE - CONTROLLED OSCILLATOR AIMED AT REDUCING
OPERATIONAL FAILURES AND RESISTANT TO VARIATIONS OF THE
PROCESS, VOLTAGE AND TEMPERATURE**

A voltage - controlled oscillator resistant to variations of the process, voltage and temperature is presented. The proposed method allows to detect and compensate the control voltage value deviations due to the process variations. The system stabilizes the voltage value during the Voltage-Controlled Oscillator (VCO) operation and therefore improves the circuit reliability and reduces the parameter variability. The mixed-signal circuit is detecting the changes in input reference voltage values, and based on the deviation direction, reduces its impact. The compensation system is adjusting the reference signal value at the VCO operation start. The proposed system is compatible for most high-speed data links and is implemented with a standard VCO block.

Keywords: integrated circuit (IC), process voltage temperature variations (PVT variations), voltage-controlled oscillator (VCO)

Introduction. With the rapid scaling of transistor sizes in modern ICs, it becomes harder to maintain wafer manufacturing and yield tests. With moving towards more advanced technological nodes, the layout density, as well as the number of interconnects vias and physical layers increase, which leads to further wiring congestions and therefore additional issues during IC manufacturing. The mentioned phenomenon leads to a longer yield ramp duration and cost inefficiency. In order to avoid additional faults and functional fails during wafer test process, it becomes important to create reliable structures, that will be resistant to external and internal variations. This will help to increase the wafer yield and reduce the ramp time. For calculating the yield and determining the faulty circuits, a full structural and functional testing is performed [1].

Fig. 1 presents the comparison of the yield ramp for the latest technological nodes.

Structures in the ICs become more sensitive to the process, temperature, and voltage (PVT) variations, therefore parameter-related functional tests become more impactful during the wafer testing process. In order to get higher yield after testing, several PVT variation detection and calibration methods are introduced. Those methods are implemented in various mixed-signal blocks such as Current Sources, High-Speed Serial Links, Voltage Controlled Ring Oscillators (ring VCO), etc.

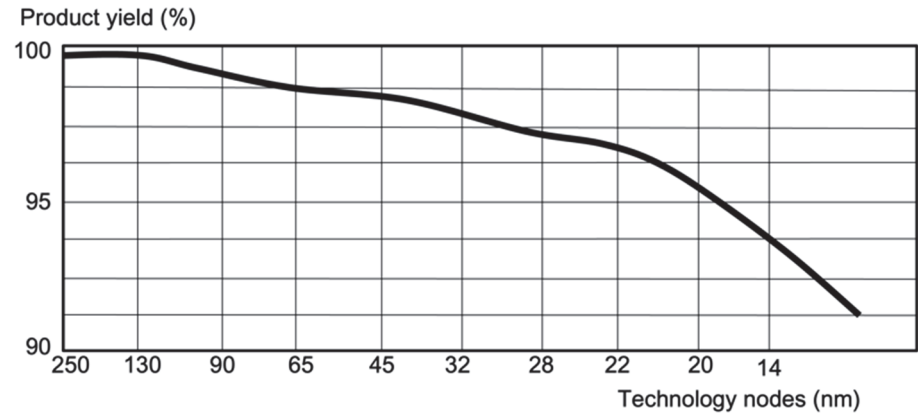


Fig. 1. The final yield (%) depending on the technology node

Voltage-controlled ring oscillators are widely used in such systems as, phase-locked loops (PLL), function generators, or can serve as a quantizer in analog-to-digital converter (ADC). A VCO-based quantizer has a non-ignorable nonlinearity due to its nonlinear tuning curve, and the quantizer performance varies drastically with the process, voltage, temperature (PVT) deviations, which degrade overall performance [2]. VCO calibration should maintain the VCO gain and tuning range in accordance with PVT variations. In the compensation technique introduced in [3], at the beginning of the calibration process, VCO starts to oscillate with a preset tuning code, and the f_0 and K_{vco} are being calculated and compared with their ideal values. Once the deviation between ideal and real values is detected, the tuning code is increased or decreased based on the deviation direction. The process is repeated if the system can capture a deviation between two signals. In the proposed system two transistor arrays are added in order to gain control over VCO gain and frequency. In the presented paper, the ring VCO is realized with 7-stage delay buffers. Each stage consists of two cross-coupling inverters with a tail-current source. In standard solutions the input of the NMOS transistor of current source is being connected to some bias voltage. With this approach, the frequency deviation from the worst to best case was fixed from 400 MHz to about 100 MHz. This means that the system will remain stable during its operation. The problem with the system is that it compares the current values with the ideal ones, and those can be deviated as well, besides the system uses a large number of operational blocks, which occupy a larger area and can lead to a yield loss as well.

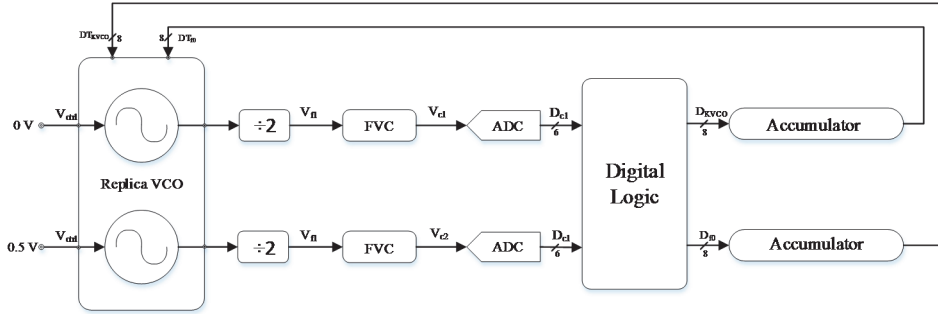


Fig. 2. The block diagram of the calibration system

Fig. 2 presents the diagram of PVT detection system, which consists of replica VCO, frequency divider, frequency- to-voltage converter and digital logic. In [4], the process variation is determined based on the V_{thn} and V_{thp} difference related to $V_{DD}/2$. In order to compare the p-type and n-type MOS transistors' threshold values, a process relative signal generator (PRSG) is used. Figure 3 presents the diagram of the proposed system.

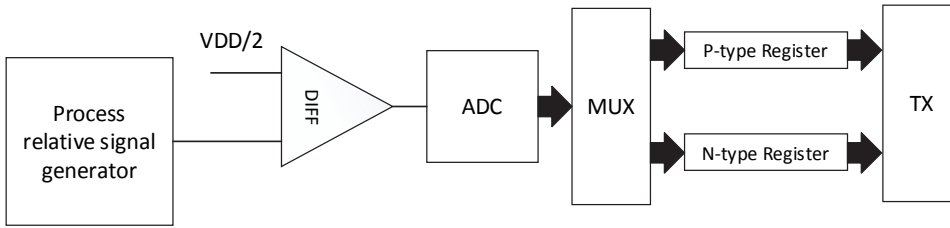


Fig. 3. The structure of the process compensation method

Without the PVT compensation circuit, the rise and fall times of variations are near 40%. After adding the PVT compensation circuit, the deviation between the worst- and best-case scenarios is $\sim 4\%$. The presented system compensates the transition times of deviated processes. This means that by using a PVT compensation circuit, it is possible to increase the IC yield, by implementing this in systems such as current sources, or voltage-controlled oscillators (VCO).

The problem description. In modern integrated circuits, it is required to generate a signal with frequency, that is based on the voltage value of some other signal [5]. The main goal during the design process of such a structure is to build a system with high accuracy, stability and reliability. An example of such a system is the voltage-controlled oscillators (VCO). The functionality of these devices is to generate an output signal with frequency, that is based on the input signal voltage value. VCOs are used in phase-locked loops (PLL), system clock generators. VCO generates a signal with various frequencies based on the tuning voltage of the system.

Due to PVT variation, the controllability of output frequency can vary, which leads to an error in the systems that use the generated frequency for their operations.

In recent years several solutions were purposed in order to overcome the mentioned VCO nonlinearity issues. Nevertheless, those solutions are not addressing the issues related to PVT distortions. Those are mostly based on solving the nonlinearity issues in the VCO by implementing a digital calibration mechanism. Figure 4 shows one of the delay cells of the VCO. The delay cell consists of two cross-coupling inverters with a tail-current source.

One of the most important parameters for VCO is the frequency variations for different PVT corners. Based on the designed systems those variations can reach up to 50% in the worst- and best-case scenarios. The variations are causing a functional test failures, and therefore a significant yield loss. Based on the number of blocks that are connected to VCO, its deviations can lead to a significant yield loss. In order to avoid such behavior, the VCO system can be self-calibrated based on PVT variations. To do so, it is required to have a PVT monitoring system. The system should capture the variations and process the calibration.

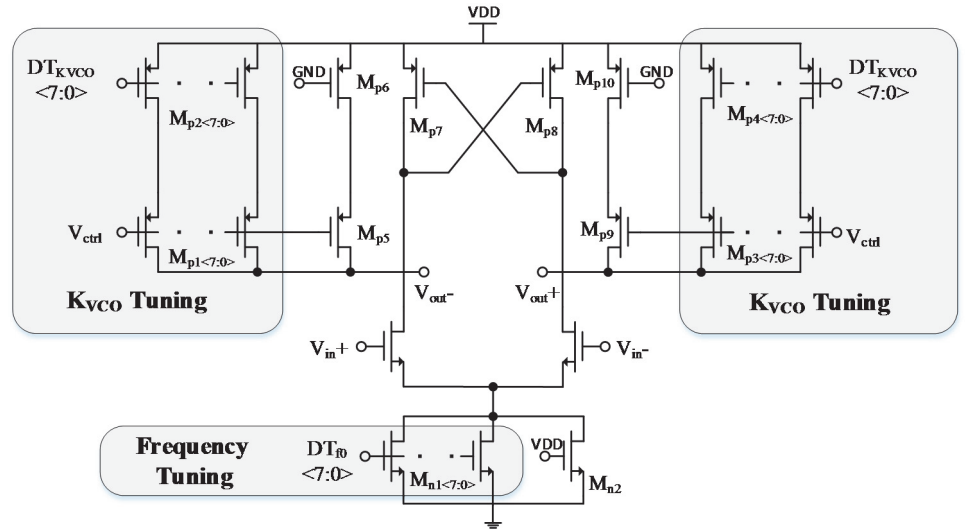


Fig. 4. The delay cell of VCO with additional control tuners

The proposed solution. Fig. 5 presents a PVT compensation system which is based on the system introduced in [4].

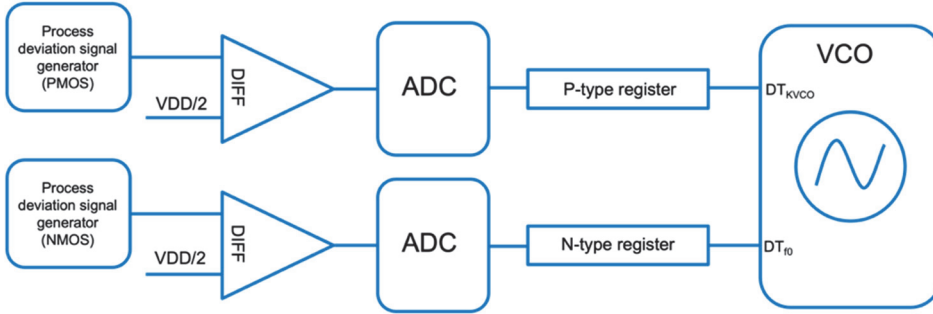


Fig. 5. A PVT detection and calibration system for VCO

In the proposed system, the variation detection for PMOS and NMOS transistors is separated in order to achieve continuous deviation capturing and compensation during the system's entire operation. The process deviation signal generator is two transistors buffer with NMOS transistor connected to VDD and PMOS to GND (Fig. 6) [4]. By doing so, the output of the buffer is going to have logic "1" degraded by V_{th} , and the logic "0" will be higher by V_{th} . The output of each PDSG is being fed to each of the differential amplifiers' inputs. The other inputs of differential amplifiers are connected to a $VDD/2$ signal, therefore the outputs should be $(VDD-V_{thp})$ and $(VDD-V_{thn})$ for PMOS and NMOS transistors respectively. One of the most important part during the design is the creation of the PDSG in such a manner that it would be an exact replica to the arrays that are connected to VCO control blocks.

Fig. 6 presents the process-relative signal generator block (a simple buffer), whose output voltage for logical "1" and "0" is considered as "weak", since the NMOS and PMOS transistors are connected to VDD and GND respectively.

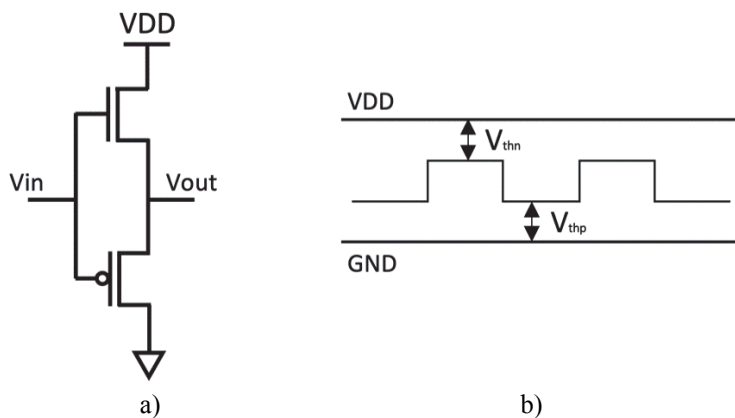


Fig. 6. a- Process-relative signal generator, b- Process detection

Ideally, the difference between two signals should be 0, but due to PVT variation, the values are going to vary. In order to compensate the variations, the output signal of the differential amplifier is connected to ADC, which digitalizes the signal and connects it to the corresponding p-type and n-type registers. Those registers are storing the control value for PMOS and NMOS transistors arrays. The control voltages of the VCO are connected to the transistor arrays of the respective type. Figure 7 presents the VCO systems' delay cell with additional transistor arrays connected to its control voltage inputs.

