

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ
ԵՎ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ

ՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՍԵՐԻԱ

Հատոր 77

N 3 2024

ՀՈՒԼԻՍ - ՍԵՊՏԵՄԲԵՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2025

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ И
НАЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
АРМЕНИИ

СЕРИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Том 77

N 3 2024

ИЮЛЬ - СЕНТЯБРЬ

ЕРЕВАН 2025

PROCEEDINGS

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

SERIES OF TECHNICAL SCIENCES

Volume 77

N 3 2024

JULY - SEPTEMBER

YEREVAN 2025

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՝ Խաչատրյան Ա.Ժ., ֆմ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Պատասխանատու քարտուղար՝ Սեյրանյան Ժ.Ս., ՀՀ

Խմբագրական կոլեգիա՝

Աղբալյան Ս.Գ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Ասլանյան Լ.Հ., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Բաղդասարյան Հ.Վ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Բաղդասարյան Ս.Զ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Գռնեյմա Մ., տ.գ.թ., Եգիպտոս

Գրիմբլաթ Վ., տ.գ.թ., Չիլի

Դոկիչ Բ., տ.գ.դ., Բոսնիա և Հերցեգովինա

Ջորյան Ե., տ.գ.թ., ԱՄՆ

Դյուշենկո Ա.Ֆ., Բելառուսի ԳԱԱ թղթ. անդամ, տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս

Լան Չ., տ.գ.թ., Չինաստան

Կրասնիկով Գ.Յ., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

Կուրտուա Բ., տ.գ.թ., Ֆրանսիա

Հախումյան Ա.Ա., ՀՀ ԳԱԱ թղթ. անդամ, ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Հակոբյան Վ.Ն., ֆ.-մ.գ.դ., ՀՀ

Հահանով Վ.Ի., Կիրառական ռադիոէլեկտրոնիկայի Ուկրաինայի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ.,

Ուկրաինա

Մանդալիկա Մ., տ.գ.թ., Հնդկաստան

Մարուխյան Ո.Զ., տ.գ.թ., պրոֆ., ՀՀ

Միխայլիչ Ա.Ա., տ.գ.դ., պրոֆ., Բելառուս

Շիխտման Ու., տ.գ.թ., Գերմանիա

Չանգ Ֆ., Թայվանի ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., Թայվան

Չապլիզին Յու.Ա., ՌԴ ԳԱԱ ակադեմիկոս, տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

Պետրոսյան Օ.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Պետրոսյանց Կ.Օ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՌԴ

Սապատենկար Մ., տ.գ.թ., ԱՄՆ

Սիմոնյան Ս.Հ., տ.գ.դ., պրոֆ., ՀՀ

Ստեփանովսկի 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 Մ., 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 Хачатрян А.Ж., д.ф.-м.н., проф., Армения

Ответственный секретарь Сейранян Ж.С., Армения

Редколлегия:

Агбалян С.Г., д.т.н., проф., Армения

Акопян В.Н., д.ф.-м.н., Армения

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

Воробьев А.Е., д.т.н., проф., Россия

Гонейма М., к.т.н., Египет

Гримблат В., к.т.н., Чили

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

Зорян Е., к.т.н., США

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

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

Куртуа Б., к.т.н., Франция

Лан Ч., к.т.н., Китай

Мандалика С., к.т.н., Индия

Марухян В.З., к.т.н., проф., Армения

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

Петросян О.А., д.т.н., проф., Армения

Петросянц К.О., д.т.н., проф., Россия

Сапатнекар С., к.т.н., США

Симонян С.О., д.т.н., проф., Армения

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

Тихомиров Г.В., д.ф.-м.н., Россия

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

Усанов В.И., д.т.н., проф., Россия

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

Цанова С., к.т.н., Болгария

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

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

Шлихтманн У., к.т.н., Германия

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: Melikyan V.Sh., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Deputy Editor-in-Chief: Khachatryan A.Zh., Dr. of Phys-math Sci., Prof., Armenia

Executive Secretary: Seyranyan Zh.S., Armenia

Editorial Board:

Aghbalyan S.G., Sci.Dr., Prof., Armenia

Aslanyan L.H., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Baghdasaryan H.V., Sci.Dr., Prof., Armenia

Baghdasaryan M.Q., Sci.Dr., Prof., Armenia

Chang F., Member of National Academy of Taiwan, Sci.Dr., Taiwan

Chaplygin Yu.A., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Courtois B., Ph.D., France

Dokic B., Sci.Dr., Bosnia and Herzegovina

Ghoneima M., Ph.Dr., Egypt

Grimblatt V., Ph.Dr., Chile

Hahanov V.I., Academician of Academy of Sciences of Ukraine in Applied Radioelectronics, Sci.Dr., Prof., Ukraine

Hakhumyan A.A., Corr.member of NAS RA, Sci.Dr., Prof., Armenia

Hakobyan V.N., Sci.Dr., Armenia

Ilyushenko A.F., Corr.member of NAS of Belarus, Sci.Dr., Prof., Belarus

Krasnikov G.Y., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Lan Ch., Ph.Dr., China

Mandalika S., Ph.Dr., India

Marukhyan V.Z., Ph.Dr., Prof., Armenia

Mikhaylevich A.A., Sci.Dr., Prof., Belarus

Petrosyan O.H., Sci.Dr., Prof., Armenia

Petrosyants K.O., Sci.Dr., Prof., Russia

Sapatnekar S., Ph.Dr., USA

Schlichtmann U., Ph.Dr., Germany

Simonyan S.H., Sci.Dr., Prof., Armenia

Stempkovski A.L., Academician of RAS, Sci.Dr., Prof., Russia

Tikhomirov G.V., Sci.Dr., Russia

Tsanova S., Sci.Dr., Bulgaria

Ubar R., Academician of Academy of Sciences of Estonia, Sci.Dr., Prof., Estonia

Usanov V.I., Sci.Dr., Prof., Russia

Vorobyov A.Y., Sci.Dr., Prof., Russia

Zorian Y., Ph.Dr., USA

Հրատ. խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

Ժ.Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

© Издательство НПУА

Известия НАН РА и НПУА (сер. Техн. наук), 2024

Ս.Գ. ԱՂԲԱԼՅԱՆ, Գ.Ա. ՎԱՍԻԼՅԱՆ, Վ.Ա. ՄԻՄՈՆՅԱՆ, Ա.Ս. ԱՂԲԱԼՅԱՆ

ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ
ՍՏԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Մշակվել է Al-Cu-Cr-MoS_2 բաղադրությամբ հալաշփական փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիա, որը հիմնված է ծակոտկեն մամլվածքների տաք մշակմամբ խտացման մեթոդների վրա: Այն ընդգրկում է մետաղափոշիներից բովախառնուրդի պատրաստում, ծակոտկեն մամլվածքների մամլում, եռակալում, պաշտպանիչ քսանյութերով ծածկութապատում, տաք արտամղում կամ տաք դրոշմում և ամրացնող ջերմային մշակում: Մշակվել են նաև պաշտպանիչ քսուքային ծածկույթների նոր կոմպոզիցիաներ՝ հիմնված բնական սիլիկատային ապարների վրա: Որպես ելակետային նյութեր վերցրվել են հրաբխային խարամի և բազալտի փոշիներ՝ մինչև 63 մկմ մասնիկների չափով: Խառնուրդի բաղադրության մեջ մտցվել են մակերևութաակտիվ նյութեր, որոնք հնարավորություն են տալիս վերահսկել խառնուրդի հալման ջերմաստիճանը լայն տիրույթում (873...1473 Կ): Բացի այդ, մակերևութաակտիվ նյութերն ապահովում են տաք արտամղումից հետո ջրային միջավայրում ծածկույթի հեշտ հեռացումը:

Առանցքային բառեր. ալյումին, հալաշփական կոմպոզիտային նյութեր, բովախառնուրդ, մամլում, եռակալում, տաք արտամղում, միսում, ծերացում:

Ներածություն: Ժամանակակից տեխնիկայում ալյումինի հիմքով փոշեկոմպոզիտային նյութերի և դրանցից փոշեարտադրատեսակների ստացումը փոշեմետալուրգիայի ամենադինամիկ զարգացող ճյուղերից մեկն է: Դա բացատրվում է ոչ միայն ավանդական տեխնոլոգիաների համեմատ փոշեմետալուրգիական տեխնոլոգիաների առավելություններով, այլև բարձր ֆիզիկական և մեխանիկական հատկություններով թեթև համաձուլվածքներ ստանալու հնարավորությամբ:

Հայտնի է [1-6], որ ալյումինի փոշեմետալուրգիայի բնագավառում գիտական հետազոտություններն իրականացվում են. բարձր տեսակարար ամրությամբ, կարծրությամբ, մածուցիկությամբ, կոռոզիոնակայունությամբ, ջերմակայունությամբ մինչև 350...400°C ջերմաստիճաններ, ինչպես նաև բարձր հալաշփական հատկություններով, մաշակայունությամբ և հոգնածային ամրությամբ փոշեհամաձուլվածքների և փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացման ուղղություններով: Համաձայն [7, 8] աշխատանքների՝ հալաշփական նյութերից պահանջվող հատկություններն են՝ շփման ցածր գործակիցը, բարձր մաշակայունությունը և կրողու-

նակությունը, լավ մշակվելիությունը, բարձր ամրությունը ստատիկ և դինամիկ լարումների տակ, բարձր ջերմահաղորդությունը և շատ ցածր ջերմային ընդարձակման գործակիցը:

Հակաշփական փոշեկոմպոզիտային նյութերի հիմնական առավելությունը ինքնայուղման երևույթի ապահովումն է, այսինքն՝ փոշենյութի ծակոտիներում գտնվող քսանյութի շերտի պահպանումը, որը պաշտպանում է առանցքակալի նյութին աղետալի մաշումից և լիսեռին կպչելուց, հետևաբար՝ վերանում է առանցքակալի հնարավոր խափանումը՝ քսայուղի մատակարարման դադարեցման պատճառով: Ինքնայուղվող նյութերի կառուցվածքի հիմնական առանձնահատկությունն այն է, որ դրանցում բաղադրիչների գործառույթները խստորեն տարբերակված են: Բաղադրիչների մի մասը կատարում են արտաքին լարումները կրողի դեր, իսկ մյուսներն ապահովում են հակաշփման հատկությունները («պինդ քսանյութեր»): Բաղադրիչներ ընտրելիս անհրաժեշտ է իմանալ պինդ քսանյութերի փոխազդեցության բնույթը մայրակի հետ, քանի որ հպման մակերևույթում, այսինքն անցումային շերտում ֆազային փոխակերպությունները կարող են զգալիորեն փոխել առանցքակալի նյութի ընդհանուր կառուցվածքը, ինչը կարող է ազդել շփական հատկությունների վրա:

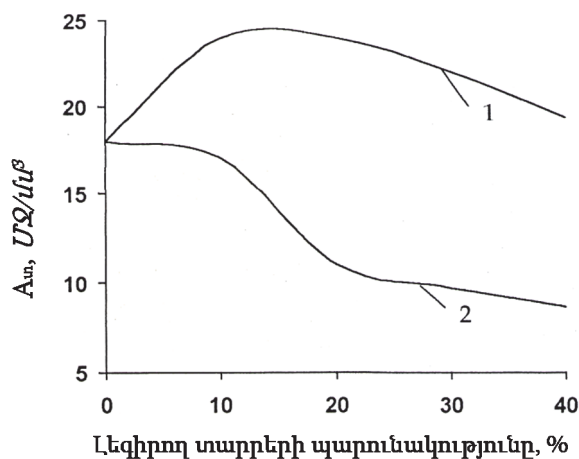
Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Աշխատանքի նպատակն է ուսումնասիրել ալյումինային հակաշփական համաձուլվածքները և փոշեկոմպոզիտային նյութերը, բացահայտել դրանց ստացման տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները և մշակել $Al-Cu-Cr-MoS_2$ բաղադրությամբ փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիա՝ օգտագործելով պաշտպանիչ-քսուքային ծածկույթներ:

Շփման գործընթացների վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ հավող մակերևույթների մաշվածության արագությունը որոշվում է հիմնականում երկրորդային կառուցվածքների հատկություններով և մեծապես կախված է այդ մակերևույթներում ձևավորված օքսիդային թաղանթների հատկություններից: Ընդ որում, կարևոր է ոչ թե մեկ հատկություն, այլ դրանց ամբողջ համալիրը՝ կարծրություն, ամրություն, փխրունություն, մակերևույթի հետ կապի ամրություն և այլն: Մախիստ բարդացնում է հակաշփական նյութի մայրակի ընտրության խնդիրը, որովհետև առանցքակալի շահագործման տվյալ պայմաններում երկրորդային կառուցվածքների ձևավորման գործընթացները պետք է ընթանան մայրակի մեջ:

Ինչպես կոմպոզիտային նյութերի մեծ մասը, այնպես էլ ալյումինային կոմպոզիտային նյութերը, հանդիսանում են թերմոդինամիկորեն անհավասարակշռված համակարգեր, որոնցում առկա են բաղադրիչների բաժանման հարթություններ և քիմիական պոտենցիալների գրադիենտ: Քիմիական պոտենցիալների գրադիենտը միջֆազային փոխազդեցության, մասնավորապես՝ փոխադարձ դիֆու-

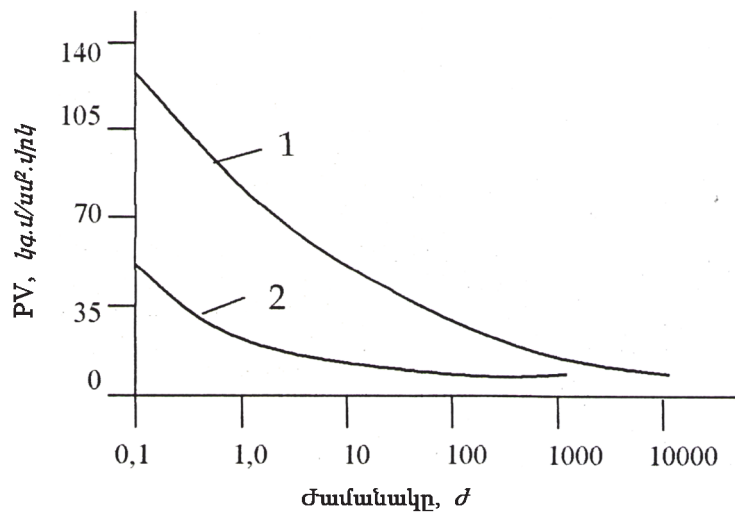
զիայի և քիմիական ռեակցիաների շարժիչ ուժն է: Մահմանափակ տիրույթում այդպիսի փոխազդեցություններն անհրաժեշտ են լավարկված հատկություններով կոմպոզիտային նյութերի ստացման համար, սակայն փոխազդեցությունների ինտեսիվացումը հանգեցնում է կոմպոզիցիայի մեխանիկական հատկությունների վատացման [9-13]: Քիմիական փոխազդեցությունը կարող է տեղի ունենալ ինչպես կոմպոզիտային նյութի ստացման, այնպես էլ շահագործման ժամանակ: Կայուն հատկություններով կոմպոզիտային նյութերում կոմպոնենտները պետք լինեն քիմիապես համակցելի [14]: Համալիրը ներառում է թերմոդինամիկական և կինետիկական համակցությունները [15]: Թերմոդինամիկապես անհամակցելի բաղադրիչները որոշակի ջերմաստիճանաժամանակային տիրույթում կարող են լինել կինետիկապես համակից և հաջողությամբ շահագործվել կոնստրուկցիաներում [7, 9]: Քիմիական համակցության հետ մեկտեղ պետք է ապահովել նաև բաղադրիչների մեխանիկական համակցությունը, քանի որ վերջինիս առկայության պայմաններում է հնարավոր բաժանման հարթությամբ լարումների արդյունավետ փոխանցումը [9, 16]:

Հետազոտության արդյունքները: Հետազոտությունների արդյունքում պարզվել է, որ այլումինի լեգիրումը պղնձով և մագնեզիումով մեծացնում է կոմպոզիտային նյութի մաշակայունությունը: Քայքայման աշխատանքի կորն ունի առավելագույն կետ պղնձի ավելի քան 5% և մագնեզիումի ավելի քան 10% պարունակությունների դեպքում (նկ. 1): Երկրորդային կառույցվածքները ներկայացնում են թթվածնի պինդ լուծույթ մետաղի հետ, որոնք նվազեցնում են մաշակայունությունը և քայքայման պրոցեսը:



Նկ. 1. Մակենության քայքայման տեսակարար աշխատանքի կախվածությունը լեգիրող տարրերի բաղադրությունից՝ այլումին-պղնձ (1) և այլումին-մագնեզիում (2) երկկոմպոնենտ կոմպոզիտային նյութերում

Այլումինային հակաշփական կոմպոզիտային նյութերի նկատմամբ հետաքրքրությունն անընդհատ աճում է, ինչը պայմանավորված է դրանց ցածր խտությամբ և բարձր կոռոզիակայունությամբ: Ըստ [17, 18] աշխատանքների՝ ալյումինային փոշեկոմպոզիտային նյութերն ունեն բարձր հակաշփական հատկություններ, ուստի դրանք համարվում են անագային և կապարային բրոնզների փոխարինողներ: Դրանք ունեն ջերմահաղորդականության բարձր գործակից, ինչն ապահովում է բարձր աշխատունակություն (նկ. 2) [19, 20]:



Նկ. 2. Ալյումինային հիմքով եռակալված առանցքակալների (1) և բրոնզների (2) երկարակեցության կախվածությունը կրողունակությունից (PV)՝ առանց լրացուցիչ քսանյութի օգտագործման աշխատանքի դեպքում

Քսայուղի պայմաններում աշխատելու դեպքում ծակոտկեն առանցքակալները կարող են պարունակել 10...60% ծակոտիներ, որոնք ներծծվում են յուղով [17, 21-23]: Անծակոտկեն կառուցվածք ստանալու համար ծակոտկեն մամլվածքները եռակալումից հետո ենթարկվել են տաք արտամղման (էքստրուզիայի), որը հնարավորություն է տալիս գործնականում ստանալ անծակոտկեն կառուցվածքներ: Աղ. 1-ում ներկայացված են տվյալներ, որոնք ցույց են տալիս մեխանիկական հատկությունների կախվածությունը փոշեհամաձուլվածքի լեգիրող տարրերից և ծակոտկենությունից: Պինն և մագնեզիում պարունակող ալյումինային հակաշփական նյութերը երաշխավորվում են աշխատելու ցածր տեսակարար ճնշման տակ աշխատող շփման հանգույցներում որպես սահքի առանցքակալներ, որտեղ պրոֆիլակտիկ վերանորոգումը ցանկալի չէ [24, 25]:

Ըստ աշխատանք [26]-ի՝ 2% պինն պարունակող ալյումինային փոշեկոմպոզիտային նյութն ունի ավելի բարձր տեսակարար ամրություն, քան երկաթի

կամ բրոնզի (Յր10) հիմքով փոշեհամաձուլվածքները. փորձարկման պայմաններն են. պտտման արագությունը - 1000...3400 *պտ/րոպե*, ճնշումը - 5...600 Ն և կրողունակությունը - $PV = 34...3760$ *կգ.մ/սմ².ր*:

Աղյուսակ 1

Ալյումինային հակաշփական նյութերի համեմատական հատկությունները

Բաղադրությունը	Ամրության սահմանը, σ_{θ} , ՄՊա	Հարաբերական երկարացումը, δ , %
Al-5% Cu	140	-
Al-5% Cu	130...150	6...13
Al-(2...6)%Cu-(0,2...2,0)%Mg	240	4,0
Կեղծ համաձուլվածքի հատիկներ		
Al-Pb*	75	4,3
Նույնը**	96	8,1
Խառնուրդ ПА-2...5%Pb***	80	21,0

Ծանոթագրություն՝ տաքացման ջերմաստիճանը ձևավորումից առաջ.

* - 300°C, ** - 500°C, *** - 300°C

Համաձայն աշխատանք [23]-ի՝ եռակալված ալյումինային համաձուլվածքին 6% անագի ավելացումը 50%-ով մեծացնում է նրա մաշակայունությունը բրոնզի համեմատ: Առավելագույն թույլատրելի բեռնավորումը և սահքի արագությունները՝ դժվար յուղման պայմաններում աշխատող ալյումինի հիմքով կոմպոզիտային նյութերի դեպքում նույնն են, ինչ բրոնզագրաֆիտի դեպքում, որը պարունակում է 0...4% գրաֆիտ և 9...10% անագ, դրանց $PV = 20$ *կգ.մ/սմ².վ*: Եռակալված ալյումինի համալիր լեգիրումը հնարավորություն է տալիս էապես ընդլայնել դրա կիրառման պարամետրերն ու աշխատանքի պայմանները: Բարձր հրամրություն, մաշակայունություն և ջերմահաղորդականություն ունեն ալյումինի հիմքով այն կոմպոզիտային նյութերը, որոնք պարունակում են 5...10% երկաթի, նիկելի և քրոմի խմբի մեկ կամ մի քանի մետաղներ և 0...0,5% սիլիցիում [27]:

Ալյումինի օքսիդի առկայությունը մեծացնում է նյութի մաշակայունությունը և հնարավորություն է տալիս այն օգտագործել սարքաշինության մեջ [28]: Ալյումինի հատիկների վրա օքսիդային թաղանթի առկայությունը կանխում է բեռնավորման ժամանակ ծակոտիների մեկուսացումը (բլոկավորումը), իսկ փափուկ հիմքը՝ ապահովում է նյութի լավ վերամշակվելիությունը [24]:

Ալյումինային փոշեկոմպոզիտային նյութերի հակաշփական հատկությունները բարձրացնելու նպատակով ավելի շատ օգտագործվում են պինդ քսանյութեր, ինչպիսիք են գրաֆիտի կամ մոլիբդենի սուլֆիդի դիսպերս մասնիկները: Շատ հետազոտողների կարծիքով՝ պինդ քսանյութերը կարող են ձևավորել ավելի

արդյունավետ պաշտպանիչ թաղանթներ, որոնք հնարավորություն կտան հրաժարվել սակավ և թանկարժեք անագից ու կապարից և ապահովել շփման ագրեգատների աշխատունակությունն անբարենպաստ յուղման պայմաններում, ինչպիսիք են սահմանային կամ կիսաչոր շփումը: Գրաֆիտի, սուլֆիդների, սելենիդների, ֆտորիդների և հալոգենային միացությունների ավելացումն այլումինային համաձուլվածքներում հնարավորություն է տալիս այն օգտագործել ներքին այրման շարժիչների մեքենամասերում [29], ինչպես նաև՝ շփման ագրեգատներում, որոնք բավարար չափով աշխատում են չոր շփման պայմաններում: Այլումին-գրաֆիտային համաձուլվածքը 25 անգամ ավելի մաշակայուն է, քան ԵրԱՋ9-4 մակնիշի բրոնզը և 1,5 անգամ ավելի, քան ԵրՕԼԿ5-5-5 բրոնզը: Համաձուլվածքն արագորեն զելվում և հարմարաբերվում է լիսեոին, և շփման մակերեսի վրա պաշտպանիչ գրաֆիտային թաղանթի ձևավորումից հետո այն ձեռք է բերում մաշակայունություն [30]:

Վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ քերամաշման և մաշման նկատմամբ որպես բարձր դիմադրություն ունեցող համաձուլվածքները, հիմնականում օգտագործվում են էվտեկտիկական և հետէվտեկտիկական կառուցվածքով այլումինային համաձուլվածքներ, որոնցում սիլիցիումի պարունակությունը տատանվում է 10...25 %-ի սահմաններում: Հենց Al-Si համաձուլվածքի հիման վրա են մշակվում ներքին այրման շարժիչների գլանաձև շրջաշապիկները և մխոցները, որոնք զգալիորեն նվազեցնում են զանգվածը և բարելավում շարժիչի ջերմային պարամետրերը:

Աղ. 2-ում բերված են «Al-Si» մխոցային համաձուլվածքների համեմատական հատկությունները, որոնք ստացվել են փոշեմետալուրգիայի և ձուլման տեխնոլոգիաներով: Աղ. 2-ի տվյալներից հետևում է, որ փոշեհամաձուլվածքի ամրային հատկությունները 360°C ջերմաստիճանում ավելի քան 2,6...2,8 անգամ բարձր են բազային համաձուլվածքի հատկություններից:

Աղյուսակ 2

Մխոցների համար նախատեսված այլումինային համաձուլվածքների հատկությունները "A-SI2UN"

Ստացման եղանակը	Նախապատրաստվածքի վիճակը	20°C		360°C	
		σ_{θ} , ՄՊա	$\sigma_{0,2}$, ՄՊա	σ_{θ} , ՄՊա	$\sigma_{0,2}$, ՄՊա
Փոշեմետալուրգիա	Գլանված Գլանված	450	350	115	80
Պիրոմետալուրգիա		400	375	40	30

Ճապոնական «Sumitomo Electric Industries Ltd ընկերությունը ստեղծել է այլումինային փոշեգերհամաձուլվածք [31], որն առանձնանում է բարձր մեխա-