P-type register controls the PMOS transistors' array. The p-type transistors' array controls the number of PMOS transistors connected to the Vctrl of VCO. Those transistors affect the K_{vco} gain value, therefore by tuning the number of transistors that are turned-on, it will be possible to keep K_{vco} value stable during the system operation. The same approach was used to tune the n-type transistors' array. Mn1 transistor controls the current source of the delay cell and therefore determines the tuning range of the VCO.

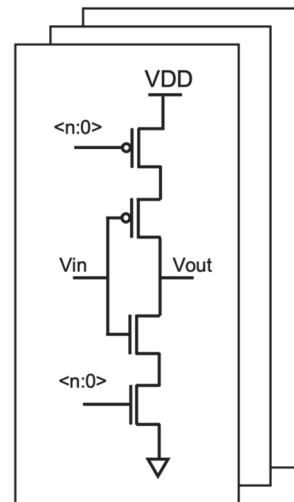


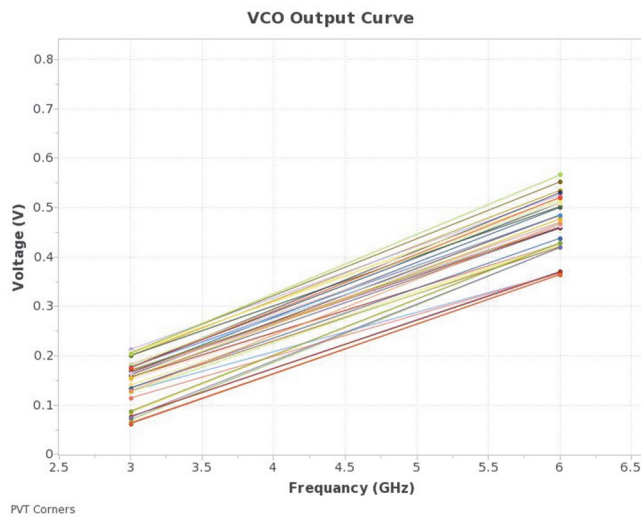
Fig. 7. The VCO cell of the purposed system

The simulation results. The simulation results for 80 PVT corners are presented. HSPICE [6] circuit level simulator is used to obtain results for the mentioned cases, including SS (slow-slow), TT (typical-typical) and FF (fast-fast) corners with temperature and voltage variations for 14 nm CMOS technology. The PVT variation detection and compensation system is compatible for most of analog and mixed-signal circuits and is tested on a standard VCO block.

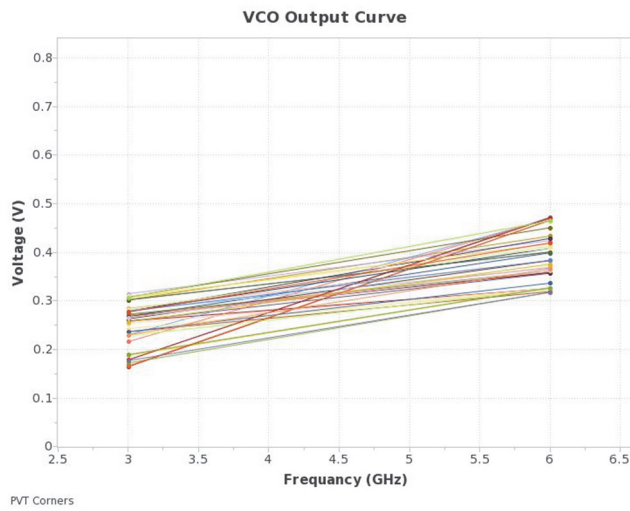
During the simulation process, the voltage values were found to achieve a signal with 3 GHz and 6 GHz frequencies at the output of the VCO system. In

order to simulate VCO system control voltage, a 10-bit ADC is used. The control voltage changes until the moment when the desired frequency is captured in the output system. Depending on the PVT variation, the Vctrl range for a particular frequency can be different.

Fig. 8 presents the VCO output curve before and after the PVT compensation system implementation.



a)



b)

Fig.8. Voltage-frequency curve: a- before PVT compensation, b-after PVT compensation

According to simulation results, the V_{ctrl} variation for 3 was $\sim 0.17 V$ and for 6 GHz it was $\sim 0.23 V$ before PVT compensation. After the PVT compensation, the variations were $\sim 0.13 V$ and $\sim 0.15 V$ respectively. This means that the variations impact was reduced approximately by 30%. The simulation results for typical cases before and after calibration are summarized in Tables 1 and 2 accordingly. The results show that the voltage variations drastically change after a PVT detection and compensation system is applied to VCO.

Table 1

Table 2

Simulation results before compensation

Simulation results after compensation

	FF	TT	SS
3 GHz	0.18 V	0.24 V	0.31 V
6 GHz	0.31 V	0.38 V	0.46 V

	FF	TT	SS
3 GHz	0.18 V	0.24 V	0.31 V
6 GHz	0.31 V	0.38 V	0.46 V

It is important to mention the area increase of the entire system as its main disadvantage. In order to add the controllability over each VCO buffer, PMOS and NMOS transistors should be added into them. Besides, in order to get continuous variation detection and calibration, 2 ADC blocks and 2 differential amplifiers should be added. Considering these changes, the entire area of the system is increased by 10-15%.

Conclusion. A PVT tolerant VCO system is proposed in this paper. As the results show, the proposed system reduces the variations up to 30%, which makes the system more sustainable to them. This will reduce the operational failures and improve the testing results after IC production, thus improving the yield value and speed up the yield ramp process. The disadvantage of the proposed system is the 10-15% area increase, whose impact on total failures will depend on the manufacturing process. The proposed system is compatible for most of data links and is tested on a standard VCO block.

REFERENCES

1. **Aymen Touati.** Thesis, Improving Functional and Structural Test Solutions for Integrated Circuits.- l'Université de Montpellier, 2016.- 75p.
2. A PVT Compensated Ring VCO with FVC-Assisted Digital Backgroun Calibration / **Yuekang Guo, Jing Jin, Xiaoming Liu, Xiaopeng Yu, Jianjun Zhou** // 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). – Singapore, 2019. – P. 48 – 50.
3. **Razavi B.** Design of Analog CMOS Integrated Circuits. - New York, NY USA, 2001.- 509 p.
4. Process Variation Detection and Self-Calibration Method for High-Speed Serial Links / **Vazgen Sh. Melikyan, Arman S. Trdatyan, Armen A. Martirosyan, et al** // 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Kazan, Russia, 2018.-P. 1-4.

5. **Baker R.J.** CMOS Circuit Design, Layout and Simulation.- 3rd Edition. - John Wiley & Sons, 2010.- 1173p.
6. Hspice Reference Manual, Synopsys Inc.- 2017.- 846p.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 08.12.2021.

Հ.Վ. ԳՈՒՄՐՈՅԱՆ

ԿԱՅՈՒՆ ԼԱՐՄԱՍԲ ԿԱՌԱՎԱՐՎՈՂ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐ՝ ԿՈՂՄՈՐՈՇՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆԸ

Ներկայացված է գործընթացի լարման և ջերմաստիճանի (ԳԼՋ) շեղումների նկատմամբ կայուն լարմամբ ղեկավարվող գեներատոր (ԼԴԳ): Առաջակվող համակարգը հնարավորություն է տալիս հայտնաբերել և կոմպենսացնել ԳԼՋ շեղումների հետևանքով առաջացող կառավարող լարման արժեքների տատանումները: Համակարգը կայունացնում է ԼԴԳ-ում լարման արժեքը և, հետևաբար, բարձրացնում է համակարգի հուսալիությունը և նվազեցնում պարամետրերի փոփոխությունները: Խառը ազդանշանային սխեման հայտնաբերում է մուտքային հենակային լարման արժեքների փոփոխությունը և կախված դրա ուղղությունից՝ շտկում այն: Լարման ուղղման գործընթացը սկսվում է ԼԴԳ-ի աշխատանքի սկզբում: Առաջարկվող համակարգը կիրառելի է տվյալների փոխանակման արագագործ հանգույցներում և իրագործված է ստանդարտ ԼԴԳ համակարգի հիման վրա:

Առանցքային բառեր. ինտեգրալ սխեմա (ԻՍ), գործընթացի լարման և ջերմաստիճանի շեղումներ (ԳԼՋ շեղումներ), լարմամբ ղեկավարվող գեներատոր (ԼԴԳ):

Р.В. ГУМРОЯН

ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТ, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ, НАЦЕЛЕННЫЙ НА СНИЖЕНИЕ РАБОЧИХ СБОЕВ И УСТОЙЧИВЫЙ К ВАРИАЦИЯМ ПРОЦЕССА НАПРЯЖЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Предлагается устойчивый к вариациям процесса, температуры и напряжения генератор частот, управляемый напряжением. Представленная система дает возможность обнаружить и компенсировать изменения управляющего напряжения, вызванные вариациями. Интегральная схема со смешанным сигналом обнаруживает изменения входного сигнала и в зависимости от направления изменения компенсирует его. Процесс исправления и стабилизации напряжения выполняется в самом начале работы генератора. Система сопоставима с большинством высокоскоростных систем передачи данных и реализована для стандартного генератора частот, управляемого напряжением.

Ключевые слова: интегральная схема; вариации процесса, температуры и напряжения; генератор частот, управляемый напряжением.

ՀՏԴ 621.316

ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄ ԵՎ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐ

DOI 10.53297/0002306X-2021.v74.4-480

Ա.Գ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Դ.Ա. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ա.Ն. ԲԱԲԱՅԱՆ

ԳԾԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱԶԱՓԱՆԻՇԱՅԻՆ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ
ԼՈՒԾՈՒՄԸ՝ ԲԱԶՄԱԶԱՓ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՁԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ

Առաջարկվում է գծային բազմաչափանիշային ծրագրավորման խնդիրների լուծման նպատակով կիրառել բազմաչափ դիֆերենցիալ ձևափոխությունները: Նախ՝ կշռային գործակիցների ներմուծմամբ, որոնք դիտարկվում են որպես պարամետրեր, բազմաչափանիշային խնդիրը ներկայացվում է ընդհանրական նպատակային ֆունկցիայով միաչափանիշային բազմապարամետրական օպտիմալացման խնդրով: Ստացված բազմապարամետրական խնդիրն արդեն լուծվում է բազմաչափ դիֆերենցիալ ձևափոխությունների և սիմպլեքս ձևափոխությունների կիրառմամբ: Լուծման արդյունքում ձևավորվում են պարամետրերի՝ կշռային գործակիցների փոփոխման միջակայքերն ու դրանցից յուրաքանչյուրում բազմապարամետրական օպտիմալ նպատակային ֆունկցիան և փոփոխականների օպտիմալ արժեքները:

Առանցքային բառեր. բազմաչափանիշային օպտիմալացում, կշռային գործակիցներ, բազմաչափ դիֆերենցիալ ձևափոխություններ, սիմպլեքս ձևափոխություններ:

Ներածություն: Բարդ գործնական խնդիրները շատ հաճախ հանգում են բազմաչափանիշային օպտիմալացման խնդիրների, որոնց լուծման բազմաթիվ եղանակներ կան [1-4]: [5] աշխատանքում վերլուծված են ինժեներական խնդիրների լուծման նպատակով կիրառվող եղանակները: Ինչպես նշված, այնպես էլ [6-9] աշխատանքներում առանձնացնում են զլոբալ նպատակային ֆունկցիայի հանգեցնող կշռային գործակիցների եղանակը և դրա կիրառման մի շարք ոլորտները: Հայտնի է [1-9], որ կշռային գործակիցների եղանակի կիրառման դեպքում անհրաժեշտ է որոշել կշռային գործակիցների արժեքները: Այդ նպատակով հիմնականում կիրառվում են փորձագիտական գնահատականների արդյունքում որոշված արժեքները: Սույն աշխատանքում առաջարկվում է բազմաչափանիշային գծային ծրագրավորման խնդիրների լուծման համար կիրառել կշռային գործակիցների եղանակը, իսկ գործակիցների արժեքները որոշել բազմապարամետրական գծային ծրագրավորման խնդրի լուծմամբ: Բազմապարամետրական գծային ծրագրավորման խնդրի լուծման նպատակով առաջարկվում է կիրառել բազմա-

չափանիշային դիֆերենցիալ ձևափոխությունները [10, 11], ի տարբերություն [12, 13] աշխատանքներում առաջարկված եղանակների:

Մաթեմատիկական մոդելը: Դիտարկենք բազմաչափանիշային գծային ծրագրավորման հետևյալ խնդիրը.

$$\begin{cases} f_1(X) \rightarrow \max, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ f_k(X) \rightarrow \max, \end{cases} \quad X \in D, \quad (1)$$

$$D: \begin{cases} A \cdot X \leq b, \\ x_i \geq 0, i = 1, n, \end{cases} \quad (2)$$

որտեղ թույլատրելի արժեքների D բազմությունը ձևավորվում է (2) գծային սահմանափակումներով, որոնցում A -ն սահմանափակումների $(m \times n)$ չափայնությամբ մատրիցն է, b –ն՝ ազատ անդամների $(m \times 1)$ չափայնությամբ վեկտորը, X -ը՝ փնտրվող փոփոխականների $(n \times 1)$ չափայնությամբ վեկտորը, $f_i(X), i = 1, k$ – երը նպատակային ֆունկցիաներն են:

Կազմենք գլոբալ նպատակային ֆունկցիան [1-4]՝

$$F(X, W) = w_1 f_1(X) + w_2 f_2(X) + \dots + w_k f_k(X) \rightarrow \max, \quad X \in D, \quad (3)$$

որտեղ $W = (w_1, w_2, \dots, w_k)^T$ –ն կշռային գործակիցների $(k \times 1)$ չափայնությամբ վեկտորն է: Վեկտորի տարրերը պետք բավարարեն հետևյալ պայմաններին՝

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1, w_i \geq 0: \quad (4)$$

(3) գլոբալ նպատակային ֆունկցիայի և (4) պայմանների հաշվառմամբ (1)-(2) բազմաչափանիշային խնդիրը կհանգի հետևյալ բազմապարամետրական միաչափանիշային խնդրին, որտեղ կշռային գործակիցները կդիտարկենք որպես պարամետրեր.

$$F(X(w_1, w_2, \dots, w_k)) = w_1 f_1(X) + w_2 f_2(X) + \dots + w_k f_k(X) \rightarrow \max, \quad X \in D, \quad (5)$$

$$D: \begin{cases} A \cdot X(w_1, w_2, \dots, w_k) \leq b, \\ x_i(w_1, w_2, \dots, w_k) \geq 0, i = 1, n, \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1, w_i \geq 0: \quad (7)$$

(5)-(7) բազմապարամետրական խնդրի լուծման արդյունքում կարող ենք ստանալ կշռային գործակիցների արժեքների փոփոխման տարբեր միջակայքերի համար բազմաչափանիշային խնդրի Պարետո օպտիմալ լուծումները: Ստացված լուծումները վճիռ կայացնողին հնարավորություն կտան ձևավորված միջակայ-

քերից ընտրել կշռային գործակիցների արժեքները՝ ըստ տվյալ միջակայքում գլոբալ նպատակային ֆունկցիայի կամ առանձին նպատակային ֆունկցիաների օպտիմալ արժեքների: (5)-(7) բազմապարամետրական խնդրում պարամետրերի քանակը կարելի է մեկով պակասեցնել, եթե (7) պայմանի հաշվառմամբ ընդունենք.

$$w_k = 1 - \sum_{i=1}^{k-1} w_i : \quad (8)$$

Այսպիսով, (5)-(7) բազմապարամետրական խնդիրը կընդունի հետևյալ տեսքը՝

$$F(X(w_1, w_2, \dots, w_{k-1})) = w_1 f_1(X) + w_2 f_2(X) + \dots + (1 - \sum_{i=1}^{k-1} w_i) f_k(X) \rightarrow \max_{X \in D}, \quad (9)$$

$$D: \begin{cases} A \cdot X(w_1, w_2, \dots, w_{k-1}) \leq b, \\ x_i(w_1, w_2, \dots, w_{k-1}) \geq 0, \quad i = 1, n, \end{cases} \quad (10)$$

$$0 \leq w_i \leq 1, \quad i = 1, k-1; \quad 0 \leq \sum_{i=1}^{k-1} w_i \leq 1 : \quad (11)$$

Պարամետրական տարբեր տիպերի խնդիրների լուծման նպատակով հաջողությամբ կիրառվում են դիֆերենցիալ միաչափ և բազմաչափ դիֆերենցիալ ձևափոխությունները [14-16]: Ստացված $(k-1)$ պարամետրերով, n փոփոխականներով գծային բազմապարամետրական (9)-(11) խնդիրը լուծելու համար, կիրառենք [17]-ում առաջարկված եղանակը՝ հիմնված բազմաչափ դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա [10], որոնք անալիտիկ $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ բազմապարամետրական ֆունկցիայի համար ներկայացվում են հետևյալ կերպ՝

- ուղիղ ձևափոխությունը՝

$$U(K_1, K_2, \dots, K_m) = \frac{H_1^{K_1} H_2^{K_2} \dots H_m^{K_m}}{K_1! K_2! \dots K_m!} \left[\frac{\partial^{K_1+K_2+\dots+K_m} u(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\partial x_1^{K_1} \partial x_2^{K_2} \dots \partial x_m^{K_m}} \right]_{\substack{x_1=t_1, \\ \dots \\ x_m=t_m}}, \quad (12)$$

- հակադարձ ձևափոխությունը՝

$$u(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{f=0}^{\infty} \sum_{K_1+K_2+\dots+K_m=f} \left(\frac{x_1-t_1}{H_1} \right)^{K_1} \left(\frac{x_2-t_2}{H_2} \right)^{K_2} \dots \left(\frac{x_m-t_m}{H_m} \right)^{K_m} U(K_1, K_2, \dots, K_m), \quad (13)$$

որտեղ $U(x_1, x_2, \dots, x_m)$ -ն բնօրինակն է (ենթադրում ենք, որ գոյություն ունեն այս ֆունկցիայի բոլոր մասնակի ածանցյալներն ըստ $x_1, x_2, \dots, x_m$ փոփոխականների), $U(K_1, K_2, \dots, K_m)$ - ն՝ ամբողջաթիվ $K_1, K_2, \dots, K_m$ արգումենտներից կախված պատկերը ($U(K_1, K_2, \dots, K_m) \cong U(x_1, x_2, \dots, x_m)$), $H_1, H_2, \dots, H_m$ -երը՝ մասշտաբային գործակիցները, $t_1, t_2, \dots, t_m$ - երը՝ մոտարկման կենտրոնի կոորդինատները:

Կիրառելով (12) ուղիղ դիֆերենցիալ ձևափոխությունները (մոտարկման առաջին կենտրոնն ընդունում ենք բոլոր պարամետրերի համար զրոյական արժեքները) (9)-(11)-ը խնդրի պարամետրական կախվածություններով տարրերի նկատմամբ և [17] աշխատանքում առաջարկված սիմպլեքս-ձևափոխությունների Դ-պատկերների առնչությունները, կազմակերպենք իտերացիոն գործընթաց, որի յուրաքանչյուր քայլում կձևավորվեն դիֆերենցիալ բազմաչափ ուղիղ ձևափոխություններով հաշվված դիֆերենցիալ պատկերներով սիմպլեքս-աղյուսակներ, իրականացնենք սիմպլեքս-ձևափոխություններ դիֆերենցիալ պատկերների տիրույթում, ստուգենք կանգառի պայմանները, և համաձայն պայմանների՝ կիրականացվի կամ հաջորդ իտերացիան, կամ հաջորդ քայլը: Հաջորդ իտերացիան կիրականացվի, եթե կանգառի պայմանները չեն բավարարվել, դեռևս անհրաժեշտ է փոփոխություններ կատարել բազիսային վեկտորի տարրերում ու կատարել սիմպլեքս ձևափոխություններ: Եթե կանգառի պայմանները բավարարվել են, այսինքն ձևավորվել է օպտիմալ բազիս, ապա կազմում ենք օպտիմալության միջակայքերը որոշող պայմանները հետևյալ կերպ. տվյալ քայլի վերջին իտերացիային համապատասխան աղյուսակից, որը պարունակում է դիֆերենցիալ պատկերները, (13) առնչությամբ վերականգնվում են բնօրինակները, ձևավորվում է օպտիմալության միջակայքի որոշման հետևյալ խնդիրը՝

$$\sum_{i=1}^{k-1} w_i \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$D: \left\{ \Lambda_j(w_1, w_2, \dots, w_{k-1}) \geq 0, j = 1, \dots, m, \right.$$

որտեղ $\Lambda_j(w_1, w_2, \dots, w_{k-1})$, $j = 1, \dots, n$ - երբ (13) առնչությամբ վերականգնված սիմպլեքս-տարբերությունների բազմապարամետրական ֆունկցիաներն են: (14) խնդրի լուծման արդյունքում ստացված $w_1^*, w_2^*, \dots, w_{k-1}^*$ արժեքներով կձևավորվի $w_1^*, w_2^*, \dots, w_{k-1}^*$ պարամետրերի՝ կշռային գործակիցների փոփոխման 1-ին միջակայքը, որում նպատակային ֆունկցիան ևս կունենա բազմապարամետրական տեսք ու կորոշվի տվյալ քայլի վերջին իտերացիայում ստացված սիմպլեքս աղյուսակի բազիսային լուծումների արժեքների ու $F(X(w_1, w_2, \dots, w_{k-1}))$ ֆունկցիայի միջոցով: Հաջորդ միջակայքը ձևավորելու համար որպես մոտարկման կենտրոն ընտրվում են պարամետրերի $w_1^*, w_2^*, \dots, w_{k-1}^*$ արժեքները, հաշվվում են այդ կենտրոնում դիֆերենցիալ պատկերները, և կառուցվում է տվյալ քայլին համապատասխան սիմպլեքս-աղյուսակը: Վերը նկարագրված ընթացակարգով

կատարվում են սիմպլեքս-ձևափոխություններ, ստուգվում կանգառի պայմանները, կազմվում օպտիմալության միջակայքերը որոշող խնդիրները: Քայլերը կատարվում են այնքան ժամանակ, քանի դեռ կշռային գործակիցների արժեքները բավարարում են (11) պայմանները:

Մոդելային օրինակ: Դիտարկենք բազմաչափանիշային օպտիմալացման հետևյալ խնդիրը [18]՝

$$\begin{cases} x_1 + 8x_2 \rightarrow \max, \\ 2x_1 + x_2 + 4x_3 \rightarrow \max, \\ x_3 + x_4 \rightarrow \max, \end{cases} \quad X \in D, \quad (15)$$

$$D: \begin{cases} 30x_1 + x_2 + 14x_3 \leq 10, \\ 3x_1 + x_2 + x_4 \leq 5, \\ 7x_1 + 8x_2 + 15x_3 \leq 2, \\ 14x_1 + 6x_2 + 4x_3 \leq 11: \end{cases} \quad (16)$$

Համաձայն (4)-ի՝ ներմուծենք կշռային գործակիցները և (8)-ի կիրառմամբ ներկայացնենք (9)-(11) բազմապարամետրական խնդիրը.

$$F(X(w_1, w_2)) = (w_1 + 2w_2)x_1 + (8w_1 + w_2)x_2 + (1 - w_1 + 3w_2)x_3 + (1 - w_1 - w_2)x_4 \rightarrow \max, \quad X \in D, \quad (17)$$

$$D: \begin{cases} 30x_1 + x_2 + 14x_3 \leq 10, \\ 3x_1 + x_2 + x_4 \leq 5, \\ 7x_1 + 8x_2 + 15x_3 \leq 2, \\ 14x_1 + 6x_2 + 4x_3 \leq 11, \end{cases} \quad (18)$$

$$0 \leq w_i \leq 1, \quad i = 1, 2; \quad 0 \leq \sum_{i=1}^2 w_i \leq 1: \quad (19)$$

Ստացված երկպարամետրական օպտիմալացման (17)-(19) խնդրի՝ վերը նկարագրված ընթացակարգով լուծման արդյունքում ձևավորվում են աղյուսակում ներկայացված միջակայքերը, որոնցից յուրաքանչյուրի համար ստացվում են նպատակային (17) օպտիմալ ֆունկցիան՝ կախված w_1 , w_2 պարամետրերից, և փոփոխականների օպտիմալ արժեքները: Լուծման իտերացիոն ընթացակարգը սկսվել է $w_1 = 0, w_2 = 0$ մոտարկման կենտրոնից: Մասշտաբային գործակիցները ընտրվել են՝ $H_1 = H_2 = 1$, իսկ պատկերների քանակը՝ 2-ական յուրաքանչյուր պարամետրի համար: Նախնական այս պայմաններով ձևավորվում է առաջին քայլի սիմպլեքս-աղյուսակը, և կատարվում են սիմպլեքս-ձևափոխություններ պատկերների տիրույթում: Կանգառի պայմանի բավարարումից հետո կազմվում է (14) խնդիրը՝

$$w_1 + w_2 \rightarrow \max, \quad X \in D$$

$$\begin{cases} 3.966666666666667 - 4.1w_2 - 4.966666666666667w_1 \leq 0, \\ 2.033333333333333 - 0.899999999999999 * w_2 - 10.03333333333333 * w_1 \leq 0, \\ 0.06666666666666667 + 0.2 * w_2 - 0.06666666666666667 * w_1 \leq 0, \\ 0.25 - 0.25 * w_2 - 0.25 * w_1 \leq 0, \end{cases}$$

որի օպտիմալ լուծումն է՝ $w_1 = 0.178041$, $w_2 = 0.274123$: Երկպարամետրական (17)-(19) խնդրի լուծման առաջին միջակայքը ձևավորվեց (աղյուսակի 1-ին միջակայքը):

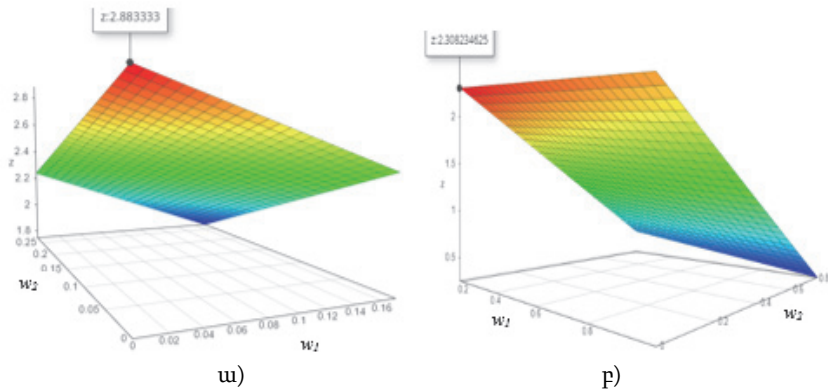
Հաջորդ միջակայքը ձևավորելու համար որպես մոտարկման կենտրոն ընտրվում են ստացված $w_1 = 0.178041$, $w_2 = 0.274123$ արժեքները, դրանց համապատասխան կառուցվում է նոր սիմպլեքս-աղյուսակը, կատարվում են սիմպլեքս-ձևափոխությունները: Խնդրի լուծման արդյունքները ներկայացված են աղյուսակում: Նկարում ներկայացված են աղյուսակի 1-ին և 2-րդ միջակայքերում տրված ընդհանրական նպատակային ֆունկցիայի գրաֆիկները՝ կախված w_1 , w_2 պարամետրերից: Գրաֆիկներում նշված է ընդհանրական նպատակային ֆունկցիայի մաքսիմումը:

Ստացված օպտիմալ լուծումը վճիռ կայացնող համակարգին հնարավորություն կտա ընտրել կշռային գործակիցների արժեքները ձևավորված միջակայքերից, արդեն իսկ ունենալով ինչպես (15) միաչափանիշային, այնպես էլ (17) ընդհանրական նպատակային ֆունկցիաների արժեքները:

Աղյուսակ

Երկպարամետրական խնդրի լուծման արդյունքները

h.	Միջակայքը	Օպտիմալ լուծումը	
		Նպատակային ֆունկցիան	Փոփոխականների վեկտորը
1	$0 \leq w_1 \leq 0.178041$ $0 \leq w_2 \leq 0.274123$	$F^* = 2.883333 - 2.883333w_1 - 2.35w_2$	$X^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1333 \\ 2.75 \end{pmatrix}$
2	$0.178041 \leq w_1 < 1$ $0 \leq w_2 < 0.821959$	$F^* = 2.375 - 0.375w_1 - 2.125w_2$	$X^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.25 \\ 0 \\ 2.375 \end{pmatrix}$
3	$0 \leq w_1 \leq 0.15$ $0.839 \leq w_2 \leq 1$	$F^* = 1.75 - 1.46429w_1 - 1.17857w_2$	$X^* = \begin{pmatrix} 0.285714 \\ 0 \\ 0 \\ 1.75 \end{pmatrix}$
4	$w_1 \geq 0.1579$ $w_2 = 1 - w_1$	$F^* = 2w_1 + 0.25w_2$	$X^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.25 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$
5	$w_1 \leq 0.1579$ $w_2 = 1 - w_1$	$F^* = 0.285714w_1 + 0.571428w_2$	$X^* = \begin{pmatrix} 0.285714 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$



Նկ. Հնդհանրական նպատակային ֆունկցիայի գրաֆիկները աղյուսակի 1-ին (ա) և 2-րդ (բ) միջակայքերում

Եզրակացություն: Բազմաչափանիշային օպտիմալացման խնդիրների լուծման նպատակով առաջարկվում է կշռային գործակիցների ներմուծմամբ ստացված բազմապարամետրական խնդիրը լուծել բազմաչափ դիֆերենցիալ և սիմպլեքս-ձևափոխությունների համատեղ կիրառմամբ: Լուծման արդյունքում պարամետրերի փոփոխման ձևավորված միջակայքերը հնարավորություն կտան վճիռ կայացնողին ընտրել կշռային գործակիցների արժեքները՝ տվյալ միջակայքում որոշված նպատակային ֆունկցիայի ու փոփոխականների օպտիմալ արժեքների վերլուծության հիման վրա: Լուծվել է բազմաչափանիշային գծային օպտիմալացման խնդիր, ստացվել են պարամետրերի փոփոխման միջակայքերը, օպտիմալ նպատակային ֆունկցիան և փոփոխականների օպտիմալ արժեքները յուրաքանչյուր միջակայքում:

Աշխատանքը կատարվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի «Ավտոմատացում և էլեկտրամագնիսական համակարգեր» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Hakanen Jussi, Allmendinger Richard.** Multiobjective optimization and decision making in engineering sciences // Optimization and Engineering. – 2021. -22. – P.1031-1037.
2. **Hiller S.F., Gerald J.L.** Introduction to operations research. – New York: McGraw-Hill, 2014. -1050 p.
3. **Jensen A. Paul, Jonathan B.** Operations Research: Models and Methods. - John Wiley & Sons, Australia, 2002. -675 p.
4. **Marler R., Arora Jasbir.** Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering //Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2004. -26. –P. 369-395. 10.1007/s00158-003-0368-6.

5. **Marler R.T., Arora J.S.** The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights //Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2010. -41. – P. 853–862.
6. **Chunming Liu, Xin Xu, Dewen Hu.** Multiobjective Reinforcement Learning: A Comprehensive Overview // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics: systems. -2015. - Vol. 45, No. 3. - P. 385-398.
7. **Daniel Chi Kit Ngai, Nelson Hon Ching Yung.** A Multiple-Goal Reinforcement Learning Method for Complex Vehicle Overtaking Maneuvers // IEEE transactions on intelligent transportation systems. - 2011. - Vol. 12, No. 2. - P.509-522.
8. **Marler R.T., Arora, J.S.** Function-transformation methods for multi-objective optimization //Engineering Optimization. – 2005. -Vol. 37, No. 6. – P. 551–570.
9. **Wiecek Margaret M., Ehrgott Matthias, Engau Alexander.** Continuous Multiobjective Programming / S. Greco, et al (eds.) //Multiple Criteria Decision Analysis, International Series in Operations Research & Management Science 233. - 2016. – P. 739-815.
10. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные преобразования функций и уравнений. - Киев: Наукова думка, 1980. – 419 с.
11. **Пухов Г.Е.** Дифференциальные спектры и модели.- Киев: Наукова думка, 1990. – 184 с.
12. **Таха Х.** Введение в исследование операций. – М.: Мир, 2010. -912 с.
13. On multi-parametric programming and its applications in process systems engineering/ **Richard Oberdieck, Nikolaos A. Diangelakis, Ioana Nascu, Maria M. Papathanasiou, Muxin Sun, Styliani Avraamidou, Efstratios N. Pistikopoulos** // Chemical Engineering Research and Design. – 2016. –Vol. 116. –P. 61-82.
14. **Симонян С.О., Аветисян А.Г.** Прикладная теория дифференциальных преобразований: Монография. – Ереван: Издательство ГИУА “Чартарагет”, 2010. – 361 с.
15. **Գյուլզադյան Լ.Ս.** Նպատակային ֆունկցիայի պարամետրական գործակիցներով գծային ծրագրավորման խնդիրների լուծման եղանակ՝ հիմնված դիֆերենցիալ ձևափոխությունների վրա // ՀՊՀՀ ԼՐԱԲԵԳ. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2012. - Մաս 1. - էջ. 341-347:
16. **Аветисян А.Г., Гюльзаян Л.С.** Метод решения задач параметрического линейного программирования, основанный на дифференциальных преобразованиях //Известия Томского политехнического университета. Серия “Математика и механика. Физика”. – Томск, 2014. – Т. 324, № 2. – С. 25-29.
17. **Аветисян А.Г., Гюльзаян Л.С.** Метод решения многопараметрических задач ЛП, основанный на дифференциальных преобразованиях //Известия НАН РА и ГИУА. Серия Техн. науки. – 2014. - Т. LXVII, №2. - С.235-243.
18. **Семененко О.В.** Метод решения задач многокритериального программирования с определением весовых коэффициентов // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. - 2011. - № 9. - С. 89-97.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 27.07.2021:

А.Г. АВЕТИСЯН, Д.А. КАЗАРЯН, А.Н. БАБАЯН

**РЕШЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНОГО
ПРОГРАММИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОМЕРНЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Предлагается применять многомерные дифференциальные преобразования для решения многокритериальной задачи линейного программирования. С помощью весовых коэффициентов, которые далее рассматриваются как параметры, многокритериальная задача представляется многопараметрической однокритериальной задачей с обобщенной целевой функцией. Полученная многопараметрическая задача решается с помощью многомерных дифференциальных и симплекс-преобразований. В результате решения многопараметрической задачи линейного программирования формируются области изменения значений параметров - весовых коэффициентов, а также значения переменных и зависимости обобщенных целевых функций.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, весовые коэффициенты, многомерные дифференциальные преобразования, симплекс-преобразования.

A.G. AVETISYAN, D.A. GHAZARYAN, A.N. BABAYAN

**SOLVING LINEAR MULTI-OBJECTIVE PROGRAMMING PROBLEMS BY
USING MULTIDIMENSIONAL DIFFERENTIAL TRANSFORMS**

Multidimensional differential transforms are proposed to be applied for the solution of the linear multi-objective programming problems. The multi-objective problem is reduced to the one-dimensional multiparametric problem with a generalized objective function by inserting weight coefficients which are considered as parameters. The obtained multiparametric problem is solved by using multidimensional differential and simplex transforms. The change intervals of the weight coefficients (parameters), the multiparametric optimal objective function and the optimal values of the variables in each change interval are formed as a result of the solution.

Keywords: multi-objective optimization, weight coefficients, multidimensional differential transforms, simplex transforms.

УДК 681.865.8

АВТОМАТИЗАЦИЯ
И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

DOI 10.53297/0002306X-2021.v74.4-489

О.Н. ГАСПАРЯН, А.А. АСАТРЯН

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОТСУТСТВИИ
СИГНАЛОВ GPS

Многороторные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются в различных военных и гражданских областях. Полет БПЛА по заданным траекториям при этом осуществляется с использованием сигналов GPS, которые определяют координаты аппарата с точностью от десятков сантиметров до нескольких метров. Однако на практике возможны ситуации, когда сигналы GPS искажены или отсутствуют. В таких случаях важной задачей является определение как координат самого БПЛА, так и координат наземных объектов, за которыми осуществляется наблюдение с БПЛА.

В работе предлагается подход к определению геодезических координат БПЛА и наземных целей в случае, когда сигналы GPS отсутствуют, но известны координаты двух наземных, так называемых “опорных” объектов. В качестве опорных выбираются объекты, которые выделяются на фоне местности и могут быть легко идентифицированы, например, отдельные строения, опоры линий электропередач, радиорелейные мачты и т.д. Разработан графический интерфейс пользователя в среде пакета MATLAB, позволяющий автоматизировать процедуру расчета координат БПЛА и цели при отсутствии сигналов GPS.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, геодезические координаты, карданный подвес, лазерный дальномер, сигналы GPS, графический интерфейс пользователя, ПИД-регулятор.

Введение. Многороторные беспилотные летательные аппараты в настоящее время широко используются в различных военных и гражданских областях, в частности, при проведении спасательных и сельскохозяйственных работ, определении очагов пожаров в лесах, контроле технического состояния зданий, дорог и железнодорожных путей и др. [1-3]. Полет БПЛА по заданным траекториям при этом осуществляется с использованием сигналов GPS (Global Positioning System) (или ГЛОНАСС), которые определяют координаты аппарата с достаточно высокой точностью (от десятков сантиметров до нескольких метров). Вместе с тем на практике возможны ситуации, когда в силу разных причин сигналы GPS искажены или отсутствуют. В таких случаях весьма важной задачей является определение как координат самого БПЛА, так и координат наземных объектов, за которыми осуществляется наблюдение.

В настоящей работе предлагается подход к определению геодезических координат БПЛА и наземных объектов в случае, когда сигналы GPS отсутствуют, но известны координаты двух наземных, так называемых “опорных” объектов. На практике в качестве опорных выбираются объекты, которые выделяются на фоне местности и могут быть легко идентифицированы. Например, это могут быть отдельно расположенные строения, опоры линий электропередач, радиорелейные мачты и т.д.

Описание системы. Пусть $\{I\}$ обозначает правостороннюю инерциальную систему координат (СК) с осями x_I, y_I, z_I , а $\{B\}$ - жестко связанную с БПЛА СК с осями x_B, y_B, z_B , направленными вдоль главных осей инерции (рис. 1). Положение центра масс БПЛА в инерциальной СК $\{I\}$ задается вектором $\xi = (x, y, z)^T \in \{I\}$, а ориентация СК $\{B\}$ по отношению к $\{I\}$ описывается в общем случае ортогональной матрицей вращения [1]:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\theta - \sin\phi \sin\psi \sin\theta & -\cos\phi \sin\psi & \cos\psi \sin\theta + \cos\theta \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi + \cos\psi \sin\phi \sin\theta & \cos\phi \cos\psi & \sin\psi \sin\theta - \cos\psi \cos\theta \sin\phi \\ -\cos\phi \sin\theta & \sin\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Переход от $\{I\}$ к $\{B\}$ осуществляется последовательными вращениями на углы Эйлера, обозначенные, соответственно, ψ (рыскание), ϕ (крен) и θ (тангаж), которые можно объединить в псевдовектор $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T$.

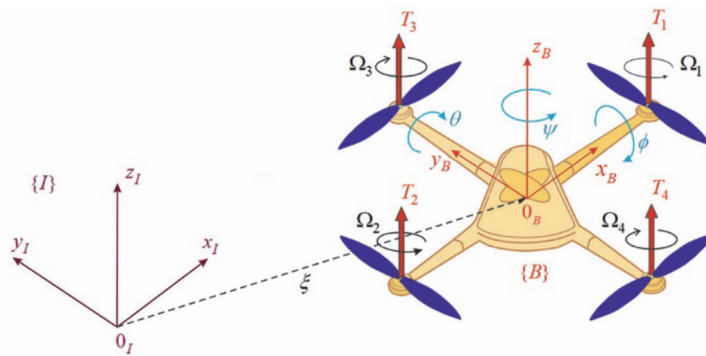


Рис. 1. Схематическое представление БПЛА

Стандартные нелинейные уравнения движения БПЛА имеют вид [1, 2]

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = -mgz_I + RF, \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + \omega \times (J\omega + Y_R \Omega) = \tau, \quad (3)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = P(\eta)\omega, \quad (4)$$

где m - масса БПЛА; g - гравитационная постоянная; J - постоянный тензор инерции БПЛА; $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in \{B\}$ - вектор угловой скорости СК $\{B\}$ по отношению к инерциальной СК $\{I\}$; J_R - идентичные моменты инерции роторов; Ω - суммарная угловая скорость вращения роторов.

Матрица $P(\eta)$ в кинематических уравнениях Эйлера (strapdown equation) (4) имеет вид

$$P(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ \sin \theta \operatorname{tg} \phi & 1 & -\cos \theta \operatorname{tg} \phi \\ -\sin \theta / \cos \phi & 0 & \cos \theta / \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (5)$$

На БПЛА имеются три комплекта видеокамер с лазерными дальномерами, которые установлены на корпусе аппарата в двухосных кардановых подвесах. Подобное сочетание видеокамер с лазерными дальномерами (в дальнейшем для краткости будем называть их просто камерами) в кардановых подвесах широко используется на практике [4-7]. На рис. 2 в качестве примера показаны два варианта таких систем, представленных на рынке.



Рис. 2. Камеры с лазерными дальномерами в кардановых повесах

Свяжем с каждой из камер ортогональную СК $z_i x_i y_i$ ($i=1,2,3$). Аналогично свяжем с каждым кардановым подвесом ортогональную СК $z_i^G x_i^G y_i^G$ ($i=1,2,3$), где оси z_i^G и y_i^G являются осями вращения (рис. 3).

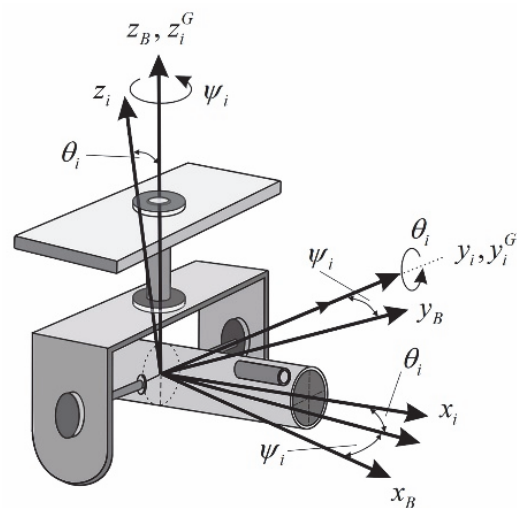


Рис. 3. Оси координат, связанные с камерами

Первые две камеры предназначены для наведения на опорные объекты с известными координатами. В исходном положении СК $z_i x_i y_i$ и $z_i^G x_i^G y_i^G$ ($i = 1, 2, 3$) всех трех камер совпадают с жестко связанной с БПЛА СК $x_B y_B z_B$ (рис. 4).



Рис. 4. Оси координат, связанные с БПЛА

Наведение камер на опорные объекты осуществляется последовательными вращениями на углы ψ_i, θ_i вокруг осей карданных подвесов z_i^G и y_i^G ($i = 1, 2$) первых двух камер. Когда оба опорных объекта оказываются в центральной области поля зрения соответствующих камер, оси подвесов фиксируются, и СК $z_i x_i y_i$ ($i = 1, 2$) оказываются жестко фиксированными по отношению к корпусу БПЛА. Третья камера предназначена для непрерывного отслеживания цели, геодезические координаты которой необходимо определить.

Отметим, что по отношению к вектору $\varepsilon(t)$ “малых” углов поворота корпуса БПЛА оси x_i каждой камеры могут быть рассмотрены как “оптические оси”, а оси z_i и y_i – как “оси чувствительности” или “измерительные оси”. Первые две камеры дают нам четыре оси чувствительности. Для образования трехосной “измерительной” СК выберем ось y_1 первой камеры и оси z_2 и y_2 второй камеры. Если $\theta_1 = 0^\circ$, $\psi_1 = -90^\circ$ и $\theta_2 = \psi_2 = 0^\circ$, то измерительная СК $y_1 y_2 z_2$ является ортогональной и совпадает с жестко связанной с главными осями инерции БПЛА СК $x_B y_B z_B$. Нумеруя камеры индексами 1, 2, 3, получим следующие выражения для соответствующих матриц вращения R_i ($i = 1, 2, 3$), описывающих повороты ортогональных СК, жестко связанных с камерами, по отношению к базовой СК $x_B y_B z_B$:

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \psi_i & -\sin \psi_i & \cos \psi_i \sin \vartheta_i \\ \cos \theta_i \sin \psi_i & \cos \psi_i & \sin \psi_i \sin \vartheta_i \\ -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Каждый столбец R_i в (6) определяет направляющие косинусы координатных осей $z_i x_i y_i$, жестко связанных с камерами, по отношению к СК $x_B y_B z_B$.

Считая, что углы поворотов корпуса БПЛА по отношению к инерциальной СК в режиме свободного парения (hovering mode) являются малыми, эти углы можно рассматривать как компоненты вектора ошибок $\varepsilon(t)$. Переходы от этого вектора к СК $z_i x_i y_i$ даются выражениями

$$\varepsilon_i(t) = R_i^T \varepsilon(t) \quad (i = 1, 2, 3), \quad (7)$$

где

$$R_i^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \psi_i & \cos \theta_i \sin \psi_i & -\sin \theta_i \\ -\sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ \cos \psi_i \sin \vartheta_i & \sin \psi_i \sin \vartheta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Комбинируя вторую и третью строки матрицы R_2^T со второй строкой матрицы R_1^T , взятой как первая строка результирующей матрицы, получим следующую матрицу R_S :

$$R_S = \begin{bmatrix} -\sin \psi_1 & \cos \psi_1 & 0 \\ -\sin \psi_2 & \cos \psi_2 & 0 \\ \sin \theta_2 \cos \psi_2 & \sin \theta_2 \sin \psi_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

строки которой являются направляющими косинусами осей измерительной СК $y_1 y_2 z_2$ по отношению к СК $x_B y_B z_B$. Физически эта матрица связывает выходные сигналы камер с вектором ошибок $\varepsilon(t)$. Следует подчеркнуть, что матрица R_S (9) не является ортогональной, а её детерминант равен

$$DR_S = \det(R_S) = \cos \theta_2 \sin(\psi_2 - \psi_1). \quad (10)$$

Матрицу R_S (9) можно представить в следующей факторизованной форме:

$$R_S = R_N R_2^T, \quad (11)$$

т.е. как произведение ортогональной матрицы R_1^T и матрицы R_N , которая характеризует *степень неортогональности* измерительной СК $y_2 y_1 z_1$. Непосредственный подсчет показывает, что матрица R_N в (11) равна

$$R_N = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \sin(\psi_2 - \psi_1) & \cos(\psi_2 - \psi_1) & \sin \theta_2 \sin(\psi_2 - \psi_1) \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

а её детерминант совпадает с детерминантом (10) матрицы R_S (9).

Целесообразность представления матрицы R_S (9) в факторизованной форме (11) состоит в том, что это позволяет упростить процедуру определения геодезических координат наземной цели, основываясь на известных координатах опорных объектов. Кроме того, представление R_S в форме (11) дает возможность судить о точности стабилизации БПЛА.

Поскольку матрица R_2^T в (11) является ортогональной, то нетрудно показать, что положительно-определенная симметричная матрица $R_S R_S^T$ равна матрице $R_N R_N^T$. Это означает, что спектральная норма матрицы R_S (9) равна спектральной норме матрицы R_N (12):

$$\|R_S\| = \|R_N\| = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2 + \sqrt{3 + \cos(2\theta_2) \cos 2(\psi_1 - \psi_2) + \cos 2(\psi_1 - \psi_2) - \cos 2\theta_2}}. \quad (13)$$

При $\psi_1 = \psi_2 - \pi$ выражение (13) упрощается и принимает вид

$$\|R_s\| = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2 + \sqrt{2(1 - \cos 2\theta_2)}}. \quad (14)$$

Если к тому же $\theta_2 = 0$, то $\|R_s\| = 1$.

Наведение третьей камеры на наземную цель с неизвестными координатами и последующее слежение за целью осуществляются при помощи специальной автоматической системы с двумя степенями свободы, которая сканирует территорию, обнаруживает и идентифицирует цель, а также осуществляет последующее слежение за ней. Матрица R_3^T , связывающая вектор ошибок $\varepsilon(t)$ с угловыми отклонениями третьей камеры по отношению к СК $x_B y_B z_B$, имеет вид

$$R_3^T(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta_3(t) \cos \psi_3(t) & \cos \theta_3(t) \sin \psi_3(t) & -\sin \theta_3(t) \\ -\sin \psi_3(t) & \cos \psi_3(t) & 0 \\ \cos \psi_3(t) \sin \theta_3(t) & \sin \psi_3(t) \sin \theta_3(t) & \cos \theta_3(t) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где подчеркивается, что углы $\theta_3(t)$ и $\psi_3(t)$ являются функциями времени, в отличие от углов ψ_1 , ψ_2 и θ_1 в R_s (9), которые являются постоянными.

Отметим, что первые строки матриц R_1^T , R_2^T в (8) и R_3^T в (15) являются направляющими косинусами оптических осей соответствующих камер, которые совпадают по направлению с линией визирования лазерных дальномеров.

Выражения (6)-(15) используются в разработанном алгоритме определения координат БПЛА и наземных объектов по известным координатам опорных объектов в случае отсутствия сигналов GPS.

Определение координат БПЛА и наземных объектов. На основе описанного многороторного БПЛА с комплектом трех видеокамер с лазерными дальномерами разработан алгоритм определения неизвестных геодезических координат наземного объекта (цели) при имеющейся информации о координатах двух опорных объектов на поверхности Земли, а также о высоте БПЛА над уровнем моря. При этом определение координат цели при отсутствии сигналов GPS состоит из двух этапов. На первом этапе определяются неизвестные координаты самого БПЛА. На втором этапе, исходя из информации о координатах опорных объектах и БПЛА, находятся геодезические координаты цели, на которую наведена третья камера. Отметим, что под координатами здесь и далее понимаются геодезические координаты (широта и долгота) на поверхности Земли, при определении которых Земля принимается не за эллипсоид

вращения, а за шар, а также высота на уровне моря, отсчитываемая от уровня “сглаженной” поверхности (так называемого геоида) [8].

Схематически предложенный алгоритм вычисления координат наземной цели по известным координатам опорных объектов при отсутствии сигналов GPS можно описать следующим образом. Исходными данными алгоритма являются координаты x_1, y_1, h_1 и x_2, y_2, h_2 первого и второго опорных объектов, которые находятся в базе данных бортового компьютера, измеренные расстояния L_1, L_2, L_3 от БПЛА до опорных объектов и цели, т.е. сигналы с лазерных дальномеров, а также высота h_{UAV} БПЛА над уровнем моря или над поверхностью Земли. Величина h_{UAV} определяется соответствующими датчиками, например, датчиком давления, ультразвуковым сонаром или их комбинацией и т.д., входящими в стандартный набор измерительных устройств любого БПЛА. По этим данным определяются геодезические координаты самого БПЛА, что дает возможность вычислить текущие координаты цели, на которую наведена третья камера.

Описанный алгоритм реализован на языке программирования MATLAB. Разработан соответствующий графический интерфейс пользователя (ГИП) UAV_GUI. Помимо автоматизации расчета координат БПЛА и наземного объекта, ГИП позволяет произвести выбор параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов систем наведения камер на опорные объекты и наземную цель. Кроме того, ГИП обеспечивает возможность выбора параметров ПИД-регуляторов квадрокоптера с произвольной схемой установки моторов (пропеллеров), а также осуществления исследования динамики полета квадрокоптера при выбранных параметрах регуляторов.

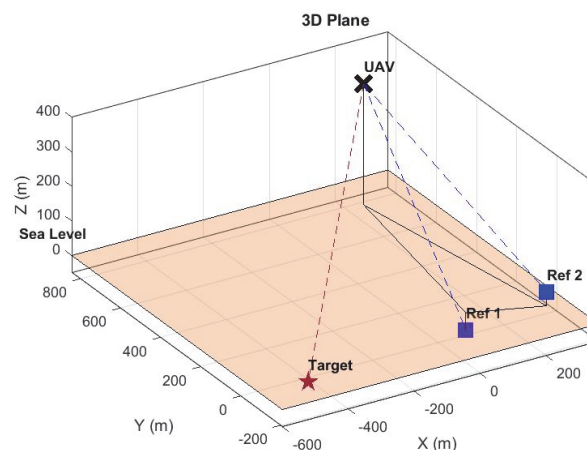


Рис.5. Результаты расчета координат цели (трехмерный вид)

В качестве иллюстрации на рис. 5 и 6 показаны результаты расчетов при помощи ГИП UAV_GUI координат наземной цели по указанным выше исходным данным.