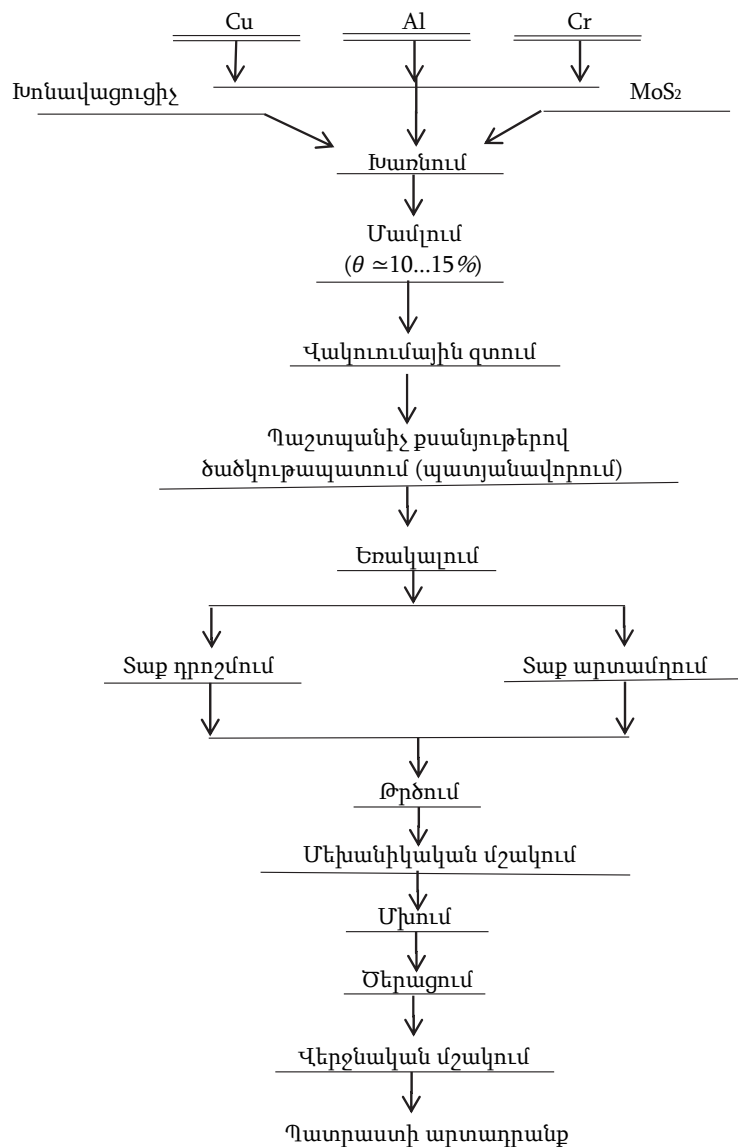
նիկական և հոգնածային ամրությամբ: Այլումինային համաձուլվածքի փոշին ստանում են հեղուկ մետաղի հալութափչման եղանակով, հեղուկ մետաղական շիթի $\sim 10^4$ Գ/լ սառեցման արագությամբ: Փոշեհամաձուլվածքը ստացվում է նուրբ մանրահատիկ, ունի հոմոգեն բաղադրություն և միատեսակ կառուցվածք: Այլումինային ծակոտկեն փոշեմամլվածքի խտացումը կատարվում է տաք արտամղման միջոցով, որին հաջորդում է կիսաֆաբրիկատների ջերմային մշակումը: Օրինակ, «Al+10...25 % Si+ +0,15...7,0 % Mg+1,0...6,0 % Cu+0,2...5,0 % Ni» բաղադրության փոշուց ստացվել է համաձուլվածք, որի $\sigma_{\theta} = 500$ ՄՊա, իսկ հարվածային մածուցիկությունը՝ 20...40 Ջ/սմ²:

Կատարված վերլուծությունների և համալիր հետազոտությունների արդյունքում մշակվել է «Al-Cu-Cr-MoS₂» բաղադրություններով փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացման տեխնոլոգիա (նկ. 3), որը հիմնված է ծակոտկեն նյութերի տաք մշակմամբ խտացման մեթոդների վրա (տաք արտամղում, դրոշմում): Այն ընդգրկում է. մետաղափոշիներից բովախառնուրդի պատրաստում, ծակոտկեն մամլվածքների մամլում, եռակալում, պաշտպանիչ քսանյութերով ծածկութապատում, տաք արտամղում և ամրացնող ջերմային մշակում:

Մետաղափոշիների խառնումն իրականացվել է շեղված առանցքով պտտվող խառնիչներում: Սկզբում բաղադրիչ տարրերը խառնվել են չոր վիճակում 1,5...2,0 ժ տևողությամբ, այնուհետև խոնավացված վիճակում՝ 4,0...4,5 ժ: Որպես խոնավացուցիչ օգտագործվել է էթիլային սպիրտ՝ 1,0...1,5 % չափով, բաղադրիչների տարանջատումը և բովախառնուրդի ադոտոտումն ապահովելու նպատակով:

Բովախառնուրդի մամլումը կատարվել է մետաղական մամլաձևերում, որը համարվում է ծակոտկեն մամլվածքների ձևավորման ավանդական գործողություն փոշեմետալուրգիական տեխնոլոգիայում: Մետաղական փոշիների (Al, Cu, Cr) բավականաչափ բարձր պլաստիկությունը, բացառությամբ MoS₂-ի, գործնականում հնարավորություն է տալիս մամլումը կատարել առանց պլաստիֆիկատորների կիրառման՝ չադոտոտելով բավախառնուրդը, հետևապես՝ արտադրատեսակի բաղադրությունը: Պլաստիֆիկատորների կարիք հատկապես չկա, որովհետև ուսումնասիրվող փոշեկոմպոզիտային նյութերի վերջնական խտացումը՝ մինչև անծակոտկեն վիճակ, իրականացվում է տաք արտամղման կամ տաք դրոշմման միջոցով: Այս առումով մամլվածքների նախնական ծակոտկենությունը կարող է տատանվել 10...15 %-ի սահմաններում: Քանի որ մամլումը համարվում է նախնական գործողություն ալյումինի հիմքով կոմպոզիտային նյութերի դեպքում, որոնց օպտիմալ ծակոտկենությունը 10...15 % է, ուստի մամլումը կատարվել է 200...300 ՄՊա կարգի ցածր ճնշումներով: Այս դեպքում որպես մամլաձևի քսուր օգտագործվել է սպիրտ-գլիցերին պատրաստուկը (80:20 հարաբերությամբ): Մամլման համեմատաբար ցածր ճնշումները ոչ միայն զգալիորեն նվազեցնում են մամլվածքի

արտամամլման ճնշումները, այլև կանխում են մամլվածքի և մամլաձևի հարակցման երևույթները: Մամլման համար պահանջվող ճնշումը հաշվարկվել է հետևյալ բանաձևով. $P_{\text{մ}} = k p S$, որտեղ $k=1,25$, մամլման ճնշման պահուստային գործակիցն է, p -ն՝ մամլման տեսակարար ճնշումը (երաշխավորվող ճնշման միջակայքը, ինչպես նշվեց, 200...300 ՄՊա է), S -ը՝ արտադրատեսակի լայնական կտրվածքի մակերեսը:



Նկ. 3. «Al-Cu-Cr-MoS₂» բաղադրիչ տարրերով հալաշփական նշանակության փոշեկոմպոզիտային նյութերի և արտադրատեսակների ստացման տեխնոլոգիան

Վակուումային գոտումը կատարվել է ծակոտկեն մամլվածքից խոնավության, քսանյութի և պլաստիֆիկատորի հեռացման նպատակով, որի համար մամլված նախապատրաստվածքները վակուումային չորացման պահարաններում ենթարկվել են չորացման 353...373 *Կ* ջերմաստիճանում: Ցանկալի է իրականացնել մամլվածքների բարձր ջերմաստիճանի վակուումային գոտում 723...773 *Կ* ջերմաստիճանում և $1,3 \cdot 10^{-4}$ Պա իջեցված ճնշման պայմաններում, որը բավարար է խառնուրդ միացությունների ջերմային տարրալուծման և սուբլիմացիայի համար, ինչպիսիք են հիդրօքսիքլորիդները, կարբոնատները և այլն: Զտման տեղությունը կազմել է 1,0...1,5 *ժ*:

Պաշտպանիչ-քսանյութերով ծածկութապատման նպատակն է կանխել բարձր-ջերմաստիճանային դեֆորմացիայի ժամանակ մայրակի պատերին կայքելու ալյումինային փոշեկոմպոզիտային նյութերի ունակությունը: Պաշտպանիչ-քսային ծածկույթների (տեխնոլոգիական պատյանների) միջոցով հնարավոր է կանխել կապակցումը տաք մշակման ժամանակ (տաք արտամղում, տաք դրոշմում և այլն): Ալյումինային համաձուլվածքների համար լավագույն ծածկույթներ են հանդիսանում ապակյա քսանյութերը [32], որոնք ներառում են SiO_2 , K_2O , Na_2O , CaO , Al_2O_3 , B_2O_3 , MgO և PbO : Ապակյա ծածկույթներն իրենց քսուքային հատկությունները ցուցաբերում են միայն պլաստիկ վիճակում: Որքան մեծ ջերմաստիճանային միջակայքում է պահպանվում քսանյութի մածուցիկությունը, այնքան այն ավելի արդյունավետ է: Պաշտպանիչ-քսուքային ծածկույթների կիրառման նպատակն է ոչ միայն վերացնել դեֆորմացվող մետաղի հարակցումը մայրակի հետ, այլև նվազեցնել շփման գործակիցը (մինչև 0,02...0,05), կանխել օքսիդացումը, փոքրացնել ջերմային կորուստները, փոքրացնել տաք արտամղման ճնշումը, մեծացնել տեխնոլոգիական սարքավորումների երկարակեցությունը, և հետևաբար, ստացված արտադրատեսակի որակը: Մեծ տարածում են ստացել 295 α -16, 295, 269, 10C և 185b մակնիշների ապակյա քսանյութերը, որոնք բնութագրվում են ցածր ջերմահաղորդականությամբ ($(0,4...1,2) \cdot 10^{-4}$ Վտ/մ.Կ) և շփման ցածր գործակցով ($f=0,018...0,051$): Դրանց օպտիմալ մածուցիկությունը տատանվում է 10...40 Պա.լ/սահմաններում: Հայտնի է նաև բնական սիլիկատային ապարների օգտագործման փորձը որպես պինդ քսանյութ 1273...1673 *Կ* ջերմաստիճանային միջակայքում [33]:

295 և 10C մակնիշի ապակյա ծածկույթների օգտագործման փորձերը ցույց են տվել դրանց ամբողջական համապատասխանությունը: Սակայն փորձերի ընթացքում բացահայտվեց նմուշների վրա նշված քսանյութերի կիրառման և միատարր հաստությամբ ծածկույթի շերտ ստանալու դժվարությունը: Ադիեզիոնակտիվ համաձուլվածքները ճնշմամբ մշակելիս ծածկույթը ստացվում է ծակոտկեն՝ մամլվածքը ընկղմելով ապակյա սուսպենզիայի մեջ կամ խոզանակով այն քսելով փորձանմուշի մակերևույթին: Պաշտպանիչ շերտը կարելի է ստանալ

նան՝ հեղուկացրիչով սուսպենզիան փչելով նմուշի վրա կամ էլեկտրաստատիկ դաշտում նստեցմամբ: Այնուհետև նախապատրաստվածքը չորացվել է 333...353 °C ջերմաստիճանում ~0,5 ժտևողությամբ:

Հետազոտությունները ցույց են տալիս, որ ծածկույթների ստացման գոյություն ունեցող մեթոդները միշտ չէ, որ հարմար են ծակոտկեն մամլվածքների մշակման համար՝ հատկապես, հեղուկ սուսպենզիան միկրոծակոտիների մեջ ներթափանցելու պատճառով: Որպես տեխնոլոգիական պատյան նպատակահարմար է օգտագործել բարակ պատերով կերամիկական թաղանթներ (բաժակներ): Այս դեպքում տեխնոլոգիական սխեմայից հանվում է ծակոտկեն մամլվածքի ծածկութապատման գործողությունը, որի արդյունքում բավականին պարզեցվում են տաքացման և տաք արտամղման գործընթացները: Այս նկատառումներից ելնելով՝ մշակվել են պաշտպանիչ-քսուքային ծածկույթների նոր կոմպոզիցիաներ՝ հիմնված բնական սիլիկատային ապարների վրա: Որպես ելակետային նյութեր վերցրվել են հրաբխային խարամի և բազալտի փոշիներ մինչև 63 մկմ մասնիկների չափով (աղ. 3): Քանի որ «Al-Cu-Cr-MoS₂» փոշեկոմպոզիտային նյութի տաք արտամղման ջերմաստիճանային տիրույթը տատանվում է 773...823 °C սահմաններում, հետևապես՝ բովախառնուրդը պատրաստելիս օգտագործվել են մածուցիկության ջերմաստիճանն իջեցնող հավելումներ՝ կապարի օքսիդ Pb₃O₄ և հեղուկ ապակի, վերջինս նաև հանդիսանում է կապակցող նյութ: Հեղուկ ապակու սոսնձման ունակությունը 3...5 անգամ ավելի բարձր է, քան սիլիկատային կապակցանյութերինը [34]: Խառնուրդի բաղադրության մեջ մտցվել են նաև մակերևութաակտիվ նյութեր, որոնք հնարավորություն են տալիս վերահսկել խառնուրդի հալման ջերմաստիճանը լայն տիրույթում (873...1473 °C): Բացի այդ, մակերևութաակտիվ նյութերն ապահովում են ջրային միջավայրում ծածկույթի հեշտ հեռացումը (տաք արտամղումից հետո):

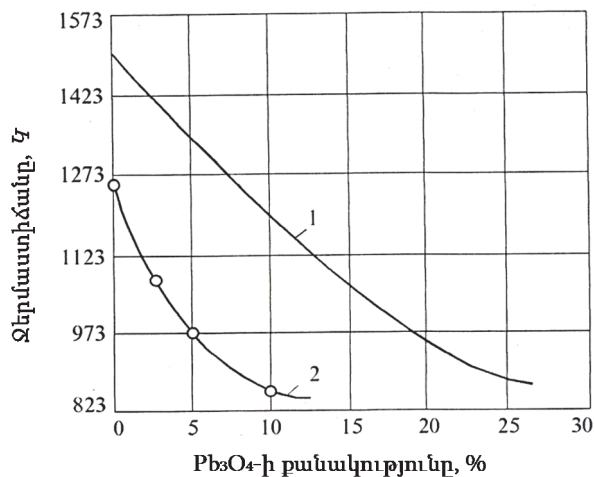
Աղյուսակ 3

Հեռնային ապարների քիմիական բաղադրությունը

Ապարների անվանումը	Բաղադրությունը, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Հրաբխային խարամ	57,3	19,6	3,8	1,8	6,0	2,3	3,9	2,2
Բազալտ	52,0	19,2	7,9	1,7	7,6	4,1	3,7	2,4

Պաշտպանիչ քսանյութերի կառուցվածքագոյացման և հալման գործընթացներն ուսումնասիրելու համար օգտագործվել են դերիվատագրական (DTA) և ռենտգենագրաֆիական (PΦA) անալիզների մեթոդները: Փորձերի առաջին փուլը կատարվել է առանց մակերևութային ակտիվ նյութերի օգտագործման: Pb₃O₄-ը

օգտագործվել է որպես ջերմաստիճանն իջեցնող հիմնական բաղադրիչ, ուստի դրա պարունակությունը տատանվել է 0...30%-ի սահմաններում: Հեղուկ ապակու քանակը սահմանափակվել է 20...25%-ի սահմաններում: Այն ապահովում է պլաստիկ զանգվածի ստացումը և տեխնոլոգիական պատյանի հեշտ ձևավորումը: Ռենտգենագրերը հանվել են DRON-1 դիֆրակտաչափի վրա $2^\circ/\text{րոպ}$ արագությամբ՝ մոլիբդենային ճառագայթիչով և Co ֆիլտրով: Այս ուսումնասիրությունների որոշ արդյունքներ ներկայացված են նկ. 4 և 5-ում: Ինչպես երևում է նկ. 4-ից, Pb_3O_4 -ի պարունակության աճով նվազում է սիլիկատային կոմպոզիցիայի հալման ջերմաստիճանը: Տաք արտամղման ջերմաստիճանային միջակայքի համար (773...823 Կ) Pb_3O_4 -ի օպտիմալ քանակությունը կազմում է 20...25% (կոր 1): Մակերևութային ակտիվ նյութեր պարունակող խառնուրդի հալունությունը որոշվել 2-րդ կորով (նկ. 4), համաձայն որի ալյումինային համաձուլվածքների տաք արտամղման համար օգտագործվող սիլիկատային պատյանի համար բավական է վերցնել 5...10% Pb_3O_4 :

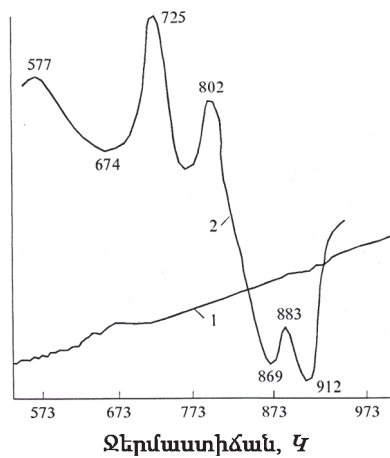


Նկ. 4. Pb_3O_4 -ի ազդեցությունը պաշտպանիչ-քսանյութի հալման ջերմաստիճանի վրա.

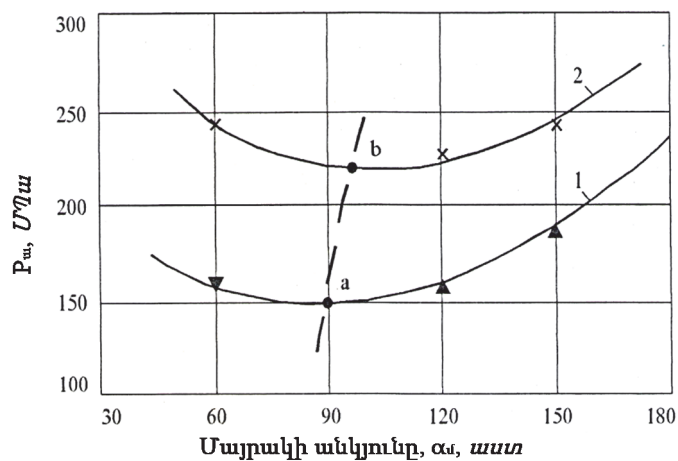
1 - խառամ+ Pb_3O_4 +20% հեղուկ ապակի, 2 - խառամ+ Pb_3O_4 +20% հեղուկ ապակի+մակերևութային ակտիվ նյութեր (ՊԱԲ)

Հալունության դիագրամը (նկ. 4) կառուցվել է փորձարկվող նմուշների ջերմագրերի հիման վրա: Նկ. 5-ում ցույց է տրված հետազոտված ջերմագրերից մեկը: Ինչպես տեսնում ենք (կոր 1), հրաբխային խառամը և բազալտը չունեն ընդգծված ջերմային ազդեցություն, այսինքն պինդ վիճակում ռեակցիաներ տեղի չեն ունենում: Ինչ վերաբերում է սիլիկատային կոմպոզիցիային, ապա DTA կորը (2) բնութագրվում է էնդոթերմիկ փոխակերպություններով: Էնդոթերմիայի վերջին էքստրեմումը ստացվել է 912 Կ-ում և համապատասխանում է հալման ջերմաստիճանին:

Միլիկատային բաղադրության համար պահպանված են խարամին և բազալտին բնորոշ ռենտգենյան ճառագայթների բոլոր ինտենսիվությունները, բացառությամբ են միայն Pb_3O_4 ինտենսիվությունները: Մա ցույց է տալիս Pb_3O_4 -ի փոխազդեցությունը հեղուկ ապակու հետ և կապարի օքսիդի անցումը դեպի ամորֆ ֆազ: Էժան նյութերը որպես տեխնոլոգիական պատյան օգտագործելու նպատակահարմարությունը հաստատվել է փորձնականորեն: $P_w=f(\alpha_w)$ կախվածությունը, որի գրաֆիկը ներկայացված է նկ. 6-ում, ստացվել է կերամիկական թաղանթների օգտագործմամբ փորձանմուշների տաք արտամղման արդյունքում:



Նկ. 5. Պաշտպանիչ-քսանյութային կոմպոզիցիաների ջերմագրերը՝ 1 - խարամ (բազալտ); 2 - խարամ + 30% Pb_3O_4 + 20% հեղուկ ապակի



Նկ. 6. Տաք արտամղման ճնշման (P_w) կախվածությունը մայրակի կոնական անկյունից (α_w). տաք արտամղման ռեժիմներն են. $T_w = 550 \pm 10^\circ C$, $\tau_w = 1,0$ ժ, $\lambda_w = 3$; կոմպոզիցիաներն են՝ 1 - Al փոշի, 2 - բովախառնուրդ AI + 5,0% Cu; a և b կետերը α_w -ի օպտիմալ արժեքներ են

Ինչպես երևում է նկ. 6-ից, $\alpha_w=90...100^\circ$ սահմաններում տաք արտամղման ճնշումը ստացվում է ամենափոքրը ($P_w=150...220$ ՄՊա): Տաք արտամղված արտադրատեսակների մակերևույթը մաքուր է և հարթ: Պաշտպանիչ քսանյութի հեռացումը դժվարություն չի ներկայացնում: Ջրային միջավայրում այն քայքայվում է (տարրավազվում է) և անցնելով փոշի վիճակի՝ շերտագատվում և հեռացվում է:

Ալյումինի և նրա հիմքով ծակոտկեն կոմպոզիտային նյութերի եռակալման գործընթացն ունի առանձնահատկություններ: Ալյումինափոշու մակերևույթի օքսիդային թաղանթը խոչընդոտում է միջհատիկային շփումների առաջացմանը, այսինքն նստեցման գործընթացին: Լեգիրող տարրերով (Cu, Mg, Si, և այլն) լեգիրման դեպքում եռակալման ժամանակ տեղի է ունենում հեղուկ ֆազի առաջացում, որը քայքայում է ալյումինի օքսիդային թաղանթը, և հետևաբար՝ արագանում է եռակալման գործընթացը [35-39]: Եռակալման ժամանակ ալյումինային մամլվածքի նստեցումն ակտիվացնում է լեգիրող տարրերը, որոնք պինդ վիճակում քիչ են լուծվում նրա մեջ, իսկ եռակալման ջերմաստիճանում լուծվելիությունը կտրուկ բարձրանում է: Նման հատկություններ ունեն պոլինձը, սիլիցիումը, նիկելը և այլ տարրեր [40]: Մագնեզիումի և ցինկի ավելացումները [41] եռակալման ժամանակ առաջացնում են մամլվածքի չափերի մեծացում:

Եռակալման համար պաշտպանիչ միջավայրի ընտրությունը հիմնականում որոշվել է վառարան ագրեգատների ընտրությամբ, որտեղ ալյումինային արտադրատեսակների եռակալումը կատարվում է հիմնականում ջրածնի, արգոնի և վակուումի միջավայրերում: Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ վակուումում եռակալումն ավելի քիչ նախընտրելի է, քան ջրածնի և արգոնի միջավայրում: Խնդիրն այն է, որ վակուումային եռակալումն ուղեկցվում է ալյումինի (Al), ցինկի (Zn), մագնեզիումի (Mg) և այլ հեշտ ցնդող մետաղների մասնակի հեռացմամբ, որոնք շարքից հանում են վառարանի ագրեգատները: Եվ քանի որ ալյումինն ունի մեծ հակում թթվածնի նկատմամբ, օգտագործվել են չոր ջրածին և արգոն գազեր (ցողի կետը եղել է ոչ պակաս, քան -25°):

Եռակալված նախապատրաստվածքները կրկնակի տաքացվել են մինչև $500...550^\circ\text{C}$ և ենթարկվել տաք արտամղման՝ $\lambda \geq 4$ արտամղման գործակցով՝ ապահովելով անծակոտկեն կառուցվածք: Տաք արտամղումից հետո նախապատրաստվածքների վրայից հեռացվել են կերամիկական ծածկույթները, որից հետո դրանք ենթարկվել են նախնական մեխանիկական մշակման (շրջատաշում, գայլիկոնում, պարուրակահանում և այլն)՝ օգտագործելով տիպային հաստոցային սարքավորումներ և ստանդարտ կտրող գործիքներ: Մեխանիկական մշակումից հետո արտադրատեսակները ընտրված օպտիմալ ռեժիմներով ենթարկվել են ջերմային մշակման՝ միմյան և ծերացման: Տաքացումը կատարվել է արգոնի միջավայրում,

իսկ միտումը՝ ջրում, որից հետո դրանք ենթարկվել են վերջնական մշակման, մասնավորապես՝ հղկման, փայլեցման, չափաբերման և այլն:

Ուսումնասիրվել են Al-Cu-Cr-MoS₂ փոշեկոմպոզիտային նյութերի շփման և մաշման գործընթացները հեղուկ (յուղման) միջավայրում և չոր շփման պայմաններում: Պարզվել է, որ MoS₂ քսանյութի ազդեցությունը դրսևորվում է միայն ալյումինային փոշեկոմպոզիտային նյութերը միջմետաղային ֆազերով ամրացման դեպքում: Մշակվել է Al-Cu-Cr-MoS₂ փոշեհամաձուլվածքի օպտիմալ բաղադրությունը, և առաջարկվել են շփման պարամետրերը. շփման գործակիցը տատանվում է $f=0,02...0,04$ սահմաններում:

Եզրակացություն: Ուսումնասիրելով ալյումինի հիմքով ձուլված և փոշեկոմպոզիտային հակաշփական նյութերի կառուցվածքն ու հատկությունները՝ բացահայտվել է, որ դրանց ցածր հակաշփական հատկությունները պայմանավորված են հալվող մակերևույթների կաչողունակությամբ, որն ուղեկցվում է նյութատեղափոխությամբ, ինչպես նաև բարձր շփման գործակցով (0,4...0,5) և ցածր մաշակայունությամբ: Այս առումով բարձր մաշակայունությամբ և շփման ցածր գործակցով ալյումինային համաձուլվածքների և կոմպոզիտային նյութերի ստեղծումը արդիական և առաջնային խնդիր է:

Ալյումինի հիմքով փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացման փոշեմետալուրգիական եղանակների ուսումնասիրությունները հնարավորություն են տվել մշակելու հակաշփական հատկություններով օժտված նոր դասի ալյումինային համաձուլվածքներ: Ինչ վերաբերում է պահանջվող հատկություններով ալյումինային փոշեկոմպոզիտային նյութերի ստացմանը, ապա ընտրվել է դրանցից հետանկարային տարբերակը. ալյումինի հիմքով լեգիրված բովախառնուրդի պատրաստում, այդ թվում՝ դիսպերս ներխառնուկների և պինդ քսանյութերի ներմուծում, մամլում, եռակալում, թաղանթապատում, տաք արտամղում և ջերմային մշակում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Вульфович Л.Б., Елагин В.И. Алюминиевые порошковые сплавы // Технология легких сплавов. - 1976. - №2. - С. 80 - 89.
2. Աղբալյան Ս.Գ., Սաֆարյան Տ.Ն. Հրամուր ալյումինային փոշեհամաձուլվածքների տաք արտամղման գործընթացի փորձագիտական հետազոտումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սերիա. - Երևան, 2009. - Հատ. 62, N 4. - էջ 367-376:
3. Աղբալյան Ս.Գ., Սաֆարյան Տ.Ն., Անդրիասյան Ա.Վ., Պետրոսյան Ա.Ա. Ալյումինային հրամուր փոշեհամաձուլվածքի ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը տաք արտամղմամբ և կառուցվածքի ու հատկությունների հետազոտումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սերիա. - Երևան, 2011. - Հատ. 64, N 1. - էջ 15-21:

4. **Աղբալյան Ս.Գ., Պետրոսյան Ա.Ա., Վարդանյան Վ.Գ.** Ալյումինային հակաշփական փոշեհամաձուլվածքների կառուցվածքագոյացման սկզբունքները // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սերիա.- Երևան, 2015.- Հատ. 68, N 1.- էջ 138-148:
5. **Աղբալյան Ս.Գ., Պետրոսյան Ա.Ա., Վարդանյան Վ.Գ.** Ալյումինային հակաշփական փոշեհամաձուլվածքների շփատեխնիկական հատկությունների ապահովման սկզբունքները // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սերիա.- Երևան, 2015.- Հատ. 68, N 3.- էջ 299-308:
6. **Աղբալյան Ս.Գ., Վարդանյան Վ.Գ., Սաֆարյան Տ.Ն., Վարդանյան Դ.Գ.** Ալյումինային հակաշփական փոշեհամաձուլվածքների ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը և կառուցվածքի ու հատկությունների հետազոտումը // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սերիա.- Երևան, 2017.- Հատ. 70, N 1.- էջ 18-29:
7. **Крагельский И.В.** Трение и износ.- М.: Машиностроение, 1968.- 478 с.
8. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел.- М.: Машиностроение, 1969.- 543 с.
9. **Иванова В.С., Копьев И.М.** Упрочнение металлов волокнами: Монография.- М.: Наука, 1973.- 207 с.
10. **Иванова В.С., Копьев И.М., Елагин Ф.М.** Алюминиевые и магниевые сплавы, армированные волокнами.- М.: Наука, 1974.- 199 с.
11. Композиционные материалы в конструкции летательных аппаратов / Пер. с англ.; **Под ред. А.Л. Абибова.** - М.: Машиностроение, 1975.- 265 с.
12. Волокнистые композиционные материалы с металлической матрицей / **Под ред. М.Х. Шоршорова.** - М.: Машиностроение, 1981.- 272 с.
13. **Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р.** Новые композиционные материалы.- Киев: Вища школа, 1979.- 312 с.
14. **Портной К.И., Заболоцкий А.А., Турченков В.А.** К оценке взаимодействия и совместимости компонентов в волокнистых композиционных материалах // Порошковая металлургия.- 1978.- N 10.- С.64 - 71.
15. Композиционные материалы с металлической матрицей. Композиционные материалы.- Т. 4 / Пер. с англ.; **Под ред. К.И. Портного.**-М.: Машиностроение, 1978.- 502 с.
16. **Меткалф А.Г.** Введение в обзор // В кн.: Поверхности раздела в металлических композитах. Композиц. материалы.- Т.4. -М.: Мир, 1978. - С.11- 41.
17. **Pisch I.** Spekany hlinik // Strojir, vyroba.- 1972.- 20, №7.- S. 473 - 476.
18. Staff report: Application outlook for aluminium p/ m parts // Metall Progr.- 1971.- 99, №4.- P. 60 - 64.
19. **Воронков Б.Д.** Подшипники сухого трения.- М.: Машиностроение, 1968.- 240 с.
20. **Pratt G.C.** A review of sintered metal bearings: their production and performance // Powder Metallurgy.- 1964.- 12, №24.- P. 356 - 385.
21. Пат. 20884 (Япония). Пористые спеченные изделия из сплавов на основе алюминия и метод их производства / **Ватанабэ Мицунао.** - Опубл. 07.09.68.
22. Пат. 19017 (Япония). Метод получения пропитанных маслом специальных подшипников на основе алюминия / **Сэгава Такэо.** - 18.08.69.
23. Patent. 3232754 (CA). Porous metallic bodies and fabrication methods therefor / **S. Storchheim.**- Опубл. 01.02.66.

24. Patent. 2741827 (CIA). Exothermic structuring of aluminium / **W.V. Knopp**.- 28.08.73.
25. Patent. 1115465 (United Kingdom). Powder metallurgy / **S. Storchheim, A. Cross**.- 29.05.68.
26. Порошковая металлургия за рубежом (сигнальная информация по фирменной документации). - Киев, 1977.- Вып. 1-2. - 168 с.
27. Patent. 2431646 (FRG). Warmfeste Aluminium Sinterlegierung / **E. Meyer-Ressler**.- 22.01.76,
28. Некоторые технологические и конструкционные свойства САС с низким коэффициентом линейного расширения / **Т.В. Рабинович, Т.Н. Кириллова, Р.А. Кривенко, Н.С. Калягина и др.** // *Алюминиевые сплавы*.- 1968.- Вып. 5.- С. 239 - 244.
29. Пат. 3379 (Япония). Плакирующий металл для цилиндров (двигателей внутреннего сгорания) / **Окамото Хидэо**.- Оpubл. 31.05.73.
30. Свойства горячедеформированного антифрикционного алюминиево-графитового сплава / **Г.Л. Царев, А.П. Челышев и др.** // *Порошковая металлургия*.- 1986.- №1.- С. 65-74.
31. **Irou**. Age Metalworking International. - 1983.- V. 22, №10.- P. 8.
32. Применение стеклянных защитных покрытий при штамповке лопаток из жаропрочных сталей / **Под ред. Н.И. Корнеева и др.**- М.: Машиностроение, 1966.- 124 с.
33. **Груднев А.П., Зильберг Ю.В., Тилин В.Т.** Трение и смазка при обработке металлов давлением: Справочник.- М.: Металлургия, 191.- 312 с.
34. Энциклопедия неорганических материалов. Т.1.- Киев: Ред. Изд. Украинской Энциклопедии, 1977.- 840 с.
35. **Amato J., Corso S., Sgambettera E.** Sintering procedyres for aluminium p/ m parts and metallographic examination during the process // *Powder Met.*- 1976.-19, №3.- P. 171 - 176.
36. **Савицкий А.П., Каракулов А.И., Марцунова Л.С.** Спекание алюминия в присутствии жидкой фазы // *Изв. вузов. Физика*.- 1968.- №8.- С. 12 - 17.
37. **Марцунова Л.С., Савицкий А.П., Ушакова Э.Н., Матвеев Б.И.** Порошковая металлургия.- 1973.- №12.- С. 14 - 18.
38. **Dubas H., Stevens R.H., Gildersleeve B.K.** Metallography and structure interpretation of aluminium p/n parts // *Int. J. Powder Met. and Powder Technol.* - 1974.- 10, №4.- P. 285 - 293.
39. **Davet E.M., Ferriss D.P.** Wear resistant aluminium p/ m parts fabrication and properties // In: *Modern development powder met. proc.: Int. powder metal. conf.* (Chicago, 1976).- New York: Princeton, 1977.- P. 357 - 373.
40. **Савицкий А.П., Марцунова Л.С.** Влияние растворимости в твердой фазе на объемные изменения алюминия при жидкофазном спекании // *Порошковая металлургия*.- 1977.- №5.- С. 14 - 19.

41. **Савицкий А.П., Марцунова Л.С.** Объемные изменения прессовок при жидко-фазном спекании // Порошковая металлургия.- 1982.- №10.- С. 11 - 16.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 10.04.2024:

С.Г. АГБАЛЯН, Г.А. ВАСИЛЯН, В.А. СИМОНЯН, А.С. АГБАЛЯН

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ
АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ
ОСОБЕННОСТИ**

Разработана технология получения порошковых антифрикционных композиционных материалов состава Al-Cu-Cr-MoS₂, основанная на методах уплотнения горячей обработкой пористых прессовок. Технология включает в себя приготовление порошковой смеси, прессование пористых материалов, покрытие защитными смазочными веществами, спекание, горячую экструзию или горячую штамповку, а также упрочняющую термическую обработку. Также разработаны новые составы защитно-смазочных покрытий на основе природных силикатных пород. В качестве исходных материалов были взяты вулканический шлак и базальтовые порошки с размером частиц до 63 мкм. В состав смеси также включены поверхностно-активные вещества, позволяющие регулировать температуру плавления смеси в широком диапазоне (873...1473 K). Кроме того, поверхностно-активные вещества обеспечивают легкое удаление покрытия в водной среде после горячей экструзии.

Ключевые слова: алюминий, антифрикционные композиционные материалы, смесь, прессование, спекание, горячая экструзия, закалка, старение.

S.G. AGHBALYAN, G.A. VASILYAN, V.A. SIMONYAN, A.S. AGHBALYAN

**DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING ALUMINUM
ANTIFRICTION POWDER COMPOSITE MATERIALS AND THEIR
CHARAKTERISTICS**

A technology has been developed for producing powder composite materials of the Al-Cu-Cr-MoS₂ composition based on the methods of compaction by hot processing of porous presses. It includes the preparation of a powder mixture, pressing of porous materials, coating with protective lubricating coatings, sintering, hot extrusion or hot stamping, and hardening heat treatment. New compositions of protective and lubricating coatings based on natural silicate rocks have also been developed. Volcanic slag and basalt powders with particle sizes up to 63 microns were taken as starting materials. The mixture also includes surfactants that allows to regulate the melting temperature of the mixture over a wide range (873...1473 K). In addition, surfactants ensure easy removal of the coating in an aqueous environment after hot extrusion.

Keywords: aluminum, antifriction composite materials, mixture, pressing, sintering, hot extrusion, hardening, aging.

Ն.Գ. ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ, Գ.Հ. ԱՍՉՅԱՆ, Տ.Շ. ԹԱՂԵՎՈՍՅԱՆ

ՊԱՀԱՆՋՎՈՂ ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ
ՇՓԱԿԱՆ ԱՍԲԵՍՏԱԶԵՐԾ ՆԵՐԴԻՐՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ
ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքում մշակվել են ՀՀ հանքարդյունաբերության և մետալուրգիական արտադրության թափոններից ստացված թելքերի ու փոշիների կիրառմամբ բարձրջերմաստիճանային կարճատև-կրկնվող ռեժիմի պայմաններում աշխատունակ ու պահանջվող ֆունկցիոնալ հատկություններով արգելակային ասբեստազերծ կոմպոզիտային շփանյութերի ստեղծման սկզբունքները: Որպես ֆունկցիոնալ պարամետր ընտրելով ջերմունակության գործակիցը, բացահայտվել են ֆունկցիոնալ հատկություններով արգելակային շփանյութերի մակերևութային շերտերի կառուցվածքային փոխակերպումները բարձրջերմաստիճանային շփման պայմաններում, և կատարվել է կառուցվածքագոյացման մեխանիզմի մոդելավորում:

Առաջին անգամ մշակվել է Windows ծրագրային միջավայրում հասանելիությամբ, winforms եղանակով ծրագրի ներմուծման և արտածման դաշտերի պատկերմամբ, ֆունկցիոնալ հատկություններով կոմպոզիտային շփանյութերի տեսակարար ջերմունակության գործակիցների ավտոմատ հաշվարկման ծրագիր՝ կախված բաղադրիչների ծավալային պարունակությունից: Բացահայտվել են Ալավերդու պղնձաձուլական արտադրության խարամներում պարունակվող ֆայալիտի (Fe_2SiO_4) ջերմաֆիզիկական և էնդոգեն հատկությունները և նրա՝ որպես ֆունկցիոնալ հատկությունների կարգավորիչի կիրառությունը արգելակային շփանյութերում: Մշակվել է պահանջվող ֆունկցիոնալ հատկություններով արգելակային բազմաբաղադրիչ նոր՝ Բաստենիտ-10 անվամբ ասբեստազերծ արգելակային ջերմակայուն կոմպոզիտային շփանյութը՝ ֆայալիտի կիրառմամբ (ՀՀ Գյուտի արտոնագիր N 752Y, 2022 թ), և նրա ստացման տեխնոլոգիան:

Առանցքային բառեր. ֆունկցիոնալ հատկություններով արգելակային շփանյութեր, տեսակարար ջերմունակության գործակից, շփման գործակից, ֆունկցիոնալ պարամետր, ֆայալիտ:

Ներածություն: Ֆունկցիոնալ հատկություններով պոլիմերային հիմքով կոմպոզիցիոն նյութերը անընդհատ ավելի լայն կիրառություն են գտնում տնտեսության տարբեր ոլորտներում: Բացառություն չեն կազմում նաև այդ դասին պատկանող արգելակային շփական նյութերը, և ներկայումս դրանց անվանացանկը ներառում է տարբեր հատկություններով հարյուրավոր շփանյութեր: Որոշակի նշանակությամբ բաղադրիչների համադրությունը հանգեցնում է նոր նյութերի

ստեղծմանը, որոնց հատկությունները էականորեն տարբերվում են բաղադրիչների հատկություններից: Փոփոխելով պոլիմերային հիմքի և լցանյութերի կազմը և քանակությունը, դրանց հարաբերակցությունը, լցանյութերի կոդմնորոշումը, ստանում են նյութերի լայն տեսականի՝ նախապես տրված բնութագրերով և պահանջվող ֆունկցիոնալ հատկություններով [1]:

Հիմք ընդունելով [2-4] աշխատանքներում հաստատված այն հանգամանքը, որ ջերմաստիճանի աճը բնութագրվում է շփանյութի ջերմունակությամբ, կարելի է փաստել, որ բարձրջերմաստիճանային (280°C բարձր) պայմաններում աշխատող շփանյութերի դեպքում որքան մեծ է ջերմունակության գործակիցը (փոքր է ջերմաստիճանի աճը), այնքան մաշակայուն է շփանյութը: Այս հանգամանքը կարևոր է պոլիմերային հիմքով կոմպոզիտային ասբեստազերծ արգելակային ջերմակայուն շփանյութերի մշակման համար, քանի որ բարձր ջերմունակությամբ լցուկների օգտագործումը հնարավորություն կտա մեծացնելու շփանյութերի մաշակայունությունը [5]:

Հետազոտության նպատակը. Հետազոտության նպատակն է ՀՀ հանքարդյունաբերության և մետալուրգիական արտադրության թափոնների կիրառմամբ մշակել պահանջվող ֆունկցիոնալ հատկություններով արգելակային շփական ասբեստազերծ ներդիրների ստացման տեխնոլոգիա և հետազոտել կառուցվածքագոյացման գործընթացը: Աշխատանքում հետազոտվել են ՀՀ-ում շահագործվող երկակի նշանակությամբ «Ուրալ» մակնիշի ավտոմեքենաների և Երևանի մետրոպոլիտենի վագոնների շփական ներդիրները:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը. Բազմաթիվ գիտական հետազոտություններ ցույց են տալիս, որ ջերմակայունությունը հանդիսանում է արգելակային կոմպոզիցիոն շփանյութերի հիմնական ֆիզիկամեխանիկական հատկություններից մեկը: Ջերմունակության և շփագիտական բնութագրերի միջև որակական և քանակական կապերի հաստատումը ժամանակակից շփագիտության կարևոր խնդիրներից մեկն է [6]:

Աշխատանքում մշակվել են միջազգային ստանդարտների պահանջներին համապատասխանող փորձագիտական հետազոտությունների ծրագիր և մեթոդակարգ՝ ելնելով ընտրված սարքավորումների վրա շփական գործընթացների ֆիզիկական մոդելավորման սկզբունքներից: Որպես փորձնական շփանյութեր ընտրվել են «Ուրալ» մակնիշի ավտոմեքենաների արգելակների համար ըստ ТУ 55571-3501105-10 նախատեսված ՌԴ-ում և Ուկրաինայում արտադրված շփանյութերը և մետրոպոլիտենի վագոնների արգելակների համար ըստ ТУ 2571-049-13173305-98 նախատեսված ՌԴ-ում արտադրված շփանյութերը: Հետազոտությունների ընթացքում ընտրված շփանյութերի մակերևութային շերտերի դինամիկական ձևափոխությունները, կառուցվածքային փոփոխությունները և ֆազային

փոխակերպումներն ուսումնասիրվել են ռենտգենյան դիֆրակցիայի մեթոդներով Empyrean դիֆրակտաչափի կիրառմամբ [7]:

Հետազոտության արդյունքները: Հայտնի են շփանյութերի ջերմունակությանը նվիրված հիմնարար հետազոտություններ [3, 7-12]: Մասնավորապես, կարևոր է տեսակարար ջերմունակության գործակիցի հաշվառումը շփանյութերի շփման ջերմային դինամիկայի հետազոտման գործընթացում և շփանյութերի կապակցող նյութերի ընտրության հարցերում: Սակայն 280°C ցածր պայմաններում շփանյութերի մաշակայունության վրա ջերմունակության փոփոխությունը որոշիչ ազդեցություն չի ունեցել: Եթե հաշվի առնենք այն հանգամանքը, որ հոգնածային մաշման դեպքում գծային մաշման կախումը ջերմաստիճանից արտահայտվում է առաջին կարգի (ուղիղ գիծ) կորի տեսքով [8, 9], ապա կարելի է նկատել, որ շփման գործակցի նվազման ջերմաստիճանային պայմաններում կատարվում է շփանյութերի մակերևութային շերտերի մաշում այլ մաշման մեխանիզմով, քանի որ փոփոխվում է կախվածությունն արտահայտող կորի բնույթը:

Կատարված հետազոտությունների հիման վրա Windows ծրագրային միջավայրում winforms եղանակով միջավայրում մշակվել է համապատասխան ծրագիր [10, 11], որտեղ հաշվարկվել են տեսակարար ջերմունակության գործակիցներն ընտրված պայմանական կոմպոզիցիոն շփանյութերի համար (աղ.):

Աղյուսակ

Տարբեր շփանյութերի տեսակարար ջերմունակության գործակցի արժեքները

Բաղադրակազմ	I	II	III	IV	V	VI
Տեսակարար ջերմունակության գործակից, $kJ/kg\ ^\circ C$	1,2375	1,2058	1,18115	1,2191	1,2315	1,3219

Աղյուսակից երևում է, որ առավելագույն տեսակարար ջերմունակությունն ապահովված է 6-րդ կազմի արգելակային շփանյութերի օգտագործման դեպքում: Սա ցույց է տալիս, որ շփման նոր նյութեր մշակելիս որպես նախնական ուղեցույց պետք է օգտագործվեն 6-րդ պայմանական նյութի լցանյութերի տոկոսային համամասնությունները:

Այս վարկածը ստուգելու համար փորձարարական հետազոտության են ենթարկվել WVA:19032, WVA:19283, WVA:17828, WVA:19620, 6KX-1B, ТИИР-457, АО АЗ УРАЛ մակնիշների շփանյութերը, որոնք հավաստագրվել են միջազգային ստանդարտների պահանջներով, և Բաստենիտ-8 շփանյութը, որը ստեղծվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում: Այս դեպքում Բաստենիտ-8 նյութի կոմպոզիտային կազմը նախագծված է՝ հաշվի առնելով ջերմունակության գործակցի բարձր արժեքը:

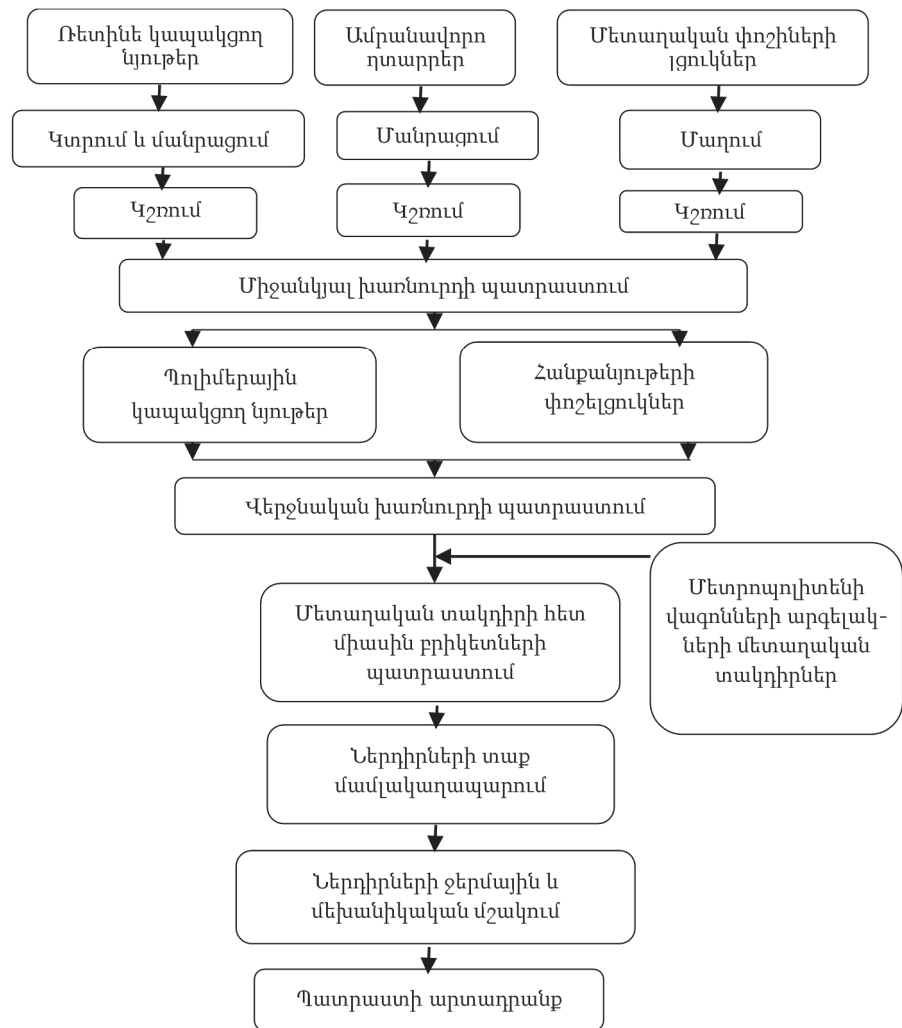
Բաստենիտ-8 շփանյութն ունի տեսակարար ջերմունակության գործակցի ամենամեծ արժեքը՝ 1,05: Համեմատաբար ցածր տեսակարար ջերմունակության գործակցիցներ ունեն 6KX-1B և 19283 շփանյութերը, որոնց շփման գործակցիցները տատանվում են 0,42-ից 0,54-ի սահմաններում: Միևնույն ժամանակ, շփման գործակցիցների և տեսակարար ջերմունակության գործակցիցների միջև չկա որոշակի խիստ որակական հարաբերակցություն: Որոշ նյութեր ունեն համեմատաբար ցածր տեսակարար ջերմունակության գործակցի արժեքներ, բայց ունեն շփման բարձր գործակցից և հակառակը: Նույնը նկատվում է մաշվածության բնութագրերի վերլուծության մեջ: Բաստենիտ-8 շփանյութը բարձր արդյունքներ է գրանցել նաև ստենդային փորձարկումների արդյունքում:

Այսպիսով, տեսական և փորձարարական հետազոտությունների արդյունքում հաստատվել է այն փաստը, որ շփման գործակցի բնութագրով Բաստենիտ-8 մակնիշի շփանյութը, ունենալով բարձր ջերմունակության գործակցից, փորձարկումների արդյունքում ցուցաբերում է համեմատաբար բարձր աշխատունակություն:

Հիմնվելով վերոնշյալին՝ պահանջվող ֆունկցիոնալ հատկություններով նոր շփանյութերի ստեղծման նպատակով Բաստենիտ-8 շփանյութի բաղադրակազմը ընդունվել է որպես բազային բաղադրակազմ: Նոր շփանյութերի ստացման ժամանակ քննարկվել և վերլուծվել են նաև գոյություն ունեցող մի շարք տեխնոլոգիաներ: Համատեղելով ստացված արդյունքները, մշակվել և առաջադրվել է բազմաբաղադրիչ նյութերի կիրառմամբ ասբեստազերծ արգելակային ջերմակայուն «Բաստենիտ-10» անվամբ կոմպոզիտային նոր շփանյութ, որն արտոնագրված է ՀՀ գյուտի արտոնագրով [12]: Բաստենիտ-10 շփանյութից երկակի նշանակությամբ «Ուրալ» մակնիշի ավտոմեքենաների և մետրոպոլիտենի վագոնների արգելակային ներդիրների պատրաստման տեխնոլոգիական սխեման պատկերված է նկ. 1-ում:

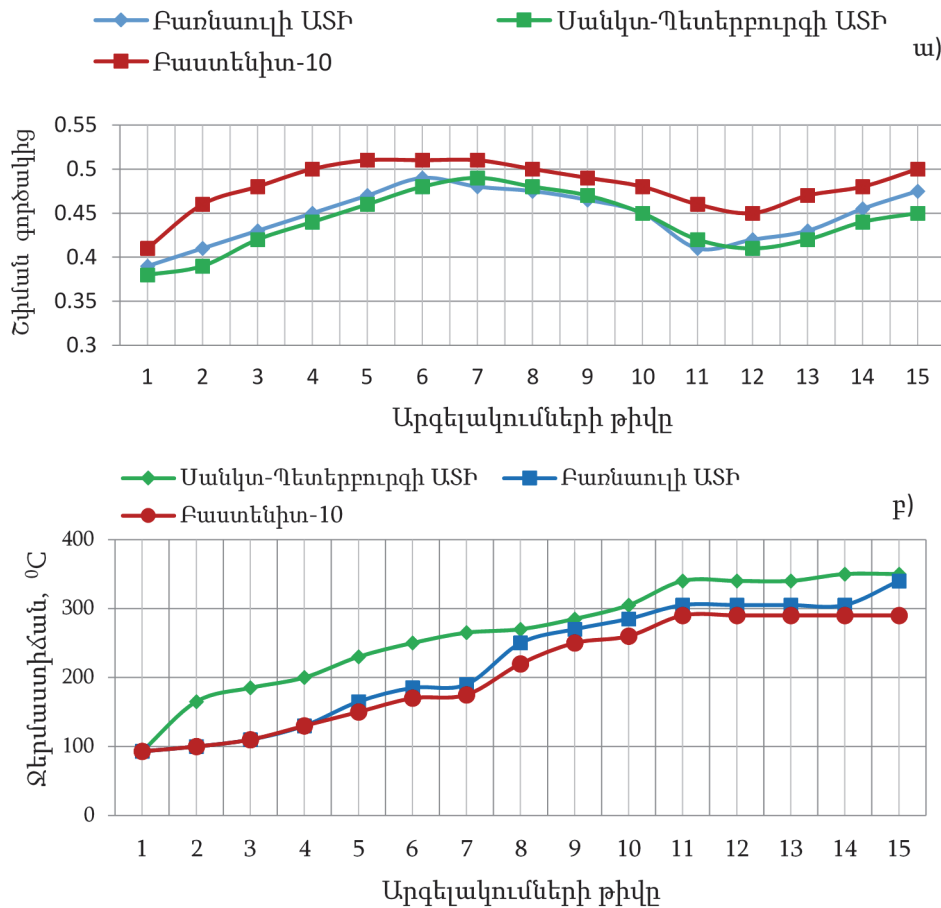
Շփանյութի ստեղծման նպատակն է բարձրացնել տրանսպորտային միջոցների արգելակային շփական ներդիրների մաշակայունությունը, շփման գործակցի արժեքները և մակերևութային շերտի 240...320°C աշխատանքային ջերմաստիճանի պայմաններում արգելակման ժամանակ շփման գործակցի նվազումը: Բաղադրության մեջ կարելի է առանձնացնել ֆայալիտը:

Կարևորելով մետրոպոլիտենի շարժակազմի վագոնների արգելակային շփական պոլիմերային հիմքով ասբեստազերծ, պահանջվող բնութագրերով ներդիրների ստեղծման հարցը՝ հետազոտության են ենթարկվել Բաստենիտ-10, ՌԴ Բառնաուլի ՄՏԻ և Սանկտ-Պետերբուրգի ՄՏԻ արտադրություն շփանյութերը: Վերջիններիս ընտրությունը պայմանավորված է նրանով, որ դրանք ներկայումս կիրառվում են ՀՀ Կ.Դեմիրճյանի անվան մետրոպոլիտենի շարժակազմի վագոններում: Փորձարկումները կատարվել են ՓՄ-9 լաբորատոր սարքի վրա՝ ըստ ГОСТ Р ИСО 7881-94 պահանջների [13]: Արդյունքները բերված են նկ. 1-ում:



Նկ. 1. Բաստենիտ-10 շփանյութից երկակի նշանակությամբ «Ուրալ» մակնիշի ավտոմեքենաների և մետրոպոլիտների վագոնների արգելակային ներդիրների պատրաստման տեխնոլոգիական սխեման

Միջին ջերմային ծանրաբեռնվածությամբ արգելակներում կիրառելու նպատակով կատարվել են Բաստենիտ-10 շփանյութի փորձարկումներ՝ ըստ [14] ստանդարտի մեթոդակարգի (նկ. 2):

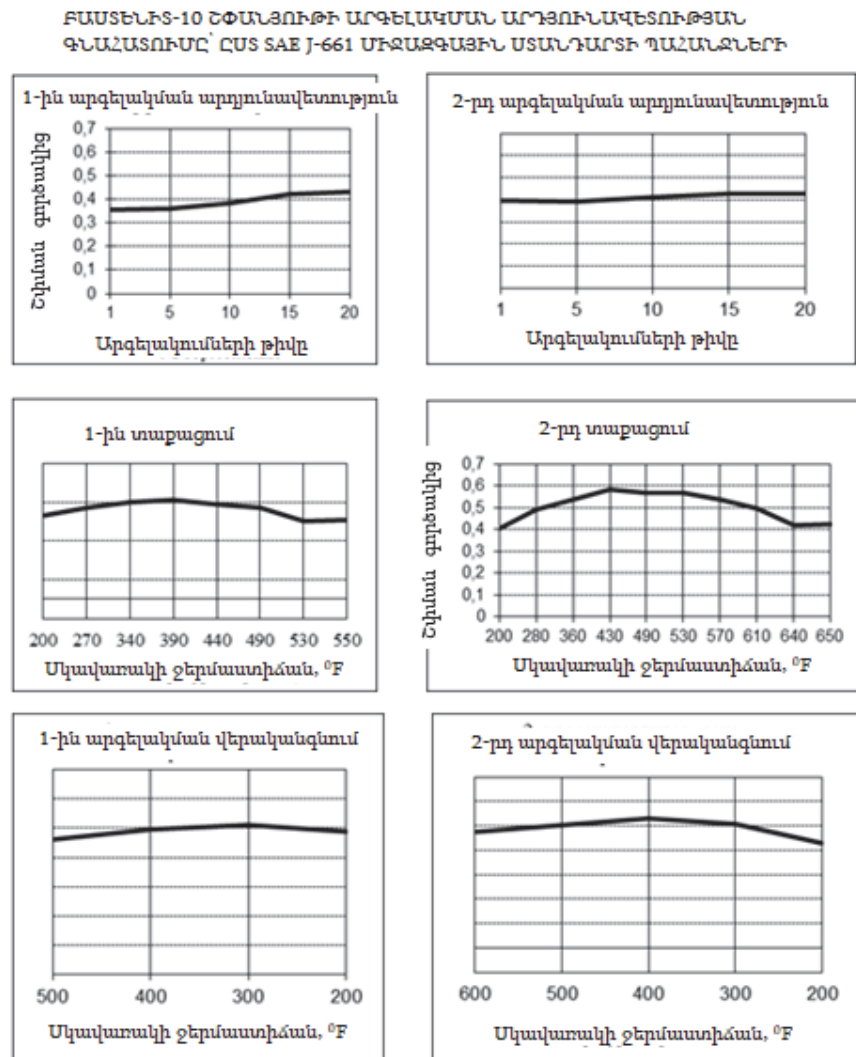


Նկ. 2. Բաստենիտ-10 շփանյութի շփման գործակիցի (ա) և ջերմաստիճանի (բ) կախվածությունը արգելակումների թվից

Բաստենիտ-10 շփանյութի շփման գործակիցը գրեթե մնում է հաստատուն առաջին և երկրորդ արգելակման արդյունավետության (1-st and 2-nd baseline) որոշման ընթացքում և կազմում է 0,4, ինչը բավարարում է շփանյութերին ներկայացվող պահանջները: Տաքացման ցիկլերի ժամանակ չի նկատվում շփման գործակիցի նվազում (1-st and 2-nd FADE):

Ընդհակառակը, շփման գործակիցը մեծանում է, և 360°C մինչև 530°C ջերմաստիճանային տիրույթում (միջին ջերմային ծանրաբեռնվածությամբ արգելակների աշխատանքային ջերմաստիճանային տիրույթ) կազմում է 0,5...0,55, բավարարելով ստանդարտի պահանջները: Բաստենիտ-10 շփանյութի շփման գործակիցը բարձր է մնում նաև առաջին և երկրորդ արգելակման արդյունավետության կորուստի վերականգնման (1-st and 2-nd Recovery) փորձարկումների ընթացքում:

Փորձերի արդյունքների համալիր վերլուծությունը հաստատում է, որ Բաստենիտ-10 շփանյութն ունի բարձր շփամաշվածքային բնութագրեր և բավարարում է [14] ստանդարտի պահանջները [15, 16]:



Նկ. 3. Բաստենիտ-10 շփանյութի արգելակման արդյունավետության գնահատումը՝ ըստ SAE J-661 միջազգային ստանդարտի պահանջների

Այսպիսով, շփամաշվածքային բնութագրերով Բաստենիտ-10 շփանյութը համապատասխանում է ռեժիմներով լաբորատոր փորձարկումների արդյունքում ցուցաբերում է բավարար աշխատունակություն և բավարարում է մետրոպոլիտերի վազոնների արգելակային ներդիրների ատանդարտների պահանջները: Առաջարկ-

վում է այն ներկայացնել ստենդային փորձարկումների ԱՊՀ երկրների երկաթուղային շարժակազմի վագոնների արգելակային ներդիրների հավաստագրման լաբորատորիայում (ՌԴ, Մոսկվա, ВНИИЖТ, ստենդային փորձարկումներ՝ ըստ ТМ № 02-001-91 ВНИИЖТ մեթոդիկայի):

Ֆայալիտի օգտագործումն արգելակային շփանյութերում ապահովում է նոր տեխնիկական արդյունավետություն: Բարձր ջերմաստիճաններում վերմիկուլիտի, մարմարի փոշու և ֆայալիտի խառնուրդը խոչընդոտում է օրգանական կապակցող նյութերի քայքայմանը: Շնորհիվ իրենց անմիջական կոնտակտման արգելակային սկավառակի մակերևույթի հետ, այդ նյութերը հանդես են գալիս որպես ջերմության կլանիչներ և պաշտպանում են արգելակային շփական ներդիրի շփման մակերևույթն ուժգին մաշումից: Այդ նյութերի անմիջական կոնտակտման հետևանքով ստեղծվում են նաև պայմաններ՝ բարձր և կայուն շփման գործակից ապահովելու համար:

Եզրակացություն: Հիմնվելով տեսական և փորձարարական մի շարք հետազոտությունների արդյունքների վրա՝ հաստատվել է այն վարկածը, որ բարձր ջերմունակության գործակից ունեցող նյութերը ցուցաբերում են կայուն շփագիտական բնութագրեր: Այդ փաստի արդյունքում առաջին անգամ մշակվել և ՀՀ գյուտի արտոնագրով արտոնագրվել է Բաստենիտ-10 անվամբ նոր շփանյութ՝ ՀՀ հանքարդյունաբերության և մետալուրգիական արդյունաբերության թափոնների և ֆայալիտի կիրառմամբ (ՀՀ Գյուտի արտոնագիր N 752Y, 2022 թ), և նրա ստացման տեխնոլոգիան՝ արգելակային շփանյութերում կիրառվող կապակցանյութերի, լցուկների և ֆունկցիոնալ հատկությունների կարգավորիչների ուսումնասիրման հիման վրա: Ցույց է տրվել, որ Բաստենիտ-10 արգելակային կոմպոզիտային շփանյութն իր շփական հատկություններով ցուցաբերում է արգելակային ավելի բարձր ու կայուն արդյունավետություն և իր բնութագրերով բավարարում է Եվրոպական տնտեսական խորհրդի թիվ 13 ստանդարտի պահանջները:

Հետազոտությունն իրականացվել է ՀՀ գիտության կոմիտեի ֆինանսական աջակցությամբ՝ 21Т-2D012 ծածկագրով գիտական թեմայի շրջանակներում ՀԱՊՀ «Շփագիտություն» բազային գիտահետազոտական լաբորատորիայում:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ասյան Գ.Հ.** Պահանջվող ֆունկցիոնալ հատկություններով արգելակային շփական ասֆեստագերծ ներդիրների ստացման տեխնոլոգիայի մշակումը. «Նյութագիտություն» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսություն. - Երևան, 2023. - 155 էջ:

2. **Меликсетян Н.Г.** Разработка теоретических и технологических основ создания фрикционных безасбестовых композиционных материалов на полимерной основе: Дис. ...докт. техн. наук.- Ереван, 2009.- 263 с.
3. Фрикционные композиты на основе полимеров / **А.К. Погосян, П.В. Сысоев, Н.Г. Меликсетян и др.** – Минск: Информтрибо, 1992. - 218 с.
4. **Агбалян С.Г., Меликсетян Г.Н.** Исследование работоспособности тормозного фрикционного композита, изготовленного из многокомпонентных материалов // Вестник НПУА: Metallurgy, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2017.- N1.- С.26-33.
5. **Меликсетян Н.Г., Асчян Г.О.** Перспективы создания новых фрикционных материалов тормозов вагонов метрополитена // Вестник НПУА: Metallurgy, материаловедение, недропользование.- Ереван, 2020.- № 2.- С. 59-67.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45728193>.
6. **Меликсетян Н.Г., Асчян Г.О., Тадевосян Т.Ш.** Теплоемкость как функциональный параметр тормозных фрикционных композиционных материалов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2023».- Текстовое электронное издание.- 2023.- С.253-259.
7. **Меликсетян Н.Г., Аракелова Э.Р., Асчян Г.О., Григорян С.Л.** Структурные изменения поверхностных слоев фрикционных материалов при высокотемпературном трении // Вестник НПУА: Metallurgy, материаловедение, недропользование. – Ереван, 2023. – № 1. – С. 48-58.
DOI: 10.5329/18293395-2023.1-48-58.
8. **Зиновьев Е.В., Чичинадзе А.В.** Физико-химическая механика трения и оценка асбофрикционных материалов. - М.: Наука, 1978. - 206 с.
9. **Марченко К.А.** Усталостная теория износа. Краткий обзор (К столетию со дня рождения И.В. Кргельского) // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008.- № 06, <http://www.mashin.ru/jurnal/archiv>.
10. **Меликсетян Н.Г., Асчян Г.О., Арутюнян Ю.В.** Математическое моделирование оптимального выбора компонентов тормозных фрикционных материалов с функциональными свойствами // Вестник НПУА: Metallurgy, материаловедение, недропользование. – Ереван, 2023.- №2.- С.35-45.
11. **Меликсетян Н.Г., Асчян Г.О., Галстян А.Ж.** Программное обеспечение подбора компонентов тормозных фрикционных материалов с учетом функциональных параметров // Материалы Всероссийской научно-практической конференции "Наука-Общество-Технологии-2024".- Россия, Москва, 2024.- С. 220-225.
12. Патент РА N 752Y. Фрикционная композиция / **Н.Г. Меликсетян, С.Г. Агбалян, Г.Н. Меликсетян, Г.О. Асчян, Т.Ш. Тадевосян** // Промышленная собственность: Официальный бюллетень N07/2.– Ереван, 2022, <https://aipo.am/public/uploads/files/file-Xn0qURQfjC.pdf>.
13. ГОСТ Р ИСО 7881-94. Транспорт дорожный. Накладки тормозные. Оценка характеристик фрикционного материала. Метод испытания малого образца на машине трения.-М.,1994.

14. FRICTION TEST FOR BRAKE LINING. International Standart SAE J 661 201211.- Brake Linings Standarts Cjmmitee.- 2012.
15. **Асчян Г.О.** Новый фрикционный материал для тормозов со средней тепловой нагрузкой // Вестник НПУА: Metallurgy, materials science, non-ferrous metallurgy. – Ереван, 2022. – № 2. – С. 42-50.
16. **Меликсетян Н.Г., Асчян Г.О.** Влияние фаялита на трибологические свойства фрикционных безасбестовых полимерных материалов // Сборник трудов Междунар. научно-технич. конф. "Полимерные композиты и трибология" (Поликом-триб -2022). – Гомель, Беларусь, 2022. – С.146.
17. <https://mpri.org.by/wp-content/uploads/2021/12/PolyComTrib2022-pres.pdf>

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան, Վանաձորի մասնաճյուղ:
Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 11.12.2024:

Н.Г. МЕЛИКСЕТАН, Г.О. АСЧЯН, Т.Ш. ТАДЕВОСЯН

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗАСБЕСТОВЫХ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК С ТРЕБУЕМЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны принципы создания безасбестовых композиционных тормозных материалов с необходимыми функциональными свойствами с использованием волокон и порошков, полученных из отходов горно-металлургического производства РА в условиях высокотемпературного короткого замыкания. Проведены структурное преобразование поверхностных слоев в условиях высокотемпературного контакта и моделирование механизма структурирования.

Создана программа автоматического расчета коэффициентов удельной теплоемкости композиционных контактных материалов с функциональными свойствами в зависимости от объемного содержания компонентов, с доступностью в программной среде Windows, отображающая импорт и экспорт поля программы методом winforms. Выявлены теплофизические и эндогенные свойства фаялита (Fe_2SiO_4), содержащегося в шлаках Алавердского медеплавильного производства, и способы его использования в качестве регулятора функциональных свойств в тормозных контактных соединениях. Разработаны новый многокомпонентный тормоз - безасбестовый тормозной термостойкий композиционный контактный материал на основе полимера Бастенит-10 с использованием фаялита (патент на изобретение РА N 752Y, 2022 г.) а также технология его производства.

Ключевые слова: тормозные фрикционные материалы с функциональными свойствами, коэффициент удельной теплоемкости, коэффициент трения, функциональный параметр, фаялит.

N.G. MELIKSETYAN, G.H. ASCHYAN, T.Sh. TADEVOSYAN

**DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING ASBESTOS-FREE
BRAKE PADS WITH REQUIRED FUNCTIONAL PROPERTIES**

As a result of theoretical and experimental research, the principles of creating asbestos-free composite brake materials with required functional properties are developed using fibers and powders obtained from the RA mining and metallurgical production waste under the conditions of high-temperature short-term-repetitive regime. The structural transformations of the surface layers under high temperature contact conditions, and modeling of the structuring mechanism is performed.

A program for automatic calculation of specific heat capacity coefficients of composite contact materials with functional properties, depending on the volume content of the components has been developed, with accessibility in the Windows software environment, displaying the import and export fields of the program in the winforms method. The thermophysical and endogenous properties of fayalite (Fe_2SiO_4) contained in the slags of Alaverdu copper smelting production and its use as a regulator of functional properties in brake contact compounds are revealed. A new multi-component brake, Bastenit-10 polymer-based asbestos-free brake heat-resistant composite contact material using fayalite (RA Invention Patent N 752Y, 2022) and its production technology are developed.

Keywords: brake friction materials with functional properties, specific heat capacity coefficient, friction coefficient, functional parameter, fayalite.

Լ.Ա. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ¹, Կ.Վ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ²**ԳԵՏԱՑԻՆ ՏԻՊԻ ԿՈՆՍԵՐՎԱՑՎԱԾ ՊՈԶԱՄԲԱՐՆԵՐԻՑ ՊՈԶԵՐԻ ՀԵՌԱՑՄԱՆ ՍԱՐՔԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄԸ**

Լեռնահանքային արդյունաբերության հարստացման պոչերի հետագա վերամշակման խնդիրները մշտապես գտնվում են ոլորտի մասնագետների ուշադրության կենտրոնում: Գետային տիպի պոչամբարների դատարկման արդյունքում հնարավոր է լուծել ոչ միայն պոչամբարներում պոչերի քանակի զգալի նվազեցման, դրանց հետագա վերամշակման, ինչպես նաև սակավահող ՀՀ-ում լեռնահանքային ձեռնարկությունների պայմաններում դատարկված պոչամբարների կրկնակի օգտագործման հետ կապված արդիական հարցեր: Ներկայումս հայտնի են պոչամբարների դատարկման բազմաթիվ սարքեր և տեխնիկական լուծումներ, որոնք մեծ մասամբ վերաբերում են հարթ ռելիեֆային պայմաններում տեղադրված պոչամբարների դատարկմանը: Վերլուծությունը ցույց է տվել, որ բարդ լեռնային և ռելիեֆային պայմաններում, կիրճերում և ձորերում տեղադրված մեծածավալ պոչամբարներից պոչերի հեռացման ներկայումս հայտնի եղանակների օգտագործումը լայն տարածում չի գտել՝ գործնականում իրենց ցածր արդյունավետության և տեղանքի դժվարահաս տեղամասերում կիրառելիության հնարավորության բացակայության պատճառով: Պոչամբարներից պոչերի հեռացման խնդիրն ավելի է բարդանում գետային տիպի պոչամբարների պայմաններում, քանի որ պոչերի հեռացման ժամանակ պոչամբարների տեղադրման բարդ ռելիեֆային պայմանների, զգալի խորությունների և հատակագծում երկայնական չափերի պատճառով ի հայտ են գալիս մի շարք տեխնիկական խնդիրներ, որոնց լուծումը հնարավորություն է տալիս բարձրացնել գետային տիպի պոչամբարներից պոչերի հեռացման գործընթացի արդյունավետությունը: Գետային տիպի պոչամբարների դատարկման նոր տեխնիկական լուծման մշակումը և հետագա կիրառությունը առավել արդիական է Հայաստանի Հանրապետության լեռնային ձեռնարկությունների բոլոր գործող և ներկայումս կոնսերվացված պոչամբարների համար՝ տեղադրված բարդ ռելիեֆային պայմաններում:

Առանցքային բառեր. պոչային նստվածք, գետային պոչամբար, սարք, դատարկման եղանակ, հենասյուն, մետաղական աշտարակ:

Ներածություն. Կոնսերվացված պոչամբարների վերամշակման խնդիրների և, հետևաբար, վերջիններիս դատարկման հետ կապված հարցերի վերաբերյալ տեխնիկական գրականությունում կան բազմաթիվ առաջարկություններ: Մասնավորապես, հայտնի են պոչամբարների դատարկման մի շարք արտոնագրված

մեթոդներ և սարքավորումներ, որոնց մի մասը վերապահումներով կիրառելի են նաև գետային տիպի պոչամբարներից պոչային նստվածքների հեռացման համար [1-6]: Ընդհանուր առմամբ, նշված հայտնի տեխնիկական լուծումներում առաջարկվում են պոչամբարների դատարկման եղանակներ ջրանետիչների, հողածուծ մեքենայի, ինչպես նաև ապարբարձիչ մեխանիզմների միջոցով: Գետային տիպի պոչամբարներից պոչային նստվածքների հեռացման վերոհիշյալ հայտնի մեթոդների վերլուծությունը ցույց է տվել, որ այդ տեխնիկական լուծումներին բնորոշ են մի շարք թերություններ, որոնք գործնականում նվազեցնում են դրանց կիրառման հնարավորությունները:

Այսպես, հայտնի է գետային տիպի պոչամբարների դատարկման եղանակի իրագործման համար կիրառվող սարք (ՀՀ գյուտի արտոնագիր № 2502 А, ՄԱԴ, E21C45/00, E02F3/88, 2011թ.), որի համաձայն՝ պոչամբարում անցկացվում է խրամափոս, որը լցնում են ջրով, արդյունքում ձևավորում են վերջրյա և ստորջրյա հանքաստիճաններ: Վերջրյա հանքաստիճանները մշակում են ջրանետիչների միջոցով. պոչերը ողողում են և ինքնահոս ձևով ուղղում են դեպի ստորգետնյա հանքաստիճան: Ստորգետնյա հանքաստիճանների մշակումն իրականացնում են խրամափոսում տեղադրված լողացող հողածուծ մեքենաով: Խրամափոսն անցկացնում են պոչամբարի կողի լողափային և լճակային գոտիների սահմանին: Խրամափոսի հետագա զարգացումը և ջրիկացած պոչերի հեռացումը հողածուծ մեքենայով իրականացնում են լճակի ուղղությամբ՝ լայնական-գուգահեռ ընթացաշերտերով:

Հաշվի առնելով այն հանգամանքը, որ Հայաստանի Հանրապետությունում, ինչպես նաև արտասահմանյան այլ երկրներում ներկայումս գործող և կոնսերվացված պոչամբարներում տեղադրված պոչերի խորությունները կարող են հասնել և գերազանցել 100 մ բարձրությունը, պոչային նստվածքների հեռացման համար հայտնի սարքի կիրառումը նպատակահարմար չի կարող լինել հետևյալ պատճառներով.

- Ժամանակակից արտադրության հողածուծ մեքենաներով հիմնականում կատարում են գետերի և լճերի հատակների խորացման հետ կապված աշխատանքներ, դրանց միջոցով գրունտների մշակման խորությունը սահմանափակ է և չի անցնում 25 մ-ից:

- Պոչամբարի խրամափոսում տեղադրված լողացող հողածուծ մեքենայի միջոցով մեկ ընթացաշերտում ջրիկացած պոչերը մինչև 25 մ խորությունը հեռացնելուց հետո, հաջորդ շերտը մշակելիս, անհրաժեշտություն է առաջանում իջեցնել ջրի հայելու մակարդակը խրամափոսում: Այսինքն, խրամափոսում ջրի ամեն

մի հաջորդ մակարդակի իջեցումը կհանգեցնի նրան, որ հողածուծ մեքենան կհայտնվի թույլ և չկապակցված պոչային նստվածքներով ձևավորված կողերով աստիճանաբար խորացող խրամափոսում: Դա անխուսափելիորեն կհանգեցնի խրամափոսի պատերի փլուզմանը, հողածուծ մեքենայի վթարին և պոչերի ջրիկացման և հեռացման աշխատանքների դադարեցմանը:

Հայտնի են նաև պոչամբարների դատարկման մեկ այլ եղանակով առաջարկված սարքերի երկու տարբերակներ (ԱՄՆ արտոնագիր №3,799,614, E 21C 45/00, 1974 թ.), որոնցով պոչային նստվածքների հանույթի և հեռացման գործընթացն իրականացվում է պոչամբարի մակերևույթից դեպի հատակն ընկած ուղղությամբ: Պոչամբարի մշակման ենթակա տարածքում նախապես ձևավորված ձագարածն փոսի մեջ ամբարձիչ կոունկով կախում են աշխատանքային հարթակը և նրան ամրացված մետաղական աշտարակը: Հարթակի գլխավոր-ձգիչ ճոպանների կարապիկների ազատ ծայրերը կոշտ ամրացնում են պոչամբարի կայուն հենարանների վրա և կարապիկների ինքնավար գործարկումով ապահովում են սարքի ուղղաձիգությունը և դիրքն ըստ բարձրության: Աշտարակին միացնում են տեխնիկական ջրի մատակարարման և պոչամբարից ապարախյուսի հեռացման խողովակաշարերը: Գործարկելով սուզարկղի կոնական մասի և սյունավոր հիմքերի եզրային ջրանետիչ կցափողերը, աշխատանքային հարթակը մետաղական աշտարակի հետ միասին, ծանրության ուժի ազդեցության տակ, իջեցնում են աշխատանքային հաջորդ դիրք: Աշտարակի ներսում տեղադրված ապարախյուսային պոմպով վերաջրիկացած պոչերը մղում են դեպի ապարախյուսի խողովակաշար, որի միջոցով հեռացնում են պոչամբարի տարածքից:

Սարքի նկարագրված տարբերակի թերությունն այն է, որ աշխատանքային հարթակը և նրան անշարժ միացված սյունավոր աշտարակը ձագարածն փոսի խորացմանը զուգընթաց հայտնվում են փոսի կողերի փլուզման իրական վտանգի տակ: Նման վթարի դեպքում սյունավոր հիմքով աշտարակի ամբողջ սարքավորումները, այդ թվում՝ նաև աշխատանքային հարթակը, վերջինիս վրա տեղակայված կառավարման մեխանիզմների հանգույցների հետ միասին, կարող են մնալ փլուզված և ջրիկացած ապարախյուսի տակ, այսինքն դառնալ անկառավարելի և անվերադարձ կորսված:

Հայտնի է նաև մեր կողմից առաջարկված գետային տիպի պոչամբարների դատարկման սարք, որի նմանատիպը հանդիսանում է ԱՄՆ արտոնագիր №3,799,614, E 21C 45/00, 1974 թ. [1]: Նոր արտոնագրված սարքի և ամերիկյան տեխնիկական առաջարկի տարբերությունն այն է, որ սարքի գլխավոր ճոպանները զուգահեռ գծերով են ամրացված պոչամբարի տարածքից դուրս տեղադրված կա-

յուն հենակետերում, իսկ աշխատանքային հարթակը իրականացված է շարժական սայլակի տեսքով, որի անիվները իրենց փոստրակներով սնեռված են գլխավոր ճոպանների վրա: Սայլակն ունի շարժաբեր, որն իրականացված է գլխավոր ճոպաններին միջանկյալ՝ քարշաճոպան կարապիկի տեսքով, ընդ որում, ձգիչ ճոպանավոր կարապիկների ազատ ծայրերը կոշտ ամրացված են աշտարակի հիմնակմախքի վերին բաղադրիչների վրա:

Վերը շարադրվածից հետևում է, որ.