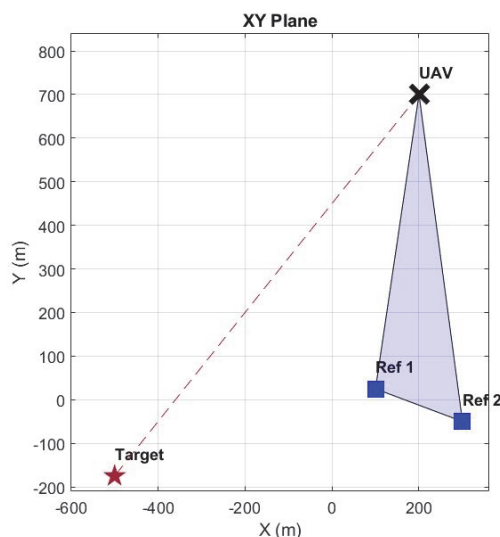


Рис.6. Результаты расчета координат цели (вид сверху)

Заключение. В статье описана система определения геодезических координат (широты и долготы) наземных объектов с БПЛА при отсутствии сигналов GPS. Предлагаемый подход основан на использовании трех оптических камер и лазерных дальномеров, установленных на корпусе БПЛА в двухосных кардановых подвесах, где первые две камеры наводятся на наземные опорные объекты с известными координатами, а третья камера отслеживает цель, координаты которой необходимо определить. Предложенный алгоритм определения координат цели реализован на языке программирования MATLAB. Разработан соответствующий графический интерфейс пользователя, который позволяет автоматически вычислять координаты цели по заданным исходным данным, а также осуществлять выбор параметров ПИД регуляторов систем наведения камер на требуемые объекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mahony R., Kumar V., and Corke P.** Multicopter aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor//Robotics and Automation Magazine.-2012.-19(3).- P. 20–32.
2. **Bresciani T.** Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter.- Department of Automatic Control.-Lund University, 2008.- 184 p.
3. **Gasparyan O.N.** On Application of Feedback Linearization in Control Systems of Multicopters, Advanced Technologies in Robotics and Intelligent Systems// Proceedings of ITR 2019.- Springer, Switzerland, 2020.-P. 343-351.

4. Dobrokhodov V.N., Kaminer I.I., Jones K.D., and Ghabcheloo R. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVs//Proceedings of the 2006 American Control Conference.-Minneapolis, MN, USA, June 2006.-P. 907-917.
5. Kim Z.W. and Sengupta R. Target detection and position likelihood using an aerial image sensor//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation.- Pasadena, CA, USA, May 2008.- P. 59-64.
6. Abdessameud A., Janabi-Sharifi F. Image-based tracking control of VTOL unmanned aerial vehicles//Automatica.-2015.-53-P. 111-119.
7. Shirzadeh M., Amirkhani A., Jalali A., Mosavi M.R. An indirect adaptive neural control of a visual-based quadrotor robot for pursuing a moving target//ISA Trans.-2015.-59.-P. 290-302.
8. Поклад Г.Г. Практикум по геодезии: Учебное пособие для вузов.- М.: Акад. Проект, 2011. – 470 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 31.08.2021.

Օ.Ն. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ա.Ա. ԱՍԱՏՐՅԱՆ

ԱՆՕՂԱՉՈՒԹՅՈՂ ՍԱՐՔԵՐՆԻՑ ՎԵՐԳԵՏՆՑԱ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ԿՈՌՐԴԻՆԱՏՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ GPS ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԲԱՑԱԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Բազմառոտորային անօդաչու թռչող սարքերը (ԱԹՍ) ներկայումս լայնորեն կիրառվում են ռազմական և քաղաքացիական տարբեր ոլորտներում: Առաջադրված հետազոտելու ԱԹՍ -ի թռիչքն իրականացվում է GPS ազդանշանների միջոցով, որոնք որոշում են սարքի կոորդինատները տասնյակ սանտիմետրից մինչև մի քանի մետր ճշգրտությամբ: Սակայն գործնականում կարող են լինել իրավիճակներ, երբ GPS ազդանշանները աղավաղված են կամ բացակայում են: Նման դեպքերում կարևոր է ինչպես ԱԹՍ -երի կոորդինատների, այնպես էլ ԱԹՍ -ից վերահսկվող վերգետնյա օբյեկտների կոորդինատների որոշումը:

Աշխատանքում առաջարկվում է ԱԹՍ-երի և վերգետնյա թիրախների գեոդեզիական կոորդինատների որոշման մոտեցում, երբ GPS ազդանշանները բացակայում են, սակայն հայտնի են երկու վերգետնյա, այսպես կոչված, «նեցուկային» օբյեկտների կոորդինատները: Որպես նեցուկային ընտրվում են այնպիսի օբյեկտներ, որոնք առանձնանում են տեղանքի ֆոնի վրա և կարող են հեշտությամբ նույնականացվել, օրինակ՝ առանձին շինություն, էլեկտրահաղորդագծերի հենարաններ, ռադիոռելեային կայմեր և այլն: Մշակվել է օգտագործողի գրաֆիկական ինտերֆեյսը MATLAB փաթեթի միջավայրում, որը թույլ է տալիս ավտոմատացնել ԱԹՍ-ի և թիրախի կոորդինատների հաշվարկման ընթացակարգը՝ GPS ազդանշանների բացակայության դեպքում:

Առանցքային բառեր. անօդաչու թռչող սարք, գեոդեզիական կոորդինատներ, կարդանային կախոց, լազերային հեռաչափ, GPS ազդանշաններ, գրաֆիկական ինտերֆեյս, ՀԻԴ կարգավորիչ:

O.N. GASPARYAN, A.A. ASATRYAN

A SYSTEM FOR DETERMINING THE COORDINATES OF GROUND-BASED OBJECTS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE ABSENCE OF GPS SIGNALS

Nowadays multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in various military and civil areas. The UAV's flight along the required trajectories is performed using the GPS signals which determine the vehicle's position with the accuracy from tens of centimeters to a few meters. However, in practice, some situations may occur when the GPS signals are absent or corrupted. In such cases, very important is the task of determining the coordinates of the UAV itself as well as the coordinates of the ground-based objects which are being tracked from the UAV.

In the paper, an approach to determining the geodetic coordinates of the UAV and ground-based objects is proposed in cases when the GPS signals are absent, but the coordinates of two ground-based, the so-called reference objects, are known. As reference objects, the ones that are distinguished within the local terrain and can be easily identified, for example, separate buildings, power transmission line supports, relay broadcasting pillars, etc should be selected. A Graphical User Interface is developed which works in the MATLAB environment and allows one to automatize the procedure of calculation of coordinates of the UAV and ground-based objects in the absence of GPS signals.

Keywords: unmanned aerial vehicle, geodetic coordinates, cardan gimbal, laser range-finder, GPS signals, graphical user interface, PID-regulator.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ Ա.Ս., ՎԱՍԻԼՅԱՆ Գ.Ա., ՍԱՖԱՐՅԱՆ Տ.Ն., ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ա.Ս., ԴԵՄԻՐՉՅԱՆ Տ.Ա.	
Al-Cu-Fe-Si ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ԴԵՖՈՐՄԱՅՎՈՂ ՀԱՄԱՁՈՒԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ՁՈՒԼՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	381
ԶԱՔԱՐՅԱՆ Է.Գ.	
ԹԵՂՈՒՏԻ ՄՈԼԻԲԴԵՆԻՏԱՅԻՆ ԽՏԱՆՅՈՒԹՅ ԲԱՐՁՐՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԻՆՔՆԱՏԱՐԱԾՎՈՂ ՄԻՆԹԵԶԻ ԵՂԱՆԱԿՈՎ ՖԵՐՈՍՈԼԻԲԴԵՆԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ	393
ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ Ա.Գ., ԿԱՆԵՅՅԱՆ Գ.Ռ., ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ Ա.Ա.	
ԱԷԿ-Ի ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ԽԱՓԱՆՄԱՆ ՀԱՎԱՆԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՆՎԱԶԵՅՈՒՄԸ ՌԻՍԿ-ՏԵՂԵԿԱՅՎԱԾ ՍՏՈՒԳՈՒՄՆԵՐԻ ԻՐԱԿԱՆԱՑՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ	406
ՄԱՆԱՍԵԼՅԱՆ Խ.Հ., ՂՈՒԼՅԱՆ Ա.Գ., ՍԱՐԳՍՅԱՆ Ս.Ա.	
ՌԵԳԵՆԵՐԱՅԻՈՆ ՋԵՐՄԱ-ԷԼԵԿՏՐԱՔԻՄԻԱԿԱՆ ԱՂԲՅՈՒՐ	415
ԴՈՆՈՅԱՆ Ա.Ա.	
ՀԱՄԱԿԱՐԳԱՅԻՆ ԴԻՆԱՄԻԿԱՅԻ ՄԵԹՈԴՈՎ ՀՀ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՏՆՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ ԵՎ 2050 ԹՎԱԿԱՆԻ ԿԱՆԽԱՏԵՍՈՒՄՆԵՐԸ	425
ԱՅՎԱԶՅԱՆ Գ.Ե.	
ՄԵՎ ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՇԵՐՏՈՎ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԱՐԱՏՆԵՐԻ ՀԵՏԵՐԱՅՄԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅՈՒՆԸ	434
ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Գ.Ա.	
ԿԱՊՈՒՂՈՒ ՋԵՎԱՎՈՐԻՉ	442
ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Ս.Ա.	
ՀԱՄԱՊԻՏԱՆԻ ՎԵՐԻՖԻԿԱՅԻԱՅԻ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅԱՄԲ ԹԵՍՏԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐ	450
ՄՈՄՋՅԱՆ Ա.Ս.	
ՍՏԱՏԻԿ ՕՊԵՐԱՏԻՎ ՀԻՇՈՂ ՍԱՐՔԻ ՀԱՄԱՐ ՆՈՐ ԸՆԹԵՐՅՈՂ ՈՒԺԵՂԱՐԱՐ՝ ՀՋՈՐՈՒԹՅԱՆ ՆՎԱԶԵՅՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ	457
ԿԱՊԼԱՆՅԱՆ Տ.Կ.	
ՆՈՐ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՀԱՄԱԺԱՄԱՆԱԿԱՅՈՒՅՉԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ ԱՌԱՋԱՐԿՎԱԾ ՀԱՄԱԺԱՄԱՆԿԵՅՄԱՆ ԲՋՋԻ ՄՈԴԵԼՈՎ	464

ԳՈՒՄՐՈՅԱՆ Հ.Վ.

ԿԱՅՈՒՆ ԼԱՐՄԱՄԲ ԿԱՌԱՎԱՐՎՈՂ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐ՝ ԿՈՂՄՈՐՈՇՎԱԾ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՆՎԱԶԵՅՄԱՆԸ	471
--	-----

ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ Ա.Գ., ՂԱԶԱՐՅԱՆ Դ.Ա., ԲԱԲԱՅԱՆ Ա.Ն.

ԳԾԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱԶԱՓԱՆԻՇԱՅԻՆ ԾՐԱԳՐԱՎՈՐՄԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ԼՈՒԾՈՒՄԸ՝ ԲԱԶՄԱԶԱՓ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ԶԵՎԱՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ	480
--	-----

ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ Օ.Ն., ԱՍՄԱՏՐՅԱՆ Ա.Ա.

ԱՆՕԴԱԶՈՒ ԹՈՉՈՂ ՍԱՐՔԵՐԻՑ ՎԵՐԳԵՏՆՅԱ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐԻ ԿՈՈՐԴԻՆԱՏՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ GPS ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԲԱՅԱԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ	489
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

АГБАЛЯН С.Г., ОГАНЕСЯН А.М., ВАСИЛЯН Г.А., САФАРЯН Т.Н., АГБАЛЯН А.С., ДЕМИРЧЯН Т.А. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Cu-Fe-Si	381
ЗАКАРЯН Э.Г. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРОМОЛИБДЕНА ИЗ ТЕХУТСКОГО МОЛИБДЕНИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА ПУТЕМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА	393
ХАЧАТРЯН А.Г., КАНЕЦЯН Г.Р., ГЕВОРГЯН А.А. СНИЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОТКАЗОВ СИСТЕМ АЭС ПУТЁМ ПРОВЕДЕНИЯ РИСК-ИНФОРМИРОВАННЫХ ИНСПЕКЦИЙ	406
МАНАСЕЛЯН Х.А., ГУЛЯН А.Г., САРГСЯН С.А. РЕГЕНЕРАЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК	415
ДРНОЯН А.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИКИ РА МЕТОДОМ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ И ПРОГНОЗЫ НА 2050 ГОД	425
АЙВАЗЯН Г.Е. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕТТЕРИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ СЛОЕМ ЧЕРНОГО КРЕМНИЯ	434
ВАРДАНИЯН Г.А. ФОРМИРОВАТЕЛЬ КАНАЛОВ	442
АРУТЮНЯН С.А. ГЕНЕРАТОР ТЕСТИРУЕМОЙ СРЕДЫ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПРОВЕРКИ	450
МОМДЖЯН А.М. НОВЫЙ СЧИТЫВАЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА УМЕНЬШЕНИЯ РАССЕЙВАЕМОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ ОПЕРАТИВНЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ	457
КАПЛАНИЯН Т.К. РАЗРАБОТКА НОВОГО ИМПУЛЬСНОГО СИНХРОНАЙЗЕРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СИНХРОНИЗИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА	464
ГУМРОЯН Р.В. ГЕНЕРАТОР ЧАСТОТ, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ, НАЦЕЛЕННЫЙ НА СНИЖЕНИЕ РАБОЧИХ СБОЕВ И УСТОЙЧИВЫЙ К ВАРИАЦИЯМ ПРОЦЕССА НАПРЯЖЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ	471
АВETИСЯН А.Г., КАЗАРЯН Д.А., БАБАЯН А.Н. РЕШЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОМЕРНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ	480
ГАСПАРЯН О.Н., АСАТРЯН А.А. СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОТСУТСТВИИ СИГНАЛОВ GPS	489