- հայտնի սարքերի շահագործումը կապված է զգալի ծավալով նախապատրաստական աշխատանքների անցկացման հետ [1, 2, 4-6],

- կիրառվող սարքերով հնարավոր է պոչային նստվածքների հեռացման հետ կապված աշխատանքներ իրականացնել համեմատաբար փոքր չափեր և ոչ մեծ խորություն ունեցող պոչամբարների տարածքներից [2, 3],

- սարքերի հնարավոր կիրառումը համեմատաբար մեծ խորություններով պոչամբարներում անվտանգության ապահովման տեսանկյունից խիստ կասկածելի է [2],

- ջրհագեցած և թույլ կապակցված պոչային նստվածքներով պարփակված միջավայրում աշխատանքների անվտանգության կանոնների պահպանման դժվարությունը [2, 6]:



Նկ. 1. Արծվանիկի պոչամբարի տեղադիրքը (Google քարտեզ)

Խնդրի դրվածքը.

ՀՀ լեռնահանքային ձեռնարկությունների գետային տիպի պոչամբարները, որպես կանոն, տեղադրված են բարդ և կտրտված ռելիեֆային պայմաններում՝ սարալանջերին, կիրճերում և ձորերում:

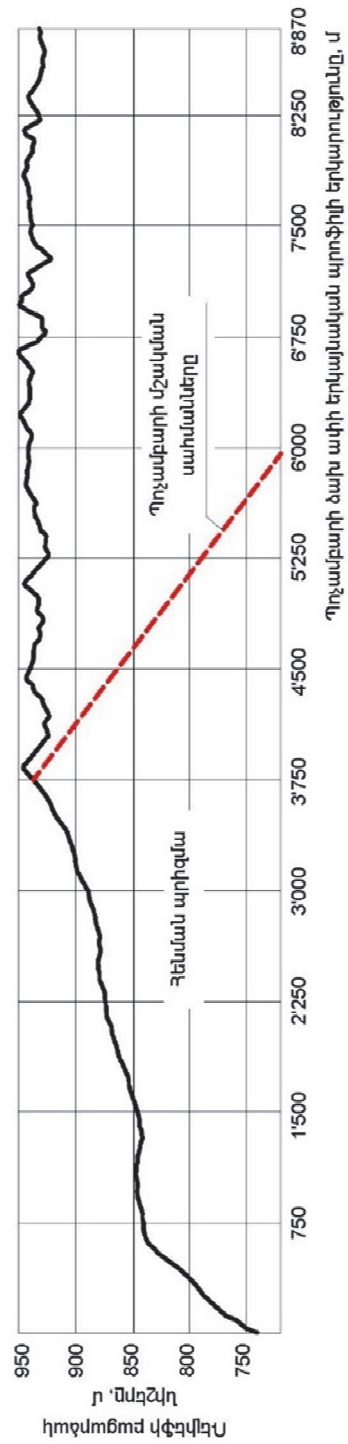
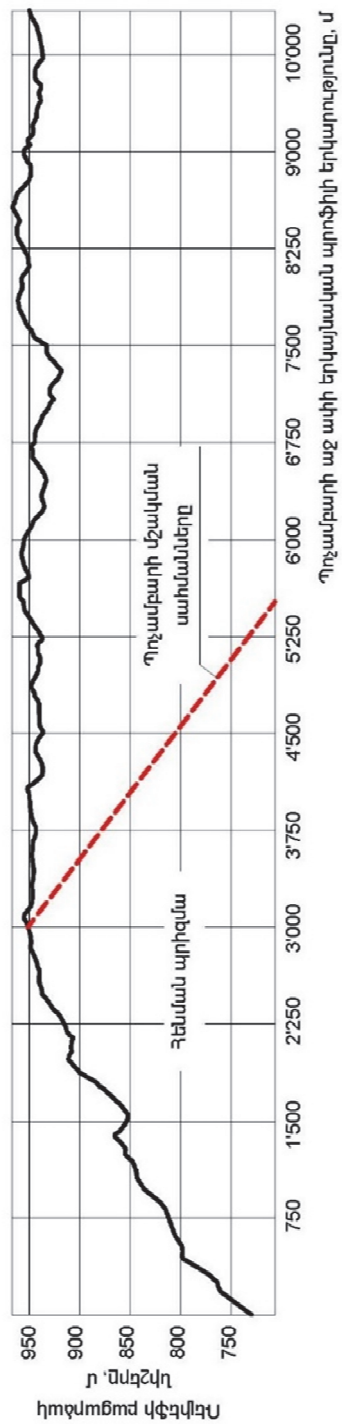
Սույն աշխատանքում գետային տիպի պոչամբարից պոչերի հեռացման նախկինում մշակված սարքի [1] աշխատանքի կատարելագործումը պարզաբանված է «Զանգեզուրի պղնձամոլիբդենային կոմբինատ» ՓԲ ընկերության կողմից շահագործվող Արծվանիկի պոչամբարի օրինակով, տեղադրված համանուն գետի կիրճում, ինչի տեսքը հատակագծում ցույց է տրված նկ. 1-ում:

Պոչամբարը զբաղեցնում է մոտավորապես 600 հա տարածք, իսկ նրա աջ և ձախ ափերի ռելիեֆի բացարձակ նիշերի միջակայքի արժեքները հետևյալն են.

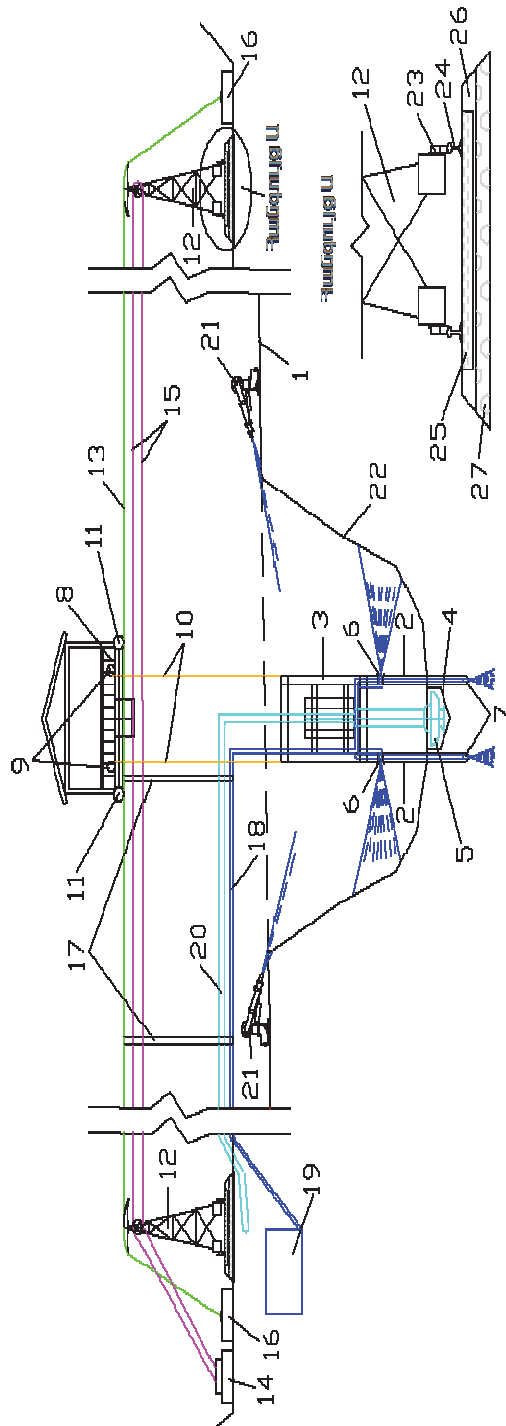
- աջ ափ՝ 730,0...950,0 մ,

- ձախ ափ՝ 740,0...935,0 մ:

Արծվանիկի պոչամբարի «ափերի» երկայնական պրոֆիլները բերված են նկ.2-ում: Մեր կողմից արտոնագրված սարքի կիրառությունը Արծվանիկի գետային տիպի պոչամբարից պոչային նստվածքների հեռացման համար կապված է մի շարք լրացուցիչ աշխատանքների կատարման հետ, ինչը իջեցնում է նախկինում առաջարկված տեխնիկական առաջարկության արդյունավետությունը: Արտոնագրված սարքով պոչամբարի դատարկման ժամանակ պոչերի մշակվող տարածության չափերը մի կողմից՝ սահմանափակվում են պոչամբարի լայնությամբ, իսկ մյուս կողմից՝ սարքի մետաղական աշտարակի (3) կողային պատերի դիմաց հորիզոնական տեղադրված ջրանետիչ կցափողերից (6) և պոչամբարի մակերևույթին տեղադրված ջրանետիչներից (21) արձակված ջրի շիթի երկարությամբ և կարող է տատանվել 400...500 մ՝ սահմաններում (նկ. 3): Մտացվում է, որ ըստ երկարության մի քանի կիլոմետր ձգվածություն ունեցող Արծվանիկի պոչամբարի և նմանատիպ այլ պոչամբարների դատարկման ժամանակ առաջարկված սարքի կիրառության դեպքում անհրաժեշտ կլինի սարքը և պոչամբարի սահմաններից դուրս տրամագծորեն հակառակ ուղղություններով պոչամբարի մակերևույթին հարող բնական ռելիեֆի վրա տեղադրված անշարժ հենասյուները (12) բազմաթիվ անգամ ապամոնտաժել, տեղափոխել պոչամբարի նոր մշակվող տեղամաս և նորից այնտեղ տեղադրել: Այս գործընթացների կատարումը բավականին ժամանակատար է և ծախսատար, ինչը կհանգեցնի պոչամբարից պոչերի հեռացման աշխատանքների ինքնարժեքի բարձրացմանն ու արտադրողականության նվազեցմանը:



Նկ. 2. Արծվանիկի պղնձաբարի ափերի (վերևում՝ աջ ափի, ներքևում՝ ձախ ափի) երկայնական կտրվածքները



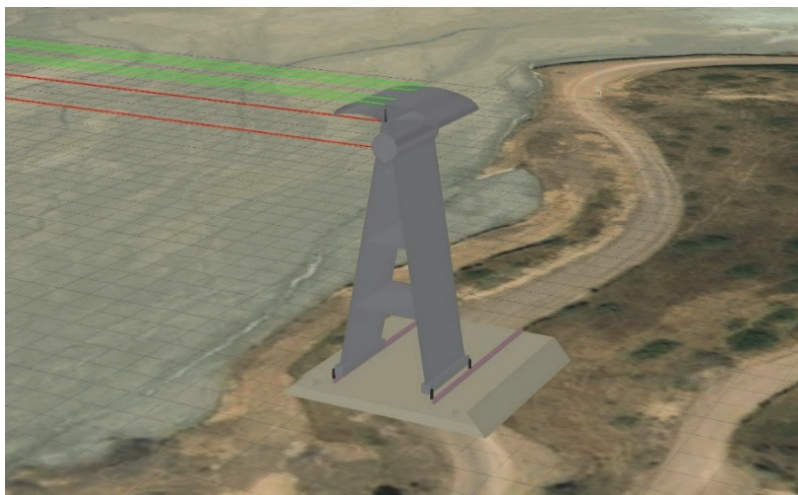
Նկ. 3. Գետային տիպի արշավաբարներից արչային նստվածքների հեռացման սարք

1 – պոչամբար, 2 – մետաղական աշտարակի հենասյուններ, 3 – մետաղական աշտարակ, 4 – սուզարկղ, 5 – ապարախիտության պոմպ, 6 – հորիզոնական տեղադրված ջրանետիչ կցափողեր, 7 – ուղղահայաց տեղադրված ջրանետիչ կցափողեր, 8 – աշխատանքային հարթակ, 9 – ձգիչ կարապիկներ, 10 – ձգիչ ճուպաններ, 11 – անիվներ, 12 – շարժական հենասյուններ, 13 – գլխավոր ճուպան, 14 – քարշափոխարման կարապիկ, 15 – շարժաբեք ճուպան, 16 – ճուպանների ձգման մեխանիզմ, 17 – հատուկ ամրաններ, 18 – տեխնիկական ջրի մատակարարման խողովակաշար, 19 – բարձր ճնշման ջրի ստացման կայանք, 20 – ապարախիտաի հեռացման խողովակաշար, 21 – ջրանետիչ, 22 – խորոսափոս, 23 – շարժական հենասյուն անիվ, 24 – ռելս, 25 – փայտակրճոր, 26 – մանր խիճ, 27 – խճաքար

Հետազոտության արդյունքները. Գետային տիպի պոչամբարներից պոչային նստվածքների հետաքննման հայտնի սարքի կիրառության արդյունավետության բարձրացման համար առաջարկվում է հայտնի սարքի կառուցվածքի կատարելագործման նոր տարբերակ, որի էությունը հետևյալն է:

Գետային տիպի կոնսերվացված պոչամբարի տարածքը իր աջ և ձախ ափերի ռելիեֆի բացարձակ նիշերի ուղղությամբ բաժանվում է առանձին մշակվող տեղամասերի՝ աշխատանքային հորիզոնների: Ինչպես երևում է նկ. 2-ից, Արծվանիկի պոչամբարի պայմանների համար պոչամբարի տարածքը իր աջ և ձախ ափերի ռելիեֆների բացարձակ նիշերի ուղղությամբ հնարավոր է բաժանել ձախ կողմից 3000...10000 մ, իսկ աջ կողմից՝ 3750...8870 մ տարածքների, որոնց թեքությունը հորիզոնի նկատմամբ տատանվում է, համապատասխանաբար, 0...13 և 0...10° սահմաններում:

Պոչամբարի սահմաններից դուրս այդ տարածքների ամբողջ երկարությամբ ռելիեֆի վրա անցկացվում են ռելսեր, որոնց շնորհիվ հնարավորություն է ստեղծվում՝ պոչամբարի առանձին տեղամասից կամ մի քանի տեղամասերից, պոչերի հետաքննման նպատակով, պոչամբարին հարող ռելիեֆի երկայնքով իրականացնելու հայտնի սարքի հենասյուների տեղափոխությունը (օրինակ, կարապիկներով): Տեղափոխությունը կատարելու համար պոչամբարի սահմաններից դուրս տրամագծորեն հակառակ ուղղություններով պոչամբարի մակերևույթին հարող ռելիեֆի վրա տեղադրված անշարժ հենասյուները (12) փոխարինվում են ռելսային ուղիների վրա տեղադրված շարժական հենասյուներով (նկ. 3-ի հանգույց «Ա»), ինչը ցույց է տրված նաև նկ. 4-ում:



Նկ. 4. Արծվանիկի պոչամբարի մշակվող տեղամասում ռելսային ուղու վրա տեղադրված շարժական հենասյուն

Հենասյուների (12) տեղափոխման ընթացքում հասնելով կոնսերվացված պոչամբարից պոչերի հեռացման ընտրված տեղամասին՝ հենասյուները երկկողմանի խուլ ամրացվում են, նրանց միջև անցկացվում են աշխատանքային ճոպանները, իսկ պոչամբարից պոչերի հեռացումը կատարվում է հայտնի եղանակով [1]: Հենասյուների շարժական անիվների ամրացման համար կարելի է կիրառել կալանդավոր արգելակներ, որոնք լայնորեն կիրառվում են կամրջակային և աշտարակային ամբարձիչներում [7]:

Եզրակացություն.

1. Պոչամբարների դատարկման հայտնի սարքերի ու դրանց իրագործման եղանակների վերլուծությունը ցույց է տվել, որ դրանց շահավետ կիրառությունը գետային տիպի պոչամբարների դատարկման համար հնարավոր է իրականացնել համեմատաբար փոքր չափեր և ոչ մեծ խորություն ունեցող պոչամբարների տարածքներից:

2. Առաջարկվող տեխնիկական լուծումը հնարավորություն է տալիս զգալի չափով նվազեցնել գետային տիպի պոչամբարների դատարկման ժամանակ կատարվող հիմնական և օժանդակ գործընթացների տևողությունը, ավելացնել սարքի արտադրողականությունը, նվազեցնելով աշխատանքների ինքնարժեքը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. Արտոնագիր №793Y, AM20220052Y, E21C 45/00, E02F 3/00: Գետային տիպի պոչամբարներից նստվածքների հեռացման սարք / **Լ. Մանուկյան, Կ. Հարությունյան, Տ. Մանուկյան, Ս. Գևորգյան;** ՀՀ մտավոր սեփականության գործակալություն.- Երևան, 2023.- էջ 14:
2. US Patent №28,945. Method and apparatus for excavating settled body of solids / **J.A. Miscovich, J.J. Gilbert.**- 1976.- 16 p.
3. Արտոնագիր №2502A, AM20090097, E21C 41/00, E02B 7/00: Գետային տիպի պոչամբարների դատարկման եղանակ / **Ս. Արզումանյան, Լ. Մանուկյան Ա. Մկրտումյան, Ա. Կալպակչյան, Գ. Ղազարյան, Է. Սարգսյան, Ա. Ղազարյան /**ՀՀ մտավոր սեփականության գործակալություն.- Երևան, 2011.- էջ 17:
4. Արտոնագիր №2396 A, AM20080237, ՄՄԴ (2009), E21C41/00, E02B7/00: Գետային տիպի պոչամբարներից պոչային նստվածքների հեռացման եղանակ / **Լ.Ա. Մանուկյան, Ս.Ս. Արզումանյան, Գ.Հ. Ղազարյան, Է. Սարգսյան, Ա. Ղազարյան;** ՀՀ մտավոր սեփականության գործակալություն.- Երևան, 2010.- էջ 8:
5. Արտոնագիր №2397 A, AM20080236, ՄՄԴ (2009), E21C41/00, E02B7/00, Գետային տիպի կոնսերվացված պոչամբարների դատարկման եղանակ / **Է. Սարգսյան, Լ. Մանուկյան, Ա. Արզումանյան, Գ. Ղազարյան, Ա. Ղազարյան;** ՀՀ մտավոր սեփականության գործակալություն.- Երևան, 2010.- 8 էջ:
6. Патент №SU 1782280 A3. Способ освобождения шламонакопителя от пиритных огарков /**А.В. Пылаев, В.Н. Баланди;** Государственное патентное ведомство СССР, 1992. - 4 с.

7. Жегульский В.П., Лукашук О.А. Проектирование, конструирование и расчет механизмов мостовых кранов.- Екатеринбург, 2016.-184 с.

¹«Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան, Լեռնամետալուրգիայի և քիմիական տեխնոլոգիաների ինստիտուտ», ²«Զանգեզուրի պղնձամոլիբդենային կոմբինատ» ՓԲԸ: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 03.12.2024:

Л.А. МАНУКЯН, К.В. АРУТЮНЯН

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА УДАЛЕНИЯ ХВОСТОВ ИЗ ЗАКОНСЕРВИРОВАННЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ РЕЧНОГО ТИПА

Проблемы дальнейшей переработки хвостов обогащения длительное время находятся в центре внимания специалистов отрасли. В условиях Республики Армения эти проблемы актуальны еще и потому, что они позволяют решать не только вопросы переработки и уменьшения объемов лежалых хвостов обогащения, но и проблему нехватки новых территорий для их складирования и хранения. В настоящее время известно множество технических решений и устройств для удаления хвостовых отложений из хвостохранилищ, однако они разработаны в условиях хвостохранилищ, расположенных на равнинах. Вопросы, связанные с опорожнением хвостохранилищ, также являются частью этой общей проблемы, для которых в настоящее время разработаны многочисленные устройства и способы их применения. Необходимо отметить, что эти решения на практике в условиях гористой местности не получили широкого применения из-за сложных рельефных условий размещения хвостохранилищ. Особенно серьезные проблемы возникли при выборе и разработке методов удаления хвостовых отложений из законсервированных хвостохранилищ речного типа ввиду их размещения в специфических и сложных рельефных условиях, большой протяженности в плане и глубины.

Ключевые слова: хвостовое отложение, хвостохранилище, устройство, метод опорожнения, опора, металлическая башня.

L.A. MANUKYAN, K.V. HARUTYUNYAN

IMPROVEMENT OF THE DEVICE FOR REMOVING TAILINGS FROM DECOMMISSIONED RIVER-TYPE TAILING DAMS

The issues of further processing of tailings have long been the focus of attention for specialists in the field. Under the conditions of the Republic of Armenia, these issues are especially relevant as they help solve not only the problems of processing and reducing the volumes of stale tailings but also the shortage of new areas for their storage. The issues related to the emptying of tailing dams are also part of this overall problem, for which numerous devices and methods of application have currently been developed. It should be noted that these solutions have not seen widespread practical use in mountainous areas due to the challenging terrain conditions for placing tailing dams. Particularly, serious problems arise when selecting and developing methods for removing tailings deposits from decommissioned river-type tailing dams, due to their location in specific and difficult terrain, as well as their large extent in area and depth.

Keywords. tailing deposits, tailing dam, device, emptying method, tower, metal caisson.