CONTENTS

AGHBALYAN S.G., HOVHANNISYAN A.M., VASILYAN G.A., SAFARYAN T.N., AGHBALYAN A.S., DEMIRCHYAN T.A.	
THE CASTING TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF ALUMINUM DEFORMABLE ALLOYS OF THE AL-Cu-Fe-Si SYSTEM	381
ZAKARYAN E.G.	
DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING FERROMOLIBDENUM FROM MOLYBDENUM CONCENTRATE OF TEGHUT BY THE METHOD OF HIGH- TEMPERATURE SELF-PROPAGATING SYNTHESIS	393
KHACHATRYAN A.G., KANETSYAN G.R., GEVORGYAN A.A.	
REDUCING THE PROBABILITY OF NPP SYSTEMS' FAILURES THROUGH RISK- INFORMED INSPECTIONS	406
MANASELYAN K.H., GHOULYAN A.G., SARGSYAN S.A.	
A REGENERATIVE ELECTROCHEMICAL SOURCE	415
DRNOYAN A.A.	
MODELING OF RA ENERGY ECONOMY BY THE METHOD OF SYSTEM DYNAMICS AND FORECASTS FOR 2050	425
AYVAZYAN G.Ye.	
EFFICIENCY OF GETTERING STRUCTURAL DEFECTS BY A BLACK SILICON LAYER	434
VARDANYAN G.A.	
A CHANNELIZER	442
HARUTYUNYAN S.A.	
A UNIVERSAL VERIFICATION METHODOLOGY TEST ENVIRONMENT GENERATOR	450
MOMJYAN A.M.	
DEVELOPING A NEW SENSE AMPLIFIER BY APPLYING THE METHOD OF THE DISSIPATION POWER REDUCTION FOR SRAM	457
KAPLANYAN T.K.	
A NOVEL PULSE SYNCHRONIZER DESIGN WITH THE PROPOSED SYNC CELL MODEL	464
GUMROYAN H.V.	
A VOLTAGE-CONTROLLED OSCILLATOR AIMED AT REDUCING OPERATIONAL FAILURES AND RESISTANT TO VARIATIONS OF THE PROCESS, VOLTAGE AND TEMPERATURE	471
AVETISYAN A.G., GHAZARYAN D.A., BABAYAN A.N.	
SOLVING LINEAR MULTI-OBJECTIVE PROGRAMMING PROBLEMS BY USING MULTIDIMENSIONAL DIFFERENTIAL TRANSFORMS	480
GASPARYAN O.N., ASATRYAN A.A.	
A SYSTEM FOR DETERMINING THE COORDINATES OF GROUND-BASED OBJECTS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE ABSENCE OF GPS SIGNALS	489

ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

- 1 Աղբալյան Ալլա Սուրենի կրտսեր գիտաշխատող, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - aghbalyan@gmail.com
- 2 Աղբալյան Սուրեն Գևորգի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - metalsur@polytechnic.am
- 3 Այվազյան Գագիկ Երջանիկի տ.գ.թ., դոց., Կապի համակարգերի ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - agagarm@gmail.com
- 4 Ասատրյան Արմեն Ավետիքի Կառավարան համակարգերի ամբիոնի հայցորդ,
ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - Avetik2612199@gmail.com
- 5 Ավետիսյան Արմինե Գևորգի տ.գ.դ., պրոֆ., ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - arm.avetisyan@seua.am
- 6 Բաբայան Արթուր Նորայրի ՀԱՊՀ ասպիրանտ, կրտսեր գիտաշխատող, ,
Էլ. հասցե - a.babayan@polytechnic.am
- 7 Գասպարյան Օլեգ Նիկոլայի տ.գ.դ., Կառավարման համակարգերի ամբիոնի
պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - ogasparyan@gmail.com
- 8 Գումրոյան Հրաչյա Վաղիմի ՀԱՊՀ ասպիրանտ,
Էլ. հասցե - gumroyan96@gmail.com@gmail.com
- 9 Գևորգյան Արամ Աշիկի տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - a.gevorgyan@polytechnic.am
- 10 Դեմիրչյան Տիգրան Արտակի ՀԱՊՀ ասպիրանտ, Մետալուրգիայի և
նյութագիտության ամբիոն,
Էլ. հասցե - tigrand1997@gmail.com
- 11 Դոնոյան Ալեքսանդր Արտաշեսի ՀԱՊՀ ասպիրանտ,
Էլ. հասցե - a.drnoyan@polytechnic.am
- 12 Զաքարյան Էդգար Գագիկի ՀԱՊՀ հայցորդ, Մետալուրգիայի և
նյութագիտության ամբիոն,
Էլ. հասցե - edgarzakaryan@heznez.com
- 13 Խաչատրյան Արամ Գևորգի ՀԱՊՀ ասպիրանտ, «Միջուկային և ռադիացիոն
անվտանգության գիտատեխնիկական կենտրոն»
ՓԲԸ– Ռիսկերի գնահատման գծով որակավորում
անցնող մասնագետ
Էլ. հասցե - ar.khachatryan@nrsc.am
- 14 Կանեցյան Գուրգեն Ռուբենի «Միջուկային և ռադիացիոն անվտանգության
գիտատեխնիկական կենտրոն» ՓԲԸ – Ռիսկերի
գնահատման գծով զլխավոր մասնագետ, մ.գ.թ.,
Էլ. հասցե - g.kanetsyan@nrsc.am

- 15 Կապլանյան Տարոն Կարոյի
Էլ. հասցե - taronkk@gmail.com
- 16 Հարությունյան Ստեփան
Արթուրի
Էլ. հասցե - stepanhn@gmail.com
- 17 Հովհաննիսյան Արմեն
Մարտիկի
տ.գ.դ., պրոֆեսոր, Մետալուրգիայի և նյութագի-
տության ամբիոնի վարիչ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե - armhovh@gmail.com
- 18 Ղազարյան Դավիթ Աշոտի
տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե -dghazaryan84@gmail.com
- 19 Ղուլյան Ալբերտ Գարեգինի
ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի
ինստիտուտ, լաբորատորիայի վարիչ, ֆ.-մ.գ. դ.,
պրոֆեսոր, ՀՀ ԳԱԱ ակադեմիկոս,
Էլ. հասցե - goulyan2013@yandex.com
- 20 Մանասեյան Խաչիկ Հայկազի
ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի
ինստիտուտ, գիտաշխատող
Էլ. հասցե - kmanaselyan@gmail.com
- 21 Մոմջյան Արսեն Մելքոնի
ՀԱՊՀ ասպիրանտ,
Էլ. հասցե -momjyanarsen@gmail.com
- 22 Սարգսյան Սուրեն Ամիրբարի
ՀՀ ԳԱԱ Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի
ինստիտուտ, առաջատար ինժեներ
Էլ. հասցե - surensargsyana@gmail.com
- 23 Սաֆարյան Տաթևիկ Նիկոլայի
տ.գ.թ., գիտաշխատող, ՀՀ ԳԱԱ Ընդհանուր և
անօրգանական քիմիայի ինստիտուտ,
Էլ. հասցե - for.tatevik@gmail.com
- 24 Վասիլյան Գայանե Արտաշի
տ.գ.թ., դոցենտ, Մետալուրգիայի և
նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ,
Էլ. հասցե -gayavasi@gmail.com
- 25 Վարդանյան Գրետա Ալեքսեյի
Կապի համակարգեր ամբիոն, ՀԱՊՀ, «Օլիմպ
էնջիներինգ» կազմակերպություն,
համակարգերի գլխավոր ճարտարագետ,
Էլ. հասցե - greta.vardanyan@gmail.com

СПИСОК АВТОРОВ

- 1 Аветисян Армине Геворговна д.т.н., проф., НПУА,
Эл. почта - arm.avetisyan@seua.am
- 2 Агбалиян Алла Суреновна младший научный сотрудник, НПУА,
Эл. почта - aghbalyan@gmail.com
- 3 Агбалиян Сурен Геворкович д.т.н., профессор, НПУА,
Эл. почта - metalsur@polytechnic.am
- 4 Айвазян Гагик Ерджаникович к.т.н., доцент, кафедра Систем связи, НПУА,
Эл. почта - agagarm@gmail.com
- 5 Арутюнян Степан Артурович аспирант, НПУА,
Эл. почта - stepanhn@gmail.com
- 6 Асатрян Армен Аветикович соискатель кафедры Систем управления, НПУА,
Эл. почта - Avetik2612199@gmail.com
- 7 Бабаян Артур Норайрович аспирант, м.н.с., НПУА,
Эл. почта - a.babayan@polytechnic.am
- 8 Варданын Грета Алексеевна Соискатель, кафедра Систем связи, НПУА; главный инженер компании ООО “Олимп инжиниринг”,
Эл. почта- greta.vardanyan@gmail.com
- 9 Василян Гаяне Арташевна к.т.н., доцент, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - gayavasi@gmail.com
- 10 Гаспарян Олег Николаевич д.т.н., профессор, кафедра Систем управления, НПУА,
Эл. почта - ogasparyan@gmail.com
- 11 Геворгян Арам Ашикович к.т.н., доцент, НПУА,
Эл. почта - a.gevorgyan@polytechnic.am
- 12 Гулян Альберт Гарегинович д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. ИРФЭ НАН РА, академик НАН РА,
Эл. почта - goulyan2013@yandex.com
- 13 Гумроян Рачья Вадимович аспирант, НПУА,
Эл. почта - gumroyan96@gmail.com@gmail.com
- 14 Демирчян Тигран Артакович аспирант, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - tigrand1997@gmail.com
- 15 Дрноюн Александр Арташесович аспирант, НПУА,
Эл. почта - a.drnoyan@polytechnic.am
- 16 Закарян Эдгар Гагикович соискатель, кафедра Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - edgarzakaryan@hezne.com
- 17 Казарян Давит Ашотович к.т.н., доцент, НПУА,
Эл. почта - dghazaryan84@gmail.com
- 18 Канецян Гурген Рубенович к.п.н., главный специалист по оценке рисков, ЗАО “Научно-технический центр ядерной и радиационной безопасности”,
Эл. почта - g.kanetsyan@nrsc.am

- 19 Каплян Тарон Кароевич аспирант, НПУА,
Эл. почта - taronkk@gmail.com
- 20 Манаселян Хачик Айказович научный сотрудник, ИРФЭ НАН РА,
Эл. почта - kmanaselyan@gmail.com
- 21 Момджян Арсен Мелконович аспирант, НПУА,
Эл. почта - momjyanarsen@gmail.com
- 22 Оганесян Армен Мартикович д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
Металлургии и материаловедения, НПУА,
Эл. почта - armhovh@gmail.com
- 23 Саргсян Сурен Амирбарович ведущий инженер, ИРФЭ НАН РА,
Эл. почта - surensargsyana@gmail.com
- 24 Сафарян Татевик Николаевна к.т.н., н.с., Институт общей и неорганической
химии НАН РА,
Эл. почта - for.tatevik@gmail.com
- 25 Хачатрян Арам Геворгович аспирант, НПУА; специалист по оценке рисков,
ЗАО “Научно-технический центр ядерной и
радиационной безопасности”,
Эл. почта - ar.khachatryan@nrsc.am

LIST OF THE AUTHORS

- | | | |
|----|---------------------------|---|
| 1 | Aghbalyan Alla Suren | Junior Scientific Worker, NPUA,
E-mail - aghbalyan@gmail.com |
| 2 | Aghbalyan Suren Geworg | Dr. of tech. sci., Prof., NPUA,
E-mail - metalsur@polytechnic.am |
| 3 | Asatryan Armen Avetik | Probationer, Chair of “Control Systems”, NPUA
E-mail - Avetik2612199@gmail.com |
| 4 | Avetisyan Armine Gevorg | Doctor of tech. sci., NPUA
E-mail - arm.avetisyan@seua.am |
| 5 | Ayvazyan Gagik Yerdjanik | Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., NPUA,
E-mail - agagarm@gmail.com |
| 6 | Babayan Artur Norayr | Post-graduate student, researcher, NPUA,
E-mail - a.babayan@polytechnic.am |
| 7 | Demirchyan Tigran Artak | Post-graduate student of the Chair “Metallurgy and
Material Science”, NPUA,
E-mail - tigrand1997@gmail.com |
| 8 | Drnoyan Aleksandr | Post-graduate student at NPUA
E-mail - a.drnoyan@polytechnic.am |
| 9 | Gasparyan Oleg Nikolay | Dr. of tech. sci., Prof. of Chair “Control Systems”, NPUA
E-mail - ogasparyan@gmail.com |
| 10 | Gevorgyan Aram | Cand. of tech. sci. assoc. Prof. NPUA,
E-mail - a.gevorgyan@polytechnic.am |
| 11 | Ghazaryan Davit Ashot | Cand. of tech. sci., Assoc. prof.,
E-mail - dghazaryan84@gmail.com |
| 12 | Ghoulyan Albert Garegin | IRPhE NAS RA, Head of Lab., Dr. Prof. of Phys. math
sci., Academician of NAS RA,
E-mail - goulyan2013@yandex.com |
| 13 | Gumroyan Hrachya Vadimir | Graduate student, NPUA
E-mail - gumroyan96@gmail.com@gmail.com |
| 14 | Harutyunyan Stepan Arthur | E-mail - stepanhn@gmail.com |
| 15 | Hovhannisyan Armen Martik | Dr. of tech. sci., Prof., Head of the Chair “Metallurgy and
Material Science”, NPUA,
E-mail - armhovh@gmail.com |
| 16 | Kanetsyan Gurgun | Leading specialist on risk assessment, Cand. of Ped. sci.
“Nuclear and radiation safety center” CJSC –
E-mail - g.kanetsyan@nrsc.am |
| 17 | Kaplanyan Taron Karo | Graduate student, NPUA
E-mail - taronkk@gmail.com |
| 18 | Khachatryan Aram | Post-graduate student “Nuclear and radiation safety
center” CJSC – trainee on risk assessment, NPUA,
E-mail - ar.khachatryan@nrsc.am |
| 19 | Manaselyan Khachik Haykaz | IRPhE NAS RA, Topic Leader, Researcher
E-mail - kmanaselyan@gmail.com |
| 20 | Momjyan Arsen Melkon | Graduate student, NPUA
E-mail - momjyanarsen@gmail.com |