Ո.Ձ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Ն.ՅՈՒ. ԴԱՎԹՅԱՆ

ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ
ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՊԻՏԱՆԻՈՒԹՅԱՆ
ԱՐԱՏՈՐՈՇՄԱՆ ՏԵՄԱՆԿՑՈՒՆԻՑ

Հետազոտվել է կոնդենսացիոն տեղակայանքների աշխատանքը: Կատարվել է տարբեր մեթոդներով կոնդենսատորների հաշվարկների արդյունքների համադրական վերլուծություն:

Առանցքային բառեր. կոնդենսացիոն տեղակայանք, կոնդենսատորի խողովակափունջ, օդազուրկչային խառնուրդ, ջերմափոխանցման ինտենսիվություն, ջերմահաղորդականության գործակից, մաքրության աստիճան:

Ներածություն: Կոնդենսացիոն տեղակայանքների մոնիտորինգի և արատորոշման (դիագնոստիկայի) գործառույթների իրականացումն անհնար է՝ առանց դրանցում ընթացող պրոցեսների ֆիզիկա-քիմիական մոդելավորման:

Թվով տասը մեթոդների վերլուծության միջոցով ջերմափոխանցման գործակցի հաշվարկման արդյունքում ստացված մեծությունների և փորձնական տվյալների համադրումը, հաստատել է, որ կոնդենսատորների ինժեներական հաշվարկների դեպքում, գործնական նպատակների համար, բավարար ճշգրտությամբ կարող են երաշխավորվել նախկին Համամիութենական ջերմատեխնիկական ինստիտուտի, ԱՄՆ-ի ջերմափոխանցման ինստիտուտի, Գալուզայի տուրքինաշինական գործարանի, Ուրալի դաշնային համալսարանի կողմից մշակված մեթոդները: Դիտարկված մեթոդներից մի քանիսը (Համամիութենական ջերմատեխնիկական ինստիտուտ, «Մետրոպոլիտեն-Վիկկերս» և այլն) հիմնվում են ռեժիմային բնութագրերի վրա և հնարավորություն են տալիս՝ անմիջականորեն հաշվարկելու կոնդենսատորի ամբողջ մակերևույթի ջերմափոխանցման գործակցի միջին արժեքի մեծությունը: Մեթոդների մյուս խումբը (Գալուզայի տուրքինաշինական գործարան, Ուրալի դաշնային համալսարան) հիմնված է կոնդենսատորի գոլորշային և ջրային հատվածների ջերմափոխանցման գործակցի մեծության անջատ որոշման վրա և հնարավորություն է տալիս՝ հաշվի առնելու խողովակների ադոտոման, գոլորշում օդի պարունակության և մի շարք այլ գործոնների ազդեցությունը ջերմափոխանցման արդյունավետության վրա ինչպես նախագծային, այնպես էլ ռեժիմային տեսանկյուններից:

Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը: Կոնդենսացիոն տեղակայանքի հաշվարկի համար Համամիութենական ջերմատեխնիկական ինստիտուտի (ВТИ) մեթոդը [1] կիրառելու դեպքում կոնդենսատորում ջերմափոխանցման գործակցի մեծության որոշման համար անհրաժեշտ է օգտագործել հետևյալ արտահայտությունը՝

$$K = 4070 \cdot a \cdot \phi_w \cdot \phi_t \cdot \phi_z \cdot \phi_\delta, \quad (1)$$

որտեղ a -ն մաքրության գործակիցն է, որը հաշվի է առնում ջերմափոխանցման մակերևույթի խողովակների վիճակը և խողովակների մետաղի ջերմահաղորդականության ազդեցությունը (տեխնիկապես մաքուր, տեխնիկական շահագործման կանոններին համապատասխան կոնդենսացիոն տեղակայանքի համար այն ընդունվում է 0,65...0,85 միջակայքում), ϕ_w -ն գործակից է, որը հաշվի է առնում խողովակներում հոսող ջրի շարժման արագության ազդեցությունը, ϕ_t -ն գործակից է, որը հաշվի է առնում խողովակներում հոսող ջրի ջերմաստիճանի ազդեցությունը, ϕ_z -ը գործակից է, որը հաշվի է առնում կոնդենսատորում հովացնող ջրի քայլերի թիվը, ϕ_δ -ն գործակից է, որը հաշվի է առնում կոնդենսատորի տեսակարար շոգեֆեռնվածքի ազդեցությունը:

ԱՄՆ-ի ջերմափոխանցման ինստիտուտի (ИТО США) մշակած հաշվարկային մեթոդը [2] կիրառելիս, ВТИ մեթոդի նման, ջերմափոխանցման գործակցի որոշման համար ներառված β_w – գործակիցը նախագծման փուլում վերցվում է 0,75...0,85 միջակայքում և կախված է կոնդենսատորի խողովակային համակարգի մաքրության աստիճանից:

Ինչ վերաբերում է β_t գործակցին, ապա այն ջերմափոխանցման գործակցի հաշվարկման ժամանակ հաշվի է առնում կոնդենսատորի մուտքում հովացնող ջրի տարբեր ջերմաստիճանների ազդեցությունը: Խողովակների մետաղի և դրա հաստության ազդեցության գնահատումն իրականացվում է b_d – ուղղիչ գործակցի միջոցով:

Լենինգրադի (ներկայիս Սանկտ-Պետերբուրգ) մետաղաշինական գործարանի (ЛМЗ) հաշվարկային մեթոդը [2] հիմնվում է այն առնչությունների (կախվածությունների) վրա, որն առաջարկվել է «Մետրո-Վիկկերս»-ի կողմից: Հաշվարկի տվյալ մեթոդը հնարավորություն չի տալիս՝ հաշվի առնելու ջերմափոխանցման գործակցի վրա խողովակի տրամագծի, կոնդենսատորի տեսակարար շոգեֆեռնվածքի, ջերմափոխանցման մակերևույթի մաքրության աստիճանի և խողովակի պատի հաստության ազդեցությունները: Փորձարարական և հաշվարկային տվյալների զուգամիտությունը մի շարք կոնդենսացիոն տեղակայանքների դեպքում հաշվարկելիս (ЛМЗ-ի մեթոդով) դիտվում է աղտոտման գործակցի 0,7...0,8 թվային արժեքը ներմուծելիս:

Տուրբոմոտորային գործարանի (TM3)՝ Ուրալի տուրբինային գործարանում (YT3) մշակված մեթոդով [3] կոնդենսատորի հաշվարկման դեպքում կոնդենսացիոն տեղակայանքի ջերմափոխանցման գործակցի բազային նշանակությունը որոշվում է БТИ մեթոդին համաձայն, որից հետո դրան ավելացվում է աղտոտող շերտի (խողովակների ներքին մակերևույթ) ջերմային դիմադրությունը ($R_w = \frac{\delta_w}{\lambda_w}$): Խողովակների նյութի ջերմահաղորդականության հաշվի առնելն իրականացվում է, եթե այն տարբերվում է 168-ից: Դա կատարվում է խողովակի պատի ջերմային դիմադրության ներմուծմամբ՝ հանելով արույրե խողովակի

(1 մ/պատի հաստությամբ) ջերմային դիմադրությունը: TM3-YT3-ի շոգե-տուրբինների կոնդենսատորների ներսարքավորված խողովակափնջերի հաշվարկը հիմնվում է «Մետրո-Վիկկերս»-ի մեթոդի վրա, ընդ որում, ջերմափոխանցման մակերևույթի աղտոտվածության հաշվի առնելը կատարվում է հիմնական խողովակափնջի նման, կատարելով համապատասխան ուղղումներ օդահովացուցչի մակերևույթի համապատասխան չափաբաժնի չափով:

Կոնդենսացիոն տեղակայանքների վերը թվարկված բոլոր հաշվարկները տալիս են կոնդենսատորի ջերմափոխանցման ամբողջ մակերևույթի ջերմափոխանցման գործակցի մեծության միջին գնահատականը՝ ըստ ինտեգրալ ռեժիմների և կոնդենսատորի կոնստրուկտորական բնութագրերի ($W_{\partial 1}, t_{1,h\partial}, D_{\partial}, n_{\text{խող}}$): Այս մեթոդով հաշվարկի ընթացքում օդի ներծծումների և խողովակների աղտոտվածության ազդեցությունների տարանջատումը հնարավոր չէ:

Կալուգայի տուրբինաշինական գործարանի (KT3) մշակած մեթոդի համաձայն [2]՝ շոգու միջոցով ջերմատվության գործակցի որոշումն իրականացվում է՝ հաշվի առնելով օդի ներծծումները (օդագոլորշային խառնուրդ) կոնդենսատոր՝ ըստ հետևյալ արտահայտության.

$$\alpha_{\mu} = 0.56 \cdot \overline{\alpha}_2 \cdot \varepsilon^{-0.05}, \quad (2)$$

որտեղ $\overline{\alpha}_2$ -ն հորիզոնական խողովակափնջում մաքուր գոլորշու կոնդենսացման պրոցեսում ջերմատվության գործակցի միջին նշանակությունն է, ε -ն՝ գոլորշում օդի հարաբերական պարունակությունը (ըստ տեխնիկական շահագործման կանոնների հաշվարկի ժամանակ այն վերցվում է առավելագույնը):

Այս մեթոդով չի իրականացվում կոնդենսատորի մակերևույթի մաքրության աստիճանի բացահայտ տեսքով հաշվի առնելը:

Ուրալի պետական տեխնիկական համալսարանի (Ուրալի պոլիտեխնիկական ինստիտուտ) УГТУ-УПИ-ի կողմից առաջարկվող մեթոդը նման է KT3-ի մեթոդին: Այս դեպքում իրականացվում է կոնդենսացվող շոգուց խողովակի պատին ջերմատվության գործակցի α_2 (KT3-ի մեթոդում՝ α_{μ}) որոշում՝ ըստ հետևյալ արտահայտության.

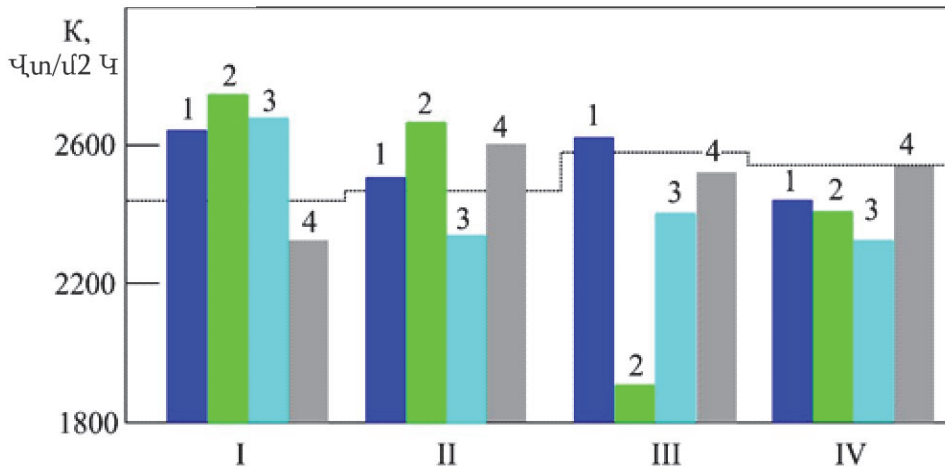
$$\alpha_2 = \alpha_{Nu} \cdot \phi_w \cdot \phi_{hly} \cdot \phi_{o\eta} \cdot \phi_f \cdot \phi_{ly}, \quad (3)$$

որտեղ α_{Nu} -ն ջերմատվության գործակիցն է ըստ Նուսելտի, ϕ_w -ն՝ շոգու արագությունը հաշվի առնող գործակիցը, ϕ_{hly} -ն՝ կոնդենսատի հոսքը հաշվի առնող գործակիցը, $\phi_{o\eta}$ -ն՝ գոլորշում օդի պարունակությունը հաշվի առնող գործակիցը, ϕ_f -ն՝ խողովակների վիբրացիայի պարամետրերը հաշվի առնող գործակիցը, ϕ_{ly} -ն՝ խողովակափնջի հարմարադասումը հաշվի առնող գործակիցը:

KT3-ի և YTY-YIII-ի մեթոդները հնարավորություն են տալիս՝ իրականացնելու կոնդենսատորի հաշվարկները տաքանջատ, գնահատելով կոնդենսատորում շոգու ճնշման վրա օդի ներծծումների ազդեցությունն առանձին և խողովակային համակարգի աղտոտվածության ազդեցությունն առանձին, քանզի այդ մեթոդները հնարավորություն են տալիս՝ առանձին որոշելու շոգու և ջրի ջերմատվության գործակիցները: Օդի ներծծումների և աղտոտվածության ազդեցությունը հաշվի առնելու համար անհրաժեշտ է ճշտորեն իմանալ խողովակների ներքին մակերևույթների վրա նստվածքագոյացումների ջերմային դիմադրությունը և դեպի կոնդենսացիոն տեղակայանք օդի ներծծումների մեծությունը: Շահագործման պայմաններում աշխատող կոնդենսատորի վրա այդ պարամետրերի անմիջական չափումների կազմակերպումը բավականաչափ դժվարին խնդիր է: Առկա են նաև բարդություններ կոնդենսացիոն տեղակայանքում ջերմափոխանցման պրոցեսի վերլուծության տեսանկյունից: Վերջինս կապված է այն բանի հետ, որ պրոցեսի պարամետրերի որևէ մեկի փոփոխությունը հանգեցնում է տեղային պարամետրերի և խողովակափնջում ջերմափոխանցման ինտենսիվության վերաբաշխմանը:

Կոնդենսացիոն տեղակայանքում ջերմափոխանցման պրոցեսի վրա ազդող տարբեր գործոնների խիստ հաշվառումը բարդացված է նաև կոնդենսատորի ծավալում արագության եռաչափ դաշտերի և օդագոլորշային խառնուրդի այլ պարամետրերի որոշմամբ և մաթեմատիկական նկարագրմամբ: Հաշվի առնելով վերոնշյալը, YTY-YIII-ի և KT3-ի մեթոդների կիրառմամբ կոնդենսացիոն տեղակայանքի ամբողջական արատորոշումը նույնպես բարդ խնդիր է:

Ստորև բերվում է վերոնշյալ տարբեր մեթոդներով կոնդենսատորների հաշվարկների (անվանական ռեժիմով աշխատելիս) և շահագործման պայմաններում արդյունաբերական փորձարկումների արդյունքների համադրական գրաֆիկական վերլուծությունը (նկ.1):



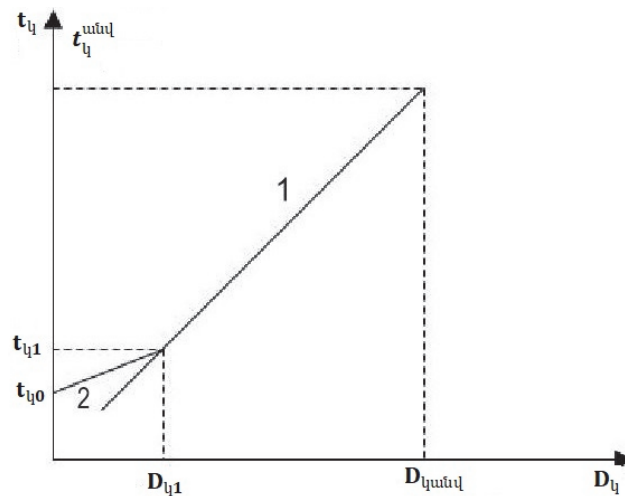
Նկ. 1. Կոնդենսատորների հաշվարկների և շահագործման պայմաններում արդյունաբերական փորձարկումների արդյունքների համադրական գրաֆիկական վերլուծությունը
1. BTH-ի մեթոդ ($a=0.8$), 2. ITO/CrSiA-ի մեթոդ ($\beta a \lambda = 0.6$), 3. KT3-ի մեթոդ (ε -ը վերցված է առավելագույն թույլատրելին), 4. YTTY-YPII-ի մեթոդ.

I. K-200-130 շոգետուրբինի կոնդենսատոր, II. K-500-240 շոգետուրբինի կոնդենսատոր, III. K-800-240 շոգետուրբինի կոնդենսատոր, IV. T-110/120-130 շոգետուրբինի կոնդենսատոր, փորձական տվյալներ

Վերը բերված նկարի հաշվարկային տվյալները հաշվարկվել են կոնդենսատորի անվանական ռեժիմով աշխատանքի դեպքում՝ $D_{\text{կ}} = D_{\text{կ}}^{\text{անվ}}$, $G_{\text{շ}} = G_{\text{շ}}^{\text{անվ}}$, $t_{1\text{հշ}} = 12^\circ\text{C}$: Ինչպես երևում է նկարից, փորձական տվյալների և տարբեր մեթոդներով հաշվարկված ջերմափոխանցման գործակցի տվյալների տարամիտումը կազմում է մոտավորապես 20 %: Այսպիսի շեղումը միանգամայն բավարար է: Այսինքն՝ վերը բերված մեթոդներով կարելի է բավարար ճշգրտությամբ իրականացնել տեխնիկայապես մաքուր կոնդենսատորի ջերմային հաշվարկը, երբ օդի ներծծումների ազդեցությունը էական չէ, օրինակ, դեպի կոնդենսատոր շոգու մեծ ծախսի պայմաններում:

[4] աշխատանքում ներկայացված մեթոդը, ի տարբերություն վերը թվարկածի, հնարավորություն է տալիս բավականին խստորեն հաշվի առնել կոնդենսատորում շոգու ճնշման վրա օդի ներծծումների ազդեցությունը՝ կոնդենսատորի ծավալում օդի պարգիալ ճնշման հաշվարկման միջոցով:

Ընդհանուր գծերով տվյալ մեթոդի սկզբունքային դրույթները հետևյալն են: Նշենք, որ մեթոդը հիմնվում է կոնդենսատորի և էժեկտորի համատեղ աշխատանքի բնութագրի վրա [2] (նկ. 2):



Նկ. 2. Կոնդենսատորի և էժեկտորի համատեղ բնութագիրը

Կոնդենսատորի և էժեկտորի համատեղ բնութագիրը կարելի է տրոհել 2 տեղամասի: 1-ին տեղամասը բնութագրում է կոնդենսացիոն տեղակայանքի աշխատանքը դեպի կոնդենսատոր շոգու մեծ ծախսի պայմաններում: $D_{կ}$ -ի փոփոխության այդ միջակայքում, օդի ներծծումների նորմատիվ մեծությունների պարագայում, էժեկտորը կոնդենսացիոն տեղակայանքի աշխատանքի արդյունավետության վրա ազդեցություն չի ունենում: 2-րդ տեղամասը ներկայացնում է կոնդենսատոր – էժեկտոր համակարգի համատեղ բնութագիրը: Այս տեղամասը բնութագրում է կոնդենսատորի աշխատանքը շոգու փոքր ծախսերի պայմաններում: Փոքր ծախսային ռեժիմներում օդի ներծծումները էական ազդեցություն են ունենում ջերմափոխանցման գործակցի վրա: Ուստի 1-ին տեղամասը կարող է հաշվարկվել վերը բերված մեթոդներից որևէ մեկով, իսկ 2-րդ տեղամասը՝ $[2, 4]$ – ում առաջարկված մեթոդով:

Եվ որպես ամփոփիչ եզրահանգում ուշագրավ մտորումների տեղիք կարող է տալ [5] -ում գրեթե մեկ տասնյակի հասնող արտասահմանյան մի շարք մեթոդների վերլուծության ներկայացումը՝ շոգետուրբինների կոնդենսատորների ջերմափոխանցման գործակցիների գնահատման միջոցով ստացված $P_{կ}$ -ների և դրանց փորձնական տվյալների համադրմամբ 100 $ՄՎտ$ -ից մինչև 800 $ՄՎտ$ հզորությամբ տուրբաազդեցատների կտրվածքով: Այդ առումով, որպես օրինակ, ստորև աղյուսակում բերվել է K-220-44 XTT3 տուրբատեղակայանքի կոնդենսատորի հաշվարկային և փորձարարական տվյալների համադրումը:

K-220-44 XTT3 տուրբատեղակայանքի կոնդենսատորի հաշվարկային և փորձարարական տվյալների համադրումը

Կոնդենսատոր տրվող շոգու ծախսը, տ/ժ	Հովացնող ջրի ծախսը, $մ^3/ժ$	Հովացնող ջրի ջերմաստիճանը կոնդենսատորի մուտքում, $^{\circ}C$	Շոգու ճնշումը, կՊա			
			Փորձ	Հաշվարկի արդյունքները ըստ մեթոդների		
				ВТИ	КТЗ	УГТУ-УПИ
144.5	15227	1.7	1.92	1.49	1.31	1.81
93.1	14595	2.1	1.83	1.41	1.10	1.70
264.1	17170	3.3	2.70	1.96	2.15	2.55
241.0	16895	3.5	2.57	1.89	2.02	2.42
336.4	18162	4.2	3.30	2.37	2.78	3.11
360.0	18275	5.0	3.59	2.61	3.12	3.39
176.5	16360	7.7	2.57	2.06	2.09	2.44
129.0	15945	8.3	2.38	1.94	1.84	2.26
221.1	17075	12.7	3.475	2.90	3.20	3.33

Եզրակացություն: Կոնդենսատորի բնութագրի հաշվարկի համար այս կամ այն մեթոդի ընտրությունը որոշվում է նախապատվությամբ և պատրաստող գործարանում ձևավորված գործնական հանգամանքներով: Կոնդենսատորների արտասահմանյան արտադրողները՝ թե եվրոպական և թե ամերիկյան, լայնորեն օգտագործում են ԱՄՆ Ջերմավիժանային ինստիտուտի (ՋՓԻ) հաշվարկային մեթոդը՝ երբեմն կատարելով որոշակի ուղղումներ: Օրինակ, ABB-ին լրացուցիչ հաշվի է առնում խողովակափնջի կոմպակտության գործոնը, որը ներկայացնում է մոդուլի ծայրամասային խողովակների թվի հարաբերությունը խողովակների լրիվ թվին: Որոշակի ստանդարտը տալիս է երաշխավորություններ և առնչություններ ջերմային և հիդրավլիկական հաշվարկների համար, ընդ որում, սահմանափակելով խողովակներում ջրի շարժման արագությունը $0,9$ մ/վ և նվազագույն թերտաքացումը՝ վերցնելով այն $2,8^{\circ}C$ ($5^{\circ}F$):

Կոնդենսատորների ջերմային և հիդրավլիկական հաշվարկների գոյություն ունեցող մեթոդները հիմնականում բավարար են էսքիզային նախագծման և շահագործման հսկողության նպատակների իրագործման համար: Մակայն կոնդենսատորներում ընթացող ֆիզիկական պրոցեսների խոր հետազոտման համար կիրառվում են ժամանակակից հաշվողական ծրագրային փաթեթների ու գործիքամիջոցների թվային մոդելավորման մեթոդները:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. РД 34.30.104. Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин ТЭС и АЭС. - М.: СПО “Союзтехэнерго”, 1982.- 106 с.
2. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных установок паровых турбин.- М.: Энергоатомиздат, 1985. - 240 с.
3. Хает С.И. Разработка и реализация элементов диагностического модуля для мониторинга состояния конденсационной установки паровой турбины: Дис. ... к.т.н.- Екатеринбург, 2004. – 147 с.
4. Шемпелев А.Г. Разработка и исследование некоторых способов повышения эффективности конденсационных устройств паровых турбин при малопаровых режимах работы: Автореф. дис. ... к.т.н.- Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1999. - 21с.
5. Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Конденсационные установки паровых турбин: Расчет энергетических характеристик: Учебное пособие.- Иваново, 2014.- 112с.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 16.10.2024:

В.З. МАРУХЯН, Н.Ю. ДАВТЯН

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИГОДНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Исследована работа конденсационных установок. Проведен анализ расчетов конденсаторов различными методами.

Ключевые слова: конденсационная установка, конденсаторный пучок труб, паровоздушная смесь, интенсивность теплоотдачи, коэффициент теплопроводности, степень чистоты.

V. Z. MARUKHYAN, N. YU. DAVTYAN

ANALYSIS OF THERMAL CALCULATION METHODS OF SURFACE CAPACITORS FROM THE PERSPECTIVE OF DETERMINING THE SUITABILITY OF CAPACITORS

The operation of condensing units has been studied. A comparative analysis of the results of calculations of capacitors using different methods was carried out.

Keywords: condensing unit, condenser tube bundle, steam-air mixture, heat transfer intensity, thermal conductivity coefficient, degree of purity.

Ա.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ռ.Հ. ԱՎՈՅԱՆ, Գ.Պ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ԴՅՈՒՐԱԿԻՐ ՋՐԱՇՆԱՅԻՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄԸ

Ջրածնային գեներատորների կիրառումը պայմանավորված է ածխաջրածնային վառելիքի պաշարների շեշտակի նվազմամբ, էներգիայի աճող պահանջարկով, ջերմոցային գազերի արտանետումների նվազեցման և էներգետիկ անվտանգության ապահովման խնդիրներով: Մյուս կողմից՝ դժվարագույն տեխնիկական խնդիր է այդ սարքերով գեներացված ջրածնի կուտակումը և տեղափոխումը՝ բարձր ճնշման տակ պահելու անհրաժեշտության և անվտանգության տեսակետից: Դա հաշվի առնելով՝ հեռանկարային են համարվում դյուրակիր ջրածնային գեներատորները՝ ցանկացած վայրում և անհրաժեշտ պահին օգտագործելու համար: Աշխատանքում մշակվել և փորձարկվել է հիմնային լուծույթում ալյումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի լաբորատոր նախանմուշ: Կատարվել են գործնական առաջարկներ գեներատորի արդյունավետ շահագործման համար:

Առանցքային բառեր. ջրածին, ջուր, ալյումին, գեներատոր, հիմնային լուծույթ:

Ներածություն: Ներկայումս ածխաջրածնային վառելիքի պաշարները (նավթ, գազ, քարածուխ, այրվող թերթաքարեր, տորֆ), ինտենսիվորեն կիրառվելու պատճառով, տարեցտարի նվազում են և մինչև 2050 թվականը կարող են գրեթե սպառվել: Արդյունահանվող ածխաջրածնի հիմնական մասը (ջուրջ 85%-ը) օգտագործվում է որպես վառելիք, այդ թվում՝ էլեկտրաէներգիայի արտադրման համար: Ընդ որում, ածխաջրածնի այրման ժամանակ մթնոլորտ է արտանետվում վնասաբեր գազերի հսկայական զանգված, այդ թվում՝ տարեկան ավելի քան 45 մլրդ *տոննա* CO₂ և մոտավորապես 68 մլն *տոննա* NO_x (2023թ.-ի տվյալներով): Ուստի ջրածնային էներգետիկայի զարգացումը դառնում է խիստ արդիական՝ հաշվի առնելով, որ ջրածնի պաշարները գործնականում անսահմանափակ են (1 չ ջրում առկա է 1.2 *մ³* ջրածին): Այն հրատապ է հատկապես սահմանափակ բնական պաշարներ և աղքատ հանածո վառելիք ունեցող այնպիսի երկրների համար, ինչպիսին Հայաստանի Հանրապետությունն է:

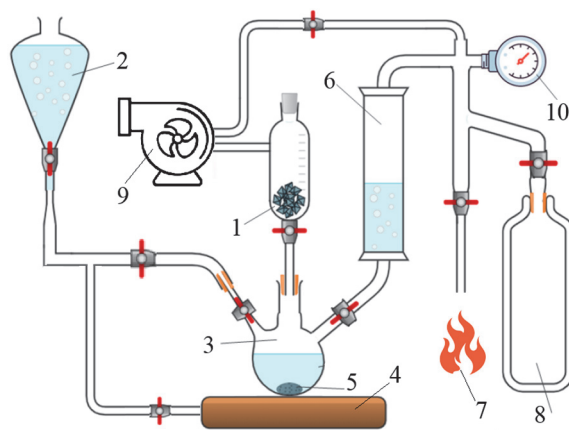
Ջրից ջրածնի կորզման դասական տեխնոլոգիան էլեկտրոլիզի եղանակն է, որը բավականին ծախսատար է և այսօրվա դրությամբ տնտեսապես արդարացված չէ (1 *մ³* ջրածնի ստացումը պահանջում է մոտավորապես 5 *կՎտ.ժ* էլեկտրաէներգիայի ծախս) [1]: Առավել հեռանկարային է ջրի մոլեկուլների էկզոթերմային

տրոհումը ջրածնի և թթվածնի՝ տարբեր մետաղական խթանիչների (կատալիզատորների) կիրառմամբ [2, 3]: Լայնորեն կիրառվող և մատչելի մետաղական խթանիչներից են արծաթը, մագնեզիումը, ալյումինը և լիթիումը, որոնցից առավել գործնական և տնտեսապես շահավետ է ալյումինը [4–6]: Այն հեշտությամբ մշակվում է, ունի էներգիայի բարձր խտություն և համալիր հետազոտված է: Ալյումինի և ջրի փոխազդեցությունից առաջանում է 3 մոլ ջրածին յուրաքանչյուր 2 մոլ ալյումինի դիմաց, ընդ որում, սենյակային ջերմաստիճանի և մթնոլորտային ճնշման պայմաններում:

Սակայն ջրածնի կիրառումը որպես էներգակիր ուղեկցվում է մի շարք թերություններով՝ պայմանավորված դրա պահպանման, տեղափոխման և բաշխման տեխնիկական ու տնտեսական դժվարություններով, ջրածին-օդ խառնուրդի պայթյունավտանգավորությամբ, ջրածնային վառելիքային տարրերի բարձր արժեքով: Այդ իսկ պատճառով կարևորվում է դյուրակիր ջրածնային գեներատորի մշակումը՝ դրանով իրականացնելով ջրածնի գեներացումը սենյակային պայմաններում, ցանկացած վայրում և անհրաժեշտ պահին:

Աշխատանքում մշակվել և փորձարկվել է ալյումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի լաբորատոր նախամուշ:

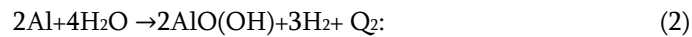
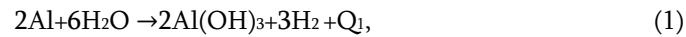
Գեներատորի կառուցվածքը և աշխատանքի սկզբունքը: Մշակված գեներատորի կառուցվածքի սխեմատիկական պատկերը և ընդհանուր տեսքը բերված են նկ. 1-ում:



Նկ. 1. Դյուրակիր ջրածնային գեներատորի կառուցվածքի սխեմատիկական պատկերը (ձախ նկար) և ընդհանուր տեսքը (աջ նկար)

Բերված սխեմայում 1 ալյումինե ջարդոնը՝ մանր տաշեղների և կտորների տեսքով, և 2 ջուրը՝ որոշակի ծավալով և արագությամբ, ներբեռնվում են 3 ռեակցի-

ոն խցիկ, որտեղ տեղի են ունենում ջրածնի գեներացմամբ հետևյալ քիմիական ռեակցիաները.



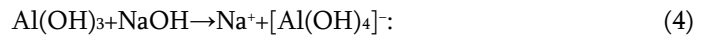
Այս ռեակցիաներն էկզոթերմային են և ուղեկցվում են $Q = 840...880$ կՋ ջերմության անջատմամբ: Ուստի շրջանառվող ռեժիմում 4 ջրի հոսքով իրականացվում է ռեակցիոն խցիկի հովացում: Ռեակցիաների 5 արգասիք $\text{AlO}(\text{OH})$ -ը կուտակվում է խցիկի ստորին հատվածում՝ հետագայում այնտեղից հեռացման և վերամշակման տեխնիկական հնարավորությամբ: Անջատված ջրածինը մաքրվում է՝ անցնելով 6 ջրային ֆիլտրով, իսկ այնուհետև կամ տրվում է անմիջականորեն 7 սպառիչ սարքին, օրինակ, գազավառարանին, կամ էլ կուտակվում է 8 գլանանոթում: Ջրածնի հոսքը փչահարվում է 9 պոմպով և հսկվում է 10 մանոմետրով:

Գեներատորի արդյունավետ աշխատանքի հիմնական խոչընդոտն այլումինե խթանիչի մակերևույթին կայուն բնական օքսիդի թաղանթի (Al_2O_3) առկայությունն է: Այն արգելակում է այլումին-ջուր ռեակցիայի ընթացքը՝ սահմանափակելով ջրի տրոհման արագությունը: Այդ թաղանթի հեռացման համար կիրառվում են, այսպես կոչված, ակտիվացման մեթոդներ, մասնավորապես՝ այլումինե ջարդոնի մեխանիկական փոշիացմամբ և ցածր հալման ջերմաստիճանով ակտիվացնող տարրերի ներմուծմամբ [7-9]: Մանրացման տեխնոլոգիան ծախսատար և էներգատար գործընթաց է, իսկ այլումինի փոշին՝ նաև պայթյունավտանգ: Որպես ակտիվացնող տարրեր կիրառվում են հեղուկ մետաղներ (օրինակ՝ գալիում, ինդիում, անագ և ցինկ), որոնց ներմուծումը մետաղական խթանիչներում իրականացվում է ներհալման կամ մեխանաքիմիական խառնման եղանակներով: Հաճախ ակտիվացնող տարրերը լեգիրացվում են մագնեզիումի կամ սիլիցիումի նանոմասնիկներով [10, 11]: Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ թանկարժեք ակտիվացնող տարրերի պարունակությունը պետք է կազմի այլումինե խթանիչի ծավալի ոչ պակաս, քան 20%-ը [9]: Դա հանգեցնում է գեներացված ջրածնի ինքնարժեքի կտրուկ մեծացմանը:

Այլումինի օքսիդի թաղանթի քայքայման համար առավել գերադասելի է քիմիական այնպիսի հավելումների օգտագործումը, ինչպիսիք են նատրիումի հիդրօքսիդը (NaOH) կամ կալիումի հիդրօքսիդը (KOH) [12, 13]: Մեր կողմից որպես այդպիսին կիրառվել է NaOH -ը, որի առկայությամբ օքսիդը խաճատվում է հետևյալ ռեակցիայի միջոցով.



Այս ռեակցիայի արդյունքում, առանց օքսիդի պաշտպանիչ թաղանթի, ալյումինը փոխազդում է ջրի հետ՝ համաձայն (1) և (2) քիմիական ռեակցիաների՝ վերականգնելով ջրածինը: Անհրաժեշտ է նշել, որ այս փուլում առաջացած ալյումինի հիդրօքսիդը նույնպես փոխազդում է NaOH-ի հիդրօքսիդի հետ.

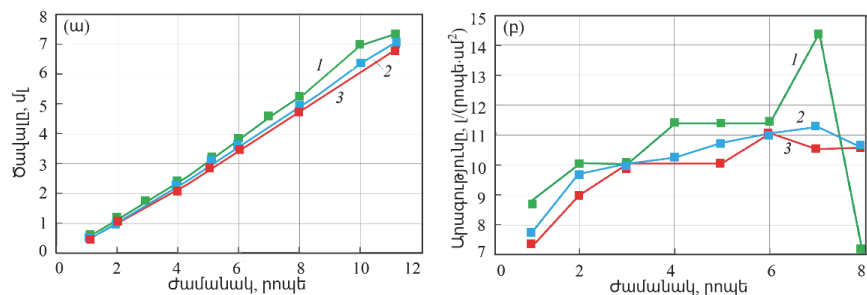


Գեներատորի փորձարկումը: Այն փորձարկվել է Բարվա ինովացիոն կենտրոնի արտադրական տեղամասում՝ հետազոտելով ժամանակի ընթացքում (t) ջրածնի գեներացման արագությունը (r) և ծավալը (V)՝ կախված ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսից (S) և NaOH-ի հիմնային լուծույթի խտությունից (C): Վերականգնված ջրածնի ծավալը գնահատվել է թիթեղիկի $S = 1 \text{ սմ}^2$ մակերեսի դեպքում, իսկ գեներացման արագությունը հաշվարկվել է հետևյալ բանաձևով.

$$r = \Delta V / (\Delta t S),$$

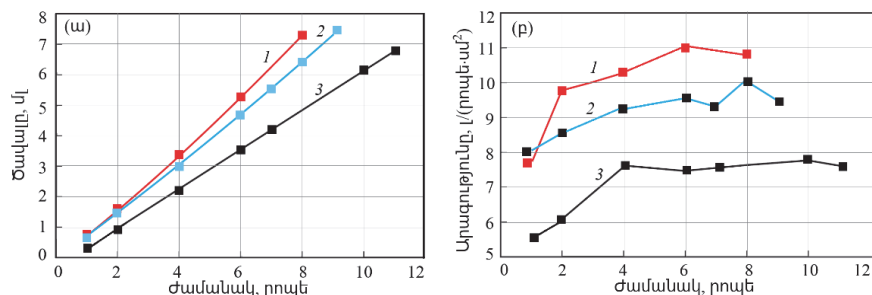
որտեղ ΔV -ն չափումների միջև գեներացված ջրածնի ծավալների տարբերությունն է, Δt -ն՝ չափումների միջև եղած տևողությունը:

Հետազոտության արդյունքները բերված են նկ. 2 և 3-ում:



Նկ. 2. Գեներացված ջրածնի ծավալի (ա) և գեներացման արագության (բ) ժամանակային կախվածությունները թիթեղիկի մակերևույթի տարբեր մակերեսների դեպքում.

$1-S = 15 \text{ սմ}^2$, $2-S = 10 \text{ սմ}^2$, $3-S = 5 \text{ սմ}^2$



Նկ. 3. Գեներացված ջրածնի ծավալի (ա) և գեներացման արագության (բ) ժամանակային կախվածությունները հիմնային լուծույթի տարբեր խտությունների դեպքում.

$1-C = 5 \text{ U}$, $2-C = 10 \text{ U}$, $3-C = 3 \text{ U}$

Հետազոտության արդյունքների վերլուծության հիման վրա կարելի է անել հետևյալ գործնական նշանակությամբ եզրահանգումները.

- Գեներացվող ջրածնի ծավալը կախված չէ ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսից (նկ. 2,ա): Դա նշանակում է, որ մետաղական խթանիչը նույն խտությամբ հիմնային լուծույթում ամբողջովին կքայքայվի մոտավորապես նույն ժամանակահատվածում:

- Ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսի մեծացումը հանգեցնում է ջրածնի գեներացման արագություն մեծացմանը (նկ. 2,բ):

- Ջրածնի գեներացման առավելագույն ծավալ (նկ. 3,ա) և/կամ արագություն (նկ. 3,բ) ապահովվում է NaOH-ի հիմնային լուծույթի 5 Մ խտության դեպքում:

- Ջրածնի գեներացման որոշակի արագություն ապահովելու համար անհրաժեշտ է փոփոխել ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսը (նկ. 2) և/կամ NaOH-ի հիմնային լուծույթի խտությունը (նկ. 3):

Մշակված դյուրակիր ջրածնային գեներատորը կունենա կայուն պահանջարկ ջերմոցային փոքր տնտեսությունների, հյուրանոցների, զորամասերի, առանձնատների և դպրոցների անհատական ջեռուցման համար: Նպատակահարմար է նաև ջրածնային վառելիքային տարրերի հետ համատեղ կիրառումը: Դրանք կարող են փոխարինել կամ լրացնել թե՛ շարժիչների և թե՛ փոքր էլեկտրակայանների աշխատանքը՝ հանդես գալով որպես էլեկտրաէներգիայի աղբյուր՝ դյուրակիր սարքավորումների (օրինակ՝ բջջային հեռախոսներ, տեսախցիկներ), էլեկտրամոբիլների, բնակելի ու արտադրական շենքերի համար: Հեռանկարային է նաև ջրածնային գեներատոր-ջրածնային վառելիքային տարր համակարգի հիբրիդային կիրառումը ֆոտովոլտային (արևային) մոդուլների հետ՝ բացառելով թանկարժեք էներգիայի կուտակիչների (մարտկոցների) օգտագործումը: Այս դեպքում համակարգը կգործարկվի և կգեներացնի ջրածին և էլեկտրաէներգիա արևի ցածր ակտիվության ժամանակ (գիշերը և ամպամած եղանակին), երբ ֆոտովոլտային մոդուլները չեն շահագործվում: Hybrid Optimization Modeling Software (HOMER, ԱՄՆ) ծրագրով [14] նախնական գնահատումները ցույց են տալիս, որ կախված համակարգի և ֆոտովոլտային մոդուլների դրվածքային հզորություններից՝ էլեկտրաէներգիայի «գուտ բերված արժեքը» (NPV, Net Present Value) և ինքնարժեքը նվազում են 13...21 %-ով:

Եզրակացություն: Մշակվել է ջրածնային գեներատոր, որն ալյումինե խթանիչի կիրառմամբ և հիմնային նոսր լուծույթում օքսիդացման-վերականգնման ռեակցիաների արդյունքում գեներացնում է պահանջվող ծավալով ջրածին՝ որպես զազ կամ հեղուկ բարձր ճնշման տակ առանց ծախսերի և անվտանգության հետ կապված խնդիրների այն պահելու համար: Իրականացվել են ժամանակի ընթացքում ջրածնի գեներացման արագության և ծավալի հետազոտություններ՝ հաշվի առնելով ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսը և հիմնային լուծույթի խտությունը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **El-Emam R.S., Ozcan H.** Comprehensive Review on the Technoeconomics of Sustainable Large-scale Clean Hydrogen Production // *J. Clean. Prod.* - 2019. - V. 220. - P. 593-609.
2. **Zhu B., Zou R., Xu Q.** Metal–Organic Framework Based Catalysts for Hydrogen Evolution // *Adv. Energy Mater.* - 2018. - V. 8(24). - P. 1801193-1801199.
3. **Huang M., Ouyang L., Zhu M.** Hydrogen Production via Hydrolysis of Mg-Oxide Composites // *Int. J. Hydrogen Energy.* - 2017. - V. 42(35). - P. 22305–22311.
4. **Buryakovskaya O.A., Maslakov K.I., Borshchev N.O., Ambaryan G.N.** Silver-Assisted Hydrogen Evolution from Aluminum Oxidation in Saline Media // *Molecules.* - 2024. - V. 29(2). - P. 530-541.
5. **Wang W., Chen W., Zhao X.M.** Effect of Composition on the Reactivity of Al-Rich Alloys with Water // *Int. J. Hydrogen Energy.* - 2012. - V. 37(24). - P. 18672–18678.
6. **Ilyukhina A.V., Kravchenko O.V.** Studies on Microstructure of Activated Aluminum and Its Hydrogen Generation Properties in Aluminum/Water Reaction // *J. Alloys Compd.* - 2017. - V. 690. - P. 321–329.
7. **Parmuzina A.V., Kravchenko O.V.** Activation of Aluminium Metal to Evolve Hydrogen from Water // *Int. J. Hydrogen Energy.* - 2008. - V. 33(12). - P. 3073–3076.
8. **Nizovskii A.I., Kulikov A.V., Trenikhin M.V.** Material for Compact Hydrogen Cartridges Based on Commercial Aluminium Alloys Activated by Ga-In Eutectics // *Catal. Sustain. Energy.* - 2017. - V. 4. - P. 62–69.
9. **Xu S., Zhao X., Liu J.** Liquid Metal Activated Aluminum-Water Reaction for Direct Hydrogen Generation at Room Temperature // *Renew. Sustain. Energy Rev.* - 2018. - V. 92. - P. 17-37.
10. **Meroueh L., Eagar T.W., Hart D.P.** Effects of Mg and Si Doping on Hydrogen Generation via Reduction of Aluminum Alloys in Water // *ACS Appl. Energy Mater.* - 2020. - V. 3. - P. 1860–1868.
11. **Ayvazyan G., Vaseashta A., Gasparyan F., Khudaverdyan S.** Effect of Thermal Annealing on the Structural and Optical Properties of Black Silicon // *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* - 2022. - V. 33. - P. 17001–17010.
12. **Mezulis A., Richter C., Lesnichenoks P., Knoks A.** Studies on Water–Aluminum Scrap Reaction Kinetics in Two Steps and the Efficiency of Green Hydrogen Production // *Energies.* - 2023. - V. 16(14). - P. 5554–5566.
13. **Porciúncula C.B., Marcilio N.R., Tessaro I.C., Gerchmann M.** Production of Hydrogen in the Reaction Between Aluminum and Water in the Presence of NaOH and KOH // *Braz. J. Chem. Eng.* - 2012. - V. 29. - P. 337–348.
14. **Костик Н.Р., Тарасов С.А., Айвазян Г.Е.** Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энерго-снабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света // *Изв. высших учеб. зав. России. Радиоэл.* - 2023. - V. 26(4). - С. 106-122.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 06.02.2025:

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

**РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ПОРТАТИВНОГО ВОДОРОДНОГО
ГЕНЕРАТОРА**

Использование водородных генераторов обусловлено значительным сокращением запасов углеводородного топлива, растущим спросом на энергию, необходимостью сокращения выбросов парниковых газов и обеспечением энергетической безопасности. В то же время одной из наиболее сложных технических задач является накопление и транспортировка водорода, генерируемого этими устройствами, учитывая необходимость хранения под высоким давлением и вопросы безопасности. Исходя из этого, перспективным решением являются портативные водородные генераторы, которые можно использовать в любом месте и в нужный момент. В представленной работе разработан и испытан лабораторный прототип портативного водородного генератора, работающего на алюминиевом катализаторе в щелочном растворе. Даны практические рекомендации по эффективной эксплуатации генератора.

Ключевые слова: водород, вода, алюминий, генератор, щелочной раствор.

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

DEVELOPMENT AND TESTING OF A PORTABLE HYDROGEN GENERATOR

The use of hydrogen generators is driven by the significant reduction in hydrocarbon fuel reserves, the growing demand for energy, the need to reduce the greenhouse gas emissions, and ensuring energy security. At the same time, one of the most challenging technical issues is the storage and transportation of hydrogen generated by these devices, given the requirement for high-pressure storage and safety considerations. Based on this, portable hydrogen generators, which can be used anywhere and at any time, present a promising solution. This study developed and tested a laboratory prototype of a portable hydrogen generator operating on an aluminum catalyst in an alkaline solution. Practical recommendations are provided for the efficient operation of the generator.

Keywords: hydrogen, water, aluminum, generator, alkaline solution.

R.H. AVOYAN

**DEVELOPMENT OF AN OFF-GRID SOLAR POWER PLANT
INTEGRATED WITH A HYDROGEN STORAGE SYSTEM**

An off-grid photovoltaic power plant with integrated hydrogen storage is developed to ensure reliable and sustainable electricity in remote areas. A novel energy management algorithm optimally balances power distribution between Li-ion batteries and hydrogen storage, adapting to real-time conditions and both short- and long-term energy needs.

Keywords: photovoltaic power plant, hydrogen, storage system, Li-ion battery, fuel cell, electrolyzer, energy management.

Introduction. Energy is a cornerstone of socio-economic development, playing a pivotal role in enhancing productivity and fostering economic growth. This is especially critical in the context of the global shift toward clean energy sources. The production of economically efficient and environmentally sustainable electricity is fundamental to achieving long-term societal progress. However, despite significant advancements, energy access remains a pressing global challenge.

According to the International Energy Agency and the World Bank, approximately 675-680 million people worldwide lacked access to electricity in 2023. Furthermore, around 2.3 billion people, primarily in sub-Saharan Africa and Asia, still rely on traditional fuels such as wood, kerosene, and diesel for cooking [1, 2]. The World Health Organization estimates that exposure to the combustion products of these fuels results in approximately 3.2 million premature deaths annually. Without additional interventions, projections suggest that by 2030, 1.9 billion people will remain without access to clean cooking solutions, and 660 million will still lack electricity [3].

The challenge of energy access is particularly acute in rural and remote areas, where infrastructure development is complex and costly, and connection to centralized energy systems is often economically unviable [4]. In such contexts, solar energy emerges as a promising solution for off-grid power supply, especially in regions where extending traditional energy networks is impractical. However, the intermittent nature of solar energy—due to variations in solar radiation, reduced photovoltaic (PV) output on cloudy days, and no generation at night—necessitates the integration of reliable energy storage systems to address these fluctuations.

Battery storage systems, particularly lithium-ion (Li-ion) batteries, are currently the most widely used solution for short-term energy storage. While

effective for daily cycles, their self-discharge makes them less suitable for long-term or seasonal energy storage [5]. This limitation underscores the need for alternative storage solutions capable of addressing both short-term and long-term energy imbalances.

Hydrogen has emerged as a promising candidate to enhance the flexibility and resilience of energy systems. Its unique properties enable the efficient storage of surplus energy over extended periods, from daily to seasonal scales, and facilitate its integration across multiple sectors, including industry, transportation, and residential applications. By leveraging hydrogen as an energy carrier, it is possible to address the challenges posed by the variability of renewable energy sources and ensure a stable and reliable energy supply.

The objective of this work is to design and develop an off-grid PV power plant integrated with a hydrogen storage system (H_2 – SS) for remote residential applications. A key focus is the development of an efficient energy management algorithm and mechanism to optimize energy production, storage, and consumption. This system aims to ensure stable and reliable operation under conditions of fluctuating energy generation and load, thereby contributing to the broader goal of sustainable energy access for all. For Armenia, the development of off-grid renewable energy systems, such as solar power plants integrated with hydrogen storage, is particularly relevant due to the country's mountainous terrain and the presence of remote communities with limited access to centralized energy infrastructure.

The system structure and operating principle. Fig. 1 presents a schematic diagram of the developed off-grid PV power plant with an H_2 – SS. The primary source of electricity in the system is the PV array (1), which generates direct current (DC). This DC power is converted by the hybrid inverter (HI) (2) into alternating current (AC) to supply residential loads (RL) (4). When electricity generation exceeds instantaneous demand, the surplus energy is initially stored in a Li-ion battery pack (5). This approach enables the rapid compensation of transient power deficits, such as those occurring during evening hours or sudden load fluctuations, ensuring a dynamic balance between energy supply and demand. Once the Li-ion battery pack reaches its maximum state of charge (SoC_{bat}), any additional surplus power is used to operate the electrolyzer (7). While electrolyzers inherently operate on DC, commercial models often include built-in AC/DC rectifiers to accommodate conventional AC power sources. Considering this, the electrolyzer is supplied with AC power via the inner electrical panel (IEP) (6), which is connected to the HI. The water required for the electrolysis process is drawn from a dedicated water tank (8).

For this study, a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer was selected due to its high energy efficiency of 80–90% [6]. However, PEM electrolyzers require high-purity water to prevent the membrane degradation. To

ensure the necessary water quality, most PEM electrolyzers incorporate built-in filtration and purification mechanisms.

Within the PEM electrolyzer, water is split into hydrogen and oxygen through electrolysis. The generated oxygen is safely vented from the system, as it has no immediate application in off-grid hydrogen-based power systems, and its storage involves complex and costly infrastructure. The hydrogen output pressure from a residential PEM electrolyzer typically ranges between 1 and 30 *bar* [7]. For long-term storage, hydrogen undergoes additional compression to reduce storage volume and enhance its usability.

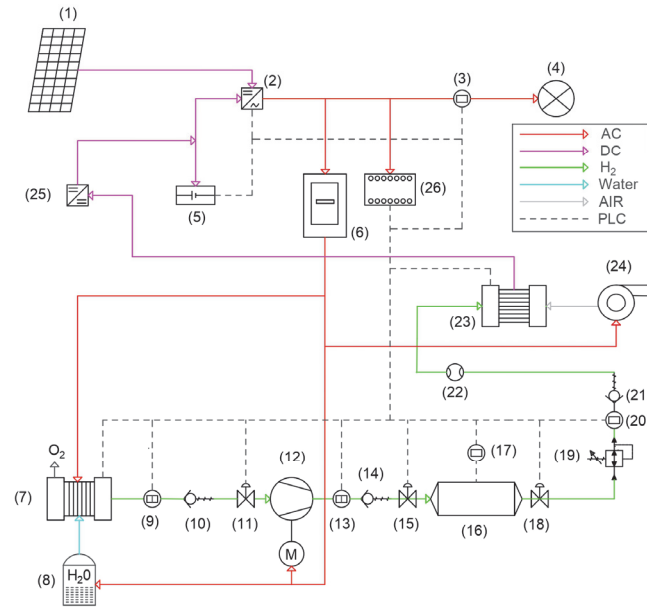


Fig. 1. A schematic diagram of an off-grid PV power plant with an H_2 - SS

The compression process is carried out by a hydrogen compressor (12), which is electrically powered via the IEP. Pressure transducers (PT) (9) and (13) continuously monitor the hydrogen pressure at the compressor's inlet and outlet, optimizing the compression process and preventing equipment overload. Check valves (CV) serve as essential safety components by preventing undesired backflow. Specifically, CV (10) blocks hydrogen recirculation into the electrolyzer, while CV (14) prevents backflow into the compressor.

The compressed hydrogen is then stored in a dedicated hydrogen storage unit (SU) (16), where PT (17) continuously monitors hydrogen pressure levels (PL_{H_2}) to ensure compliance with safety limits and prevent overpressure hazards. In case of prolonged insufficient renewable power supply, hydrogen is extracted from the SU

and regulated by a pressure regulator (19) to achieve the optimal operating pressure required for the fuel cell (FC) (23). A mass flow meter (22) precisely controls the hydrogen flow, ensuring accurate measurement regardless of pressure and temperature variations. Additionally, PT (20) monitors the hydrogen inlet pressure to the FC, while CV (21) prevents uncontrolled backflow into the SU, eliminating unwanted gas recirculation.

To support the electrochemical reaction in the FC, oxygen is supplied via an air inlet (24), which is electrically powered via the IEP. This system captures ambient air and directs it to an integrated oxygen separation unit within the FC, extracting the necessary oxygen concentration for optimal fuel cell performance and efficiency.

The DC electricity generated by the FC is conditioned by a DC/DC converter (25) before being integrated into the power system. Finally, the HI converts the DC output into AC, making it compatible with the RL.

The developed power plant incorporates two energy storage systems: Li-ion batteries and a hydrogen storage system. Hydrogen, with its high energy density, is particularly suitable for long-term energy storage. However, the startup time of the FC is highly temperature-dependent. Hydrogen FCs, in particular, require several seconds or even minutes to reach full power output [8, 9]. This variability poses challenges in responding to sudden peak loads. In contrast, Li-ion batteries have rapid response times, typically within milliseconds to a few seconds, allowing them to efficiently manage sudden power surges and daily energy fluctuations.

Development of energy management system. To ensure effective energy management (EM) and optimize the performance of the PV power plant with H₂ – SS, a well-designed control strategy is essential. This strategy must provide a stable power supply that meets demand while efficiently utilizing energy storage resources. Additionally, it should prevent unnecessary oversizing of components and minimize redundant equipment installation, thereby enhancing system cost-effectiveness and sustainability.

The control process is managed by a programmable logic controller (PLC) (26), which collects, processes, and analyzes real-time data from all system components. The PLC enables automatic regulation of equipment operation, continuously monitors critical parameters, and executes predefined actions to maintain optimal performance of the PV power plant with H₂ – SS.

The HI monitors the power output of the PV array (E_{PV}), the SoC_{bat}, as well as its charging and discharging power and energy (E_{bat}). Additionally, it tracks the power generated by the FC (E_{FC}). The smart meter (SM) (3) continuously monitors

and records the energy consumption of the RL (E_{load}), providing real-time data for analysis and optimization.

Both the HI and SM communicate with the PLC via the Modbus RTU (RS-485) protocol. All system variables are stored in registers with specific numerical addresses. The PLC retrieves these values by reading the corresponding register numbers and positions. Based on this framework, a novel EM algorithm was developed, as shown in Fig. 2.