- | | | |
|----|--------------------------|---|
| 21 | Safaryan Tatevik Nikolay | Cand. of tech. sci., NAS RA, Institute of General and Inorganic Chemistry, research scientist,
E-mail - for.tatevik@gmail.com |
| 22 | Sargsyan Suren Amirbar | IRPhE NAS RA, Leading Engineer
E-mail - surensargsyana@gmail.com |
| 23 | Vardanyan Greta Aleksey | Senior system Engineer Communication systems, NPUA OLYMP Engineering LLC
E-mail - greta.vardanyan@gmail.com |
| 24 | Vasilyan Gayane Artash | Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA,
E-mail - gayavasi@gmail.com |
| 25 | Zakaryan Edgar Gagik | Probationer, NPUA, applicant of GCH and ChT department of „Metallurgy and Materials science“
E-mail - edgarzakaryan@heznezh.com |

«Հայաստանի գիտությունների ազգային ակադեմիայի և Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանի տեղեկագիր. տեխնիկական գիտությունների սերիա» հանդեսում տպագրվում են տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները տեխնիկական գիտությունների հետևյալ բաժիններից՝ մեքենաշինություն, մետալուրգիա, նյութագիտություն, ընդերքօգտագործման տեխնոլոգիաներ, շինարարական կառուցվածքներ, հիդրավլիկա և հիդրոտեխնիկական կառույցներ, էներգետիկա, էլեկտրատեխնիկա, գիտական սարքաշինություն և չափողական տեխնիկա, հաշվողական տեխնիկա և ինֆորմատիկա, ռադիոէլեկտրոնիկա, միկրոէլեկտրոնիկա, լազերային տեխնիկա, ավտոմատացում և կառավարման համակարգեր:

Հանդեսում լուսաբանվում են ակադեմիական և ճյուղային գիտահետազոտական ինստիտուտների, բուհերի, գիտաարտադրական միավորումների և այլ կազմակերպությունների գիտական գործունեության առավել կարևոր արդյունքները:

Հանդեսի հիմնական նպատակն է խթանել գիտատեխնիկական առաջընթացը և նպաստել արտադրության մեջ այդ արդյունքների ներդրմանը:

Հանդեսը նախատեսված է ճարտարագետների, հետազոտողների և գիտնականների լայն շրջանների համար: Լույս է տեսնում երեք ամիսը մեկ անգամ:

В журнале "Известия Национальной академии наук РА и Национального политехнического университета Армении. Серия технических наук" публикуются результаты теоретических и экспериментальных исследований, охватывающих основные разделы технических наук: машиностроение, металлургия, материаловедение, технологии недропользования, строительные конструкции, гидравлика и гидротехнические сооружения, энергетика, электротехника, научное приборостроение и измерительная техника, вычислительная техника и информатика, радиоэлектроника, микроэлектроника, лазерная техника, автоматизация и системы управления.

Журнал является периодическим изданием, освещающим наиболее важные результаты научной деятельности академических и отраслевых научно-исследовательских институтов, вузов, научно-производственных объединений и др.

Основная цель журнала - пропагандировать фундаментальные и прикладные исследования в области технических наук, способствовать внедрению их результатов и ускорению научно-технического прогресса в производстве.

Журнал рассчитан на широкий круг ученых, исследователей и инженеров. Выходит один раз в три месяца.

The journal "Proceedings of the Republic of Armenia National Academy of Sciences and National Polytechnic University of Armenia. Series of Technical Sciences" publishes the results of theoretical and experimental investigations concerning the main branches of technical sciences: mechanical engineering, metallurgy, material science, mining engineering, natura utilization, building constructions, hydraulics and hydrotechnical constructions, power and electrical engineering, scientific instrument making and measuring devices, computer science and informatics, radioelectronics, microelectronics, laser eequipment, automation and control systems.

The journal is a periodical edition that presents the most important results of scientific activities at academic and branch scientific-research institutions, universities, research - industrial companies, etc.

The main task of the journal is the propaganda of fundamental and applied investigations in the field of technical sciences, and the promotion of their introduction and the acceleration of scientific and technological progress in industry.

The journal is intended for a wide range of scientists, researchers and engineers. It is published once in three months.

ՀՈՂՎԱԾՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՆՈՆՆԵՐԸ

Նյութը խմբագրություն ներկայացվում է ըստ հետևյալ պահանջների.

1. Երկու օրինակ, նաև էլեկտրոնային տարբերակով, համակարգչային շարվածքը՝ Microsoft Office Word: Հոդվածի ծավալը կարող է լինել մինչև 10 էջ, հաղորդումներինը՝ մինչև 4 էջ: Տեքստը շարադրվում է A4 չափսի թղթի վրա, աշխատանքային դաշտը՝ Top-5սմ, Bottom-5,1սմ, Left-5,75սմ, Right-1,75սմ, Footer-4,6սմ, միջտողային տարածությունը (Line spacing)՝ 1,1, պարբերությունը (First line)՝ 0,75 սմ: Հայերեն լինելու դեպքում նյութը շարադրվում է Sylfaen տառատեսակով, տառաչափը՝ 10, իսկ ռուսերեն կամ անգլերեն լինելու դեպքում՝ Times New Roman տառատեսակով, տառաչափը՝ 11:

2. Թղթի վերևի ձախ անկյունում գրվում է համապիտանի տասնորդական դարականիշը՝ տեքստին համապատասխան լեզվով (ՀՏԴ, ՄԴԿ, UDC), հաջորդ տողի կենտրոնում՝ գլխատառերով հեղինակ(ներ)ի անվան-հայրանվան սկզբնատառերը և ազգանուն(ներ)ը՝ bold, 10 տառաչափով հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում: Հոդվածի վերնագիրը տրվում է հեղինակի ազգանվանը հաջորդող տողի կենտրոնում՝ bold, ամբողջությամբ գլխատառերով՝ 10 տառաչափով՝ հայերեն, անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

3. Նյութը սկսվում է ամփոփումով (անտասցիա) այն լեզվով, որով ներկայացված է: Ամփոփումն ավարտվում է առանցքային բառերով՝ տառաչափը՝ 9 հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, և միայն «Առանցքային բառեր» արտահայտությունը՝ bold, italic: Ամփոփումը պետք է լինի 500 նիշից ոչ ավելի՝ ներառյալ միջակայքերը, առանցքային բառերը կամ բառակապակցությունները՝ 4-8 բառ:

4. Երաշխավորվում է նյութի շարադրման հետևյալ կարգը. «Ներածություն», որը պետք է համառոտ ներառի հարցի վիճակը, թեմայի արդիականությունը և հետազոտության նպատակը, «Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը», «Հետազոտության արդյունքները», «Եզրակացություն», անհրաժեշտության դեպքում՝ նաև այլ բաժիններ՝ համապատասխան վերնագրերով:

5. Տեքստում հղումները գրականությանը նշվում են ուղղանկյուն փակագծերով: Բանաձևերը ներկայացվում են նոր տողից, Equation Editor ծրագրով, italic, տառաչափը՝ 11, անհրաժեշտության դեպքում համարակալվում են տողի վերջում՝ սովորական (կոր) փակագծի մեջ:

6. Նկարներն ու աղյուսակները հաջորդում են տեքստում համապատասխան հղումներին: «Նկ. » և «Աղյուսակ» բառերը, նկարների մակագրությունը և աղյուսակների անվանումները գրվում են Italic 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

7. Տեքստին հաջորդում է գրականության ցանկը՝ 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, միայն հեղինակի ազգանունն ու անվան-հայրանվան սկզբնատառերը՝ bold, «Գրականության ցանկ» արտահայտությունը՝ տողի կենտրոնում, գլխատառերով: Ցանկում գրականության յուրաքանչյուր աղբյուր համարակալվում է ըստ տեքստում իր հղման հերթականության: Գրականության աղբյուրները պարբերական հրատարակությունների դեպքում ներկայացվում են հետևյալ կարգով. հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հանդեսի անվանումը կամ ընդունված հապավումը, հրատարակման տարեթիվը, հատորի ու թողարկման համարները, հերթական համարը, նյութի գետեղման էջերը, գրքերի դեպքում՝ հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հրատարակման վայրը, հրատարակչությունը, թվականը, էջերի քանակը:

8. Գրականության ցանկին հաջորդում են ամփոփումները մյուս երկու լեզուներով (եթե տեքստը հայերեն է, ամփոփումները նախ՝ ռուսերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե ռուսերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե անգլերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ ռուսերեն): Ամփոփումները բոլոր երեք լեզուներով իրենց բովանդակությամբ և առանցքային բառերով պետք է լինեն նույնական:

9. Տեքստը ստորագրվում է հեղինակ(ներ)ի կողմից, նշվում է նյութը խմբագրություն հանձնելու ամսաթիվը: Տեքստի խմբագրված և սրբագրված տարբերակը համաձայնեցվում է հեղինակ(ներ)ի հետ:

10. Հեղինակ(ներ)ն առանձին էջով ներկայացնում է (են) ազգանուն, անուն, հայրանունը (լրիվ), աշխատավայրի, սովորելու վայրի լրիվ անվանումը, զբաղեցրած պաշտոնը, գիտական աստիճանը, հեռախոսահամարները (աշխատանքային, տան և բջջային):

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Материал представляется в редакцию в соответствии со следующими правилами:

1. Статья в двух экземплярах и файл статьи в формате Microsoft Office Word. Объем статьи не должен превышать 10 страниц, объем сообщений – до 4-х страниц. Формат страницы – А4. Рабочее поле: Top – 5cm, Bottom – 5,1cm, Left – 5,75cm, Right – 1,75cm, Footer – 4,6cm, межстрочный интервал (Line spacing) – 1,1, красная строка (First line) – 0,75cm. Для статьи, написанной на армянском языке, применяется шрифт Sylfaen (размер шрифта - 10), а на русском и английском – Times New Roman (размер шрифта – 11).

2. В левом верхнем углу первого листа указывается универсальный десятичный классификатор (ՀՏԴ, УДК, UDC); строкой ниже - инициалы (И.О.) и фамилия - заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз., выравнивание по центру; строкой ниже по центру указывается название статьи – заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм., рус. и англ. яз.

3. Материал текста начинается с аннотации и представляется на том языке, на котором написана статья. Текст аннотации должен состоять не более чем из 500 знаков, включая пробелы. После аннотации пишутся ключевые слова – от 4-х до 8-и слов или словосочетаний. Размер текста аннотации и ключевых слов 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз., словосочетание **“Ключевые слова”** - Bold, italic.

4. Рекомендуется следующий порядок изложения материала статьи: введение, в котором должны быть кратко представлены состояние вопроса, актуальность темы и цель исследования; постановка задачи и обоснование методики; результаты исследования; заключение (эти, а при необходимости, и другие разделы должны иметь соответствующие заголовки).

5. Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках. Формулы и математические выражения набираются редактором Microsoft Equation, italic, размер – 11. Формулы набираются с новой строки, выравнивание по центру. При необходимости, их нумеруют. Номер формулы располагается в конце строки, в круглых скобках.

6. Рисунки и таблицы располагаются в тексте по ходу ссылки на них. Слова *“Рис.”*, *“Таблица”*, а также названия рисунков и таблиц пишутся italic, размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз.

7. В конце статьи дается список литературы: размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз. Словосочетание **“СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ”** располагается в центре строки заглавными буквами, Bold. Цитированная литература нумеруется в порядке ссылки на нее в тексте. Каждый источник представляется в следующем порядке: в случае ссылки на статью из журнала: **фамилия, инициалы И.О.** - Bold, название статьи, название журнала, место издания, год издания, том и номер издания, с какой по какую страницы занимает статья в этом журнале; в случае ссылки на книгу: **фамилия, инициалы И.О.**, название книги, место издания, название издательства, год издания, общее количество страниц.

8. После литературы представляются аннотации вместе с ключевыми словами на двух других языках. Если статья написана на армянском языке, то сначала дается аннотация на русском языке, затем на английском; если написана на русском языке – соответственно на армянском и английском, а если на английском – соответственно на армянском и русском языках. Содержание аннотаций и ключевые слова должны быть на трех языках одинаковыми.

9. Статья подписывается автором (авторами). В конце статьи ставится дата (число, месяц, год) представления статьи. Отредактированный и откорректированный вариант рукописи согласовывается с автором (авторами).

10. На отдельной странице необходимо представить следующие авторские данные: фамилия, имя, отчество; полное наименование места работы, места учебы; занимаемая должность, ученая степень и звание; номера телефонов (служебный, домашний, мобильный).

RULES FOR PREPARATION OF MANUSCRIPTS

The material should be presented to the editorial staff in accordance with the requirements given below.

1. The authors are requested to submit two hard copies, and also the electronic version of the manuscript by Microsoft Office Word. The volume of scientific paper is limited to 10 pages, and to 4 pages for short communications. The text should be printed on A4 sized paper. The text margins should be: Top – 5cm, Bottom – 5.1 cm, Left – 5.75 cm, Right – 1.75 cm, Footer – 4.6 cm, Line-spacing – 1.1 cm, the first line – 0.75 cm. Texts in Armenian should be printed by the Sylfaen, font size 10, and the texts in by Times New Roman, in font size 10 .

2. On the top left corner, the Universal Decimal Classifier is placed in the language of the manuscript (ՀՏԴ, 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

2021

4

ՀԱՏՈՐ

ТОМ 74
VOLUME

ՀՈԿՏԵՄԲԵՐ - ԴԵԿՏԵՄԲԵՐ

ОКТЯБРЬ - ДЕКАБРЬ
OCTOBER - DECEMBER

Հրատ. Խմբագիր՝

ԺԱՆՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Խմբագիրներ՝

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 01.12.2021

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

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 8.25 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 450: Տպաքանակ՝ 200

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

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

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