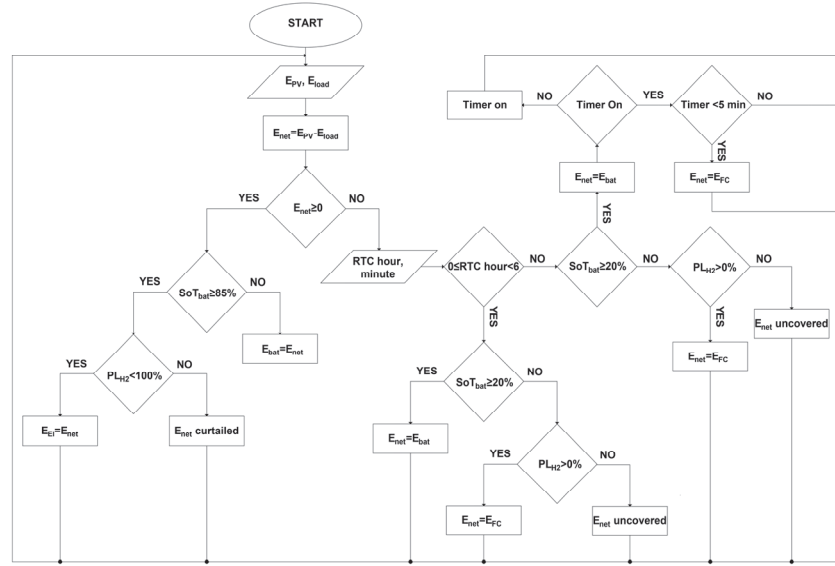


Fig. 2. EM algorithm for off-grid PV power plant with a H_2 - SS

First, the PLC monitors the current energy consumption E_{load} and the PV power generation E_{pv} . It then calculates whether there is an energy deficit or surplus. The PLC continuously tracks the SoC_{bat} and activates the electrolyzer (E_{el}) when SoC_{bat} reaches or exceeds 85% and surplus power is available ($E_{net} > 0$ W). This condition indicates that the Li-ion battery pack is in the charging phase, yet there is still excess energy that can be stored. The electrolyzer ceases operation under any of the following conditions: a) SoC_{bat} drops below 85%, b) the battery discharge power surpasses the power generated by the PV panels while the residential energy demand exceeds the available supply ($E_{net} < 0$), or c) the inlet pressure PL_{H_2} of the ST reaches 100%, which indicates that ST is fully stored. The PLC interacts with the electrolyzer via the MODBUS TCP protocol.

When $E_{net} < 0$, the PLC utilizes the real-time clock (RTC) to record the time and determine whether the load is operating in a night standby mode. The FC operates E_{fc} in coordination with the Li-ion battery for efficiency and reliability.

At night, if the SoC_{bat} drops by 20% due to standby loads, the FC activates to cover the load preventing deep discharge. During the day, if the battery discharges continuously for more than 5 *min*, the FC starts operating. This delay allows the FC to warm up and distinguishes sustained loads from short-term peaks. For sudden peaks, the Li-ion battery responds immediately. If the demand lasts less than 5 *min*, the battery covers it. If it persists, the FC takes over to prevent excessive battery drain. The PLC communicates with the FC via the MODBUS TCP protocol.

During the entire operation of the hydrogen supply chain, the PLC opens and closes electro valves (11), (15) and (18) based on the PL_{H_2} level of the ST.

Through these automated processes, the PLC ensures seamless integration between renewable energy generation, storage, and consumption, optimizing the overall performance of the energy management system.

Conclusion. The developed off-grid PV power plant with an H_2 – SS offers a robust and sustainable solution for remote energy applications. By integrating Li-ion batteries for short-term fluctuations and hydrogen storage for long-term stability, the system efficiently manages energy resources. A dedicated PLC-based energy management algorithm optimally coordinates the PV array, battery pack, electrolyzer, hydrogen storage unit and fuel cell, ensuring safe operation and maximizing surplus renewable energy utilization. This approach effectively mitigates solar power intermittency challenges, enhancing system reliability.

REFERENCES

1. **International Energy Agency. (2023).** Energy Access Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/energy-access-outlook-2023>
2. **World Bank. (2023).** Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2023. <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/brief/sdg7-tracking>
3. **World Health Organization. (2018).** Household air pollution and health. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
4. **Omole F.O., Olajiga O.K., Olatunde T.M.** Challenges and successes in rural electrification: A review of global policies and case studies // Eng. Sci. Technol. J. - 2024. - V. 5(3). - P. 1031–1046.
5. **Kummer K., Imre A.R.** Seasonal and Multi-Seasonal Energy Storage by Power-to-MethaneTechnology // Energies.-2021.-14(11).-P.3265.
6. **Kumar S., Himabindu V.** Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review // Mater. Sci. Energy Technol. - 2019. - V. 2. - P. 442–454.
7. **Araújo H.F., Gómez J.A., Santos D.M.F.** Proton-Exchange Membrane Electrolysis for Green Hydrogen Production: Fundamentals, Cost Breakdown, and Strategies to Minimize Platinum-Group Metal Content in Hydrogen Evolution Reaction Electrocatalysts // Catalysts. - 2024. - V. 14. - P. 845.

8. **Banasiak D. Kienberger T.** A comparative analysis of the economic feasibility of reversible hydrogen systems based on time-resolved operation optimisation // Applied Energy.-2024.-V.371.-P.123639.
9. **Qasem, Naef A.A., Abdulrahman, Gubran A.Q.** A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications // International Journal of Energy Research. – 2024. – V. 2024, issue 1, Article ID 7271748. – P.36.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 14.02.2025.

Ռ.Հ. ԱՎՈՅԱՆ

ՋՐԱԾԱՆՑԻՆ ԿՈՒՏԱԿԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ԻՆՔՆԱՎԱՐ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԿԱՅԱՆԻ ՄՇԱԿՈՒՄՈՐ

Մշակվել է ջրածնային կուտակիչ համակարգին համակցված ինքնավար ֆոտովոլտային կայան, որը նախատեսված է միասնական էլեկտրացանցից հեռու վայրերում հուսալի և կայուն էլեկտրաէներգիա ապահովելու համար: Համակարգը կառավարվում է էներգիայի կարգավորման նոր ալգորիթմով, համաձայն որի, կախված ընթացիկ պայմաններից, ինչպես նաև երկարաժամկետ և կարճաժամկետ պահանջներից, իրականացվում է էլեկտրաէներգիայի օպտիմալ բաշխում լիթիում-իոնային մարտկոցների և ջրածնային կուտակիչի միջև:

Առանցքային բառեր: ֆոտովոլտային կայան, ջրածին, կուտակիչ համակարգ, լիթիում-իոնային մարտկոց, վառելիքային տարր, էլեկտրոլիզ, էներգիայի կառավարում:

Р.О. АВОЯН

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ С ВОДОРОДНОЙ СИСТЕМОЙ НАКОПЛЕНИЯ

Разработана автономная фотоэлектрическая электростанция с интегрированной системой хранения водорода для обеспечения надежного и устойчивого электроснабжения в удаленных районах. Инновационный алгоритм управления энергией оптимально балансирует распределение электроэнергии и между литий-ионными аккумуляторами, и системой хранения водорода, адаптируясь к условиям в реальном времени, а также к краткосрочным и долгосрочным энергетическим потребностям.

Ключевые слова: фотовольтаическая станция, водород, система накопления, литий-ионная батарея, топливный элемент, электролиз, управление энергией.

UDC 004.832

COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.3-315

D.M. GALSTYAN

HIERARCHICAL MULTIMODAL TRANSFORMER FOR SIGN LANGUAGE RECOGNITION

Traditional sign language recognition (SLR) systems primarily focus on hand gestures, while facial expressions and body posture also play a crucial role in solving these problems.

This paper presents a multimodal transformer architecture (MM-Transformer) that integrates three main aspects of sign language: hand gestures, facial expressions, and body posture. The proposed system has a hierarchical fusion mechanism that combines specialized encoders: 3D-CNN for hand gesture recognition, a deep residual network for facial expression analysis, and a keypoint tracking system for body posture estimation. Testing results show that this system achieves 93.2% accuracy. The proposed model results in higher inference time and memory consumption compared to models that process only hand gestures. However, it achieves higher inference accuracy while maintaining real-time performance.

Keywords: deep learning, transformers, sign language, multimodal, CNN.

Introduction. Systems for SLR focused on the primary manual gestures made with hands, neglecting facial expressions, body posture, and other contextual factors that are important in SLR [1]. As a result, such systems often miss the subtleties and complexities of real-world sign language.

With evolving technology, an increasing number of systems face challenges integrating new forms of data. For example, the sign language expressions as a form of communication have facial expressions, body posture, and environment, making it challenging, yet easier for these systems to understand semantic intricacies [2]. Also, context-oriented models are especially effective in situations where certain gestures have multifaceted meanings due to their context.

For one, the system sensing external data has to have increased memory and processing capabilities, leading to greater system complexity.

However, these new multimodal systems present a number of problems. They require more memory and computational resources, which increases the complexity of the system. At the same time, the combination of multiple input sources (hands, face, body, environment) leads to high latency and high hardware requirements, which makes their real-time implementation difficult, especially on

devices with limited power [3]. In addition, training such systems requires large and diverse datasets, which are currently limited and can affect the generalization ability of the models across different sign languages and dialects.

However, despite significant advances in deep learning and multimodal processing, current systems for SLR continue to have fundamental limitations.

The related works. Researchers have had success in recognizing individual components of sign language hand gestures, facial expressions, and body postures but few approaches have successfully combined these elements into a unified recognition system. These studies are beneficial for certain parts of SLR but the research has mostly failed to address the multi-faceted nature of sign language communication. The growing body of research conducted is very fragmented.

Recent studies have attempted to suggest solutions to SLR problems. However, these studies have dealt with hand movements, contextual clues, facial expressions or other forms in an isolated manner rather than integrating all of them at once.

Among the most recent works, SignBank-RNet (2023) used 2800 symbols from SignBank to propose a new CNN architecture. Through proportional sampling, 32 frames were obtained from each symbol, which improved the recognition accuracy [4].

For facial feature analysis [5], the FaceASL-2000 dataset was used. The proposed CNN model achieved improvement in accuracy for facial recognition. However, the system requires high computational resources and runs slowly in real time.

For body pose estimation, the system presented in [6] tracks 18 nodal points. The advantage is that the system works stably regardless of lighting changes. The disadvantage is that the system does not work accurately when body parts overlap.

In the study of the influence of contextual elements. The advantage of the model is its robustness to background noise. This system requires pre-processed data and is hard to adapt to new environments without retraining.

Proposed method. The proposed transformer architecture represents a new approach to SLR, incorporating a large amount of data through a deep learning system. The system is based on the processing of three different but interconnected aspects of SL: hand gestures, facial expressions, and body position. The method processes video input using three specialized encoders: (1) a 3D-CNN for hand gestures, (2) a deep network to recognize facial expressions, (3) a body-pose estimator. This project uses three main parts:

- a network to recognize facial expressions,
- a system to track hand movements,
- a body-pose estimator that follows key points of movement over time.

First, it takes at hand movements and facial expressions separately. Then, it combines the features we've gathered, paying attention to what's happening around them. Finally, position data usage to improve how the system understands gestures.

Each step is specifically designed to capture different aspects of SLR communication. The hand gesture step utilizes 3D convolutional neural networks, which process images in three dimensions. This approach enables the system to accurately track complex hand trajectories and gestures in space.

Meanwhile, a deep residual network is employed to analyze facial expressions. This network is capable of monitoring changes over time and can detect even subtle variations in facial expressions, which are essential for interpreting the meaning of a sign.

One notable feature of the system is its hierarchical fusion mechanism. It combines information from hands, face, and body to determine how they work together. The system can dynamically change this importance depending on the situation.

For merging this there are several steps: First, each type of information is processed separately. Then the system begins to combine them in pairs, for example, hand movements with facial expressions. Finally, all the information is combined, creating a complete picture of the sign.

Body position analysis systems pay attention to the positions of the shoulders, head, and upper body; these often provide contextual information that helps distinguish such gestures. During training, the system learns not only to correctly recognize individual symbols, but also to understand their temporal sequence.

The learning rate is carefully adjusted to ensure stable system performance. The system can process video in real time, which allows it to be used in real-life situations (Fig.).

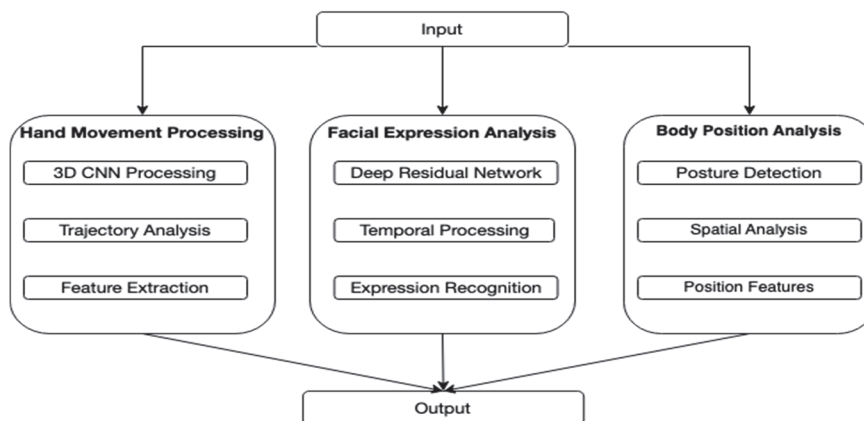


Fig. Multimodal SLR algorithm block diagram

Experiments. Three main datasets were used in the research. The MS-ASL dataset [4] contains videos of SLR performances, with 1,000 hours featuring 1,000 different signs performed by multiple signers. This dataset is particularly valuable for testing the system in comprehensive linguistic environments. The WLASL dataset [5] is another significant collection, with 2,000 unique sign language words captured across various contexts. The Boston ASL Dataset [6] provides an additional 500 hours of material from native signers, offering opportunities to test cross-linguistic SLR and cultural variations.

The system was evaluated on three benchmark datasets: MS-ASL [7], WLASL [8], and the Boston ASL Dataset [9], covering a wide range of linguistic and environmental variations

Table 1

Results of the experiments

Approach	Modalities	Accuracy (%)
Traditional CV	Hand only	80.1
CNN-based	Hand+Face	83
LSTM-based	Hand+body	87
MM-Transformer	All modalities	93.2

The results in Table 1 show that the proposed model achieved an increase of accuracy on the MS-ASL dataset. Studies have been conducted to assess the impact of individual modes. Using hand gestures alone, the accuracy was 80.1%. Adding facial expressions increased it to 83%, and including all three modes reached 93.2%.

Table 2

Performance results

Model	Inference Time(ms/frame)	MemoryUsage(MB)
LSTM	12	245
CNN	25	386
MM-Transformer	18	312

Table 2 presents performance comparisons across three different approaches: LSTM, CNN, and MM-Transformer. The inference time is calculated using the (1) formula [10]:

$$InferenceTime = \frac{Total\ Processing\ Time}{Number\ of\ Frames\ Processed}, \quad (1)$$

where the model's total processing time (*ms*) is the time, it takes to process a batch of frames and the number of frames processed is the total number of frames analyzed in a dataset or batch.

Results. The MM-Transformer delivers top performance, achieving the highest accuracy. But it's lost in inference and memory, compared with the simple model. With an inference time of just 18 *ms* per frame and a memory footprint of 312 *MB*, it significantly improves computational efficiency while maintaining high accuracy across multi-modal SLR tasks.

Conclusion. The MM-Transformer architecture shows significant improvement in SLR by using multiple types of data hand gestures, facial expressions, and body posture. Unlike traditional methods that focus on just one type of data, this approach captures the full complexity of sign language communication, which leads to much better recognition accuracy.

Tests on the MS-ASL, WLASL, and Boston ASL datasets show that the system is effective, achieving an accuracy of 93.2%. Experiments show that the proposed method has an improvement over the old methods.

However, the MM-Transformer is accurate, but requires more computing power. It takes longer to process each frame and consumes more memory than simpler models.

Overall, the MM-Transformer is a good advance for real-time use. SLR: It provides a good mix of accuracy and efficiency, making it suitable for practical use in assistive technologies and human-computer interaction.

REFERENCES

1. **Koller O., Zargaran S., & Ney H.** Deep Sign: Hybrid CNN-HMM for Continuous Sign Language Recognition // Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC).- 2016.
2. **Camgoz N.C., Hadfield S., Koller O., & Bowden R.** Sign Language Transformers: Joint End-to-End Sign Language Recognition and Translation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).- 2020.- P. 10023-10033.
3. **Jiang J., Yao A., Shan S., & Chen X.** Skeleton-aware Multi-modal Sign Language Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.- 2022.- Vol. 44(6).- P. 3016-3031.
4. **Liu Y., Li J., & Wang S.** Facial Expression Recognition in Sign Language using Deep Learning. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.- 2023.- Vol. 45(8).- P. 2893-2905.
5. **Zhang H., Chen K., & Brown R.** PoseTrack: Real-time Body Position Estimation for Sign Language Recognition // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).- 2024.- P. 1247-1256.
6. **Kumar A., Singh M., & Wilson T.** Context-Aware Sign Language Recognition Using Environmental Adaptation. Pattern Recognition, 2023.-Vol. 146. P. 109759.

7. **Joze, Hamid & Koller, Oscar.** MS-ASL: A Large-Scale Data Set and Benchmark for Understanding American Sign Language: arXiv Preprint, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1812.01053.
8. **Baskoro R.** WLASL-Processed Dataset.- Kaggle, 2022. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/risangbaskoro/wlasl-processed> [Accessed: 31 January 2025].
9. **RWTH Aachen University.** RWTH-Boston-104 Sign Language Database.- RWTH Informatik Database, 2022. Available at: <https://www-i6.informatik.rwth-aachen.de/aslr/database-rwth-boston-104.php> [Accessed: 31 January 2025].
10. **Yang Yuhang & Lee Hao.** Real-time Inference and Deployment for Deep Learning Systems: A Comprehensive Survey: arXiv Preprint, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.03341.

National Polytechnic University of Armenia. The material is received on 10.02.2025

Դ.Մ. ԳԱԼՍՅԱՆ

ՀԻԵՐԱՐԽԻԿ ԲԱԶՄԱՍՈՂԱԼ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐ՝ ՆՇԱՆՆԵՐԻ ԼԵԶՎԻ ՃԱՆԱԶՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Նշանների լեզվի ճանաչման ավանդական համակարգերը հիմնականում կենտրոնացված են ձեռքի ժեստերի ուսումնասիրության վրա: Այնուամենայնիվ, դեմքի արտահայտությունը և մարմնի դիրքը նույնպես շատ կարևոր են այս տիպի խնդիրները լուծելու համար: Ներկայացվում է բազմամոդալ տրանսֆորմերի ճարտարապետությունը, որը միավորում է նշանների լեզվի երեք հիմնական ասպեկտները՝ ձեռքի ժեստերը, դեմքի արտահայտությունը և մարմնի դիրքը: Առաջարկվող համակարգն ունի հիերարխիկական միաձուլման մեխանիզմ, որը համատեղում է կողավորիչներ՝ 3D-CNN ձեռքի ժեստերի ճանաչման համար, խոր մնացորդային ցանց՝ դիմախաղի վերլուծության համար, և տարածաժամանակային հիմնակետերի հետևման համակարգ՝ մարմնի դիրքի գնահատման համար: Ստանդարտ թեստավորման արդյունքները ցույց են տալիս, որ այս համակարգը հասնում է 93.2% ճշգրտության: Առաջարկվող մոդելը հանգեցնում է եզրակացությանը՝ ավելի մեծ ժամանակի և հիշողության սպառման, համեմատած այն մոդելների հետ, որոնք մշակում են միայն ձեռքի ժեստերը: Այնուամենայնիվ, այն հասնում է ավելի բարձր ճշգրտությամբ եզրակացության:

Առանցքային բառեր. խոր ուսուցում, տրանսֆորմերներ, նշանների լեզու, բազմամոդալ, CNN.

Д.М. ГАЛСТЯН

ИЕРАРХИЧЕСКИЙ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМЕР ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЯЗЫКА ЖЕСТОВ

Традиционные системы распознавания языка жестов в основном фокусируются на изучении жестов рук. Однако мимика и поза тела также очень важны для решения такого рода задач. В данной статье представлена мультимодальная архитектура трансформера, которая объединяет три основных аспекта языка жестов: жесты рук, мимику и позу тела. Предлагаемая система имеет иерархический механизм слияния, который объединяет специализированные кодировщики: 3D-CNN для распознавания жестов рук, глубокую остаточную сеть для анализа мимики и пространственно-временную систему отслеживания ключевых точек для оценки позы тела. Тестирование на стандартных эталонных тестах показывает, что эта система достигает точности 93,2%. Предлагаемая модель приводит к более высокому времени вывода и потреблению памяти по сравнению с моделями, которые обрабатывают только жесты рук. Однако она достигает более высокой точности вывода, сохраняя производительность в реальном времени.

Ключевые слова: глубокое обучение, трансформеры, язык жестов, мультимодальный, CNN.

S.A. GHUKASYAN, E.T. PAPYAN, R.A. IVANYAN, S.S. MKRTCHYAN,
G.A. VOSKANYAN

A MINIMIZATION METHOD FOR TRANSISTOR AGING INFLUENCE IN HIGH-TO-LOW VOLTAGE LEVEL CONVERTER DESIGN

Most activities would be impossible to imagine without the integrated circuits that are produced today. Modern integrated circuits have attained extremely high levels of integration by adhering to Moore's law. The density of element placement on the wafer can be significantly increased thanks to the advancements in nanoelectronics. The decrease in operating voltages required for transistors that does not keep up with transistor scaling leads to the emergence of unwanted voltage values between the transistor's terminals. The inability of factories to manufacture transistors with a thick dielectric layer results in overvoltage issues, which accelerate the aging and compromise system functionality in the coming years. It is suggested that a level converter be designed using the proposed method in order to address the communication issue with the aging effect.

Keywords: voltage level converter, multivoltage supply, aging effect, power consumption, overvoltage.

Introduction. Numerous industries, including autonomous vehicles, medical gadgets, portable electronics, and military gear, heavily rely on integrated circuits. Computers, smartphones, and TV sets are just a few of the many electronic gadgets that use integrated circuits to process and store data, among other tasks. They aid in facilitating communication across a range of media, such as fiber optic networks, satellite linkages, and wired and wireless connections. Therefore, miniaturization, performance, cost reduction, and high productivity are the primary factors that make ICs so crucial.

The integration level of 100 billion transistors per chip has already been attained by foundries, who are making separate preparations to fit an increasing number of transistors into each square millimeter of silicon [1].

Significantly increasing the density of element placement on the wafer is made possible by the revolution in nanoelectronics. However, the decrease in operating voltages required for transistors does not match transistor scaling, resulting in the occurrence of unwanted voltage values between the transistor's terminals. As a result, engineering problems pertaining to the fabrication of microelectronic integrated circuits are challenging to be solved. Due to these

production issues, as the degree of integration has increased, semiconductor microcircuit factories are now unable to supply integrated circuit designers with transistors with a thick dielectric layer, which enables operation at relatively higher voltages without appreciably affecting the effects of aging.

The aging effect is one of the most significant variables influencing the reliability of integrated circuits (ICs) [2]. As a result, the circuit's characteristics decrease with time and may eventually cause the circuit to fail [3]. For instance, threshold voltage degradation is brought on by the NBTI effect. The transistor's operational point changes when the threshold voltage rises. When the circuit is operating at greater supply voltages or high temperatures, threshold changes fall even faster. In contemporary systems, variations in transistor properties like threshold and current become more apparent when gate length and operating voltages are scaled. Transistor performance is also reduced by the HCI effect. It harms the NMOS and PMOS gate oxides. Because of the high temperature and voltage at which the transistor functions, the carriers get enough kinetic energy from the field to get beyond the gate oxide's (SiO₂) potential barrier. Since transistor sizes are scaled more aggressively than supply voltages, as previously indicated, the electric field will likewise increase in value as technologies get smaller (1)[4]:

$$E_{vertical} = \frac{V_{nom}}{T_{ox}} . \quad (1)$$

The velocity of hot carriers in some cases where the electrical field is high enough could be higher than the saturation velocity [5]:

$$\Delta V_{TH} \sim \frac{1}{\sqrt{L}} \exp(\alpha_1 E_{OX}) \exp(\alpha_2 V_{DS}) t^{n_{HC}} . \quad (2)$$

The dependency of threshold voltage change on account of hot carrier effect is explained above (2)[6], where α_1 and α_2 are the voltage scaling factors, V_{DS} – the drain source voltage difference, E_{ox} – the oxide electrical field, n_{HC} – the time exponent.

Once carriers have accumulated sufficient energy, they can collide with Si atoms and remove electron-hole pairs, resulting in ionization. Consequently, the field-accelerated produced carriers may re-initiate ionization. The produced carriers have the potential to harm the interface or be injected into the oxide. At significantly higher drain-source voltages than gate-source voltages, this impact is most pronounced (Fig. 1).

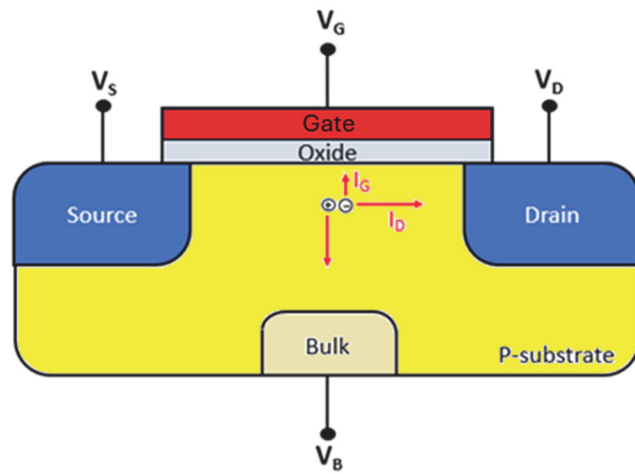


Fig. 1. Accelerated hot carriers

Injecting hot carriers into the oxide may have a second effect, since the high gate voltage may push them in the direction of the gate. Electrons can pass over the potential barrier and enter the oxide if the gate voltage is high enough (Fig. 2).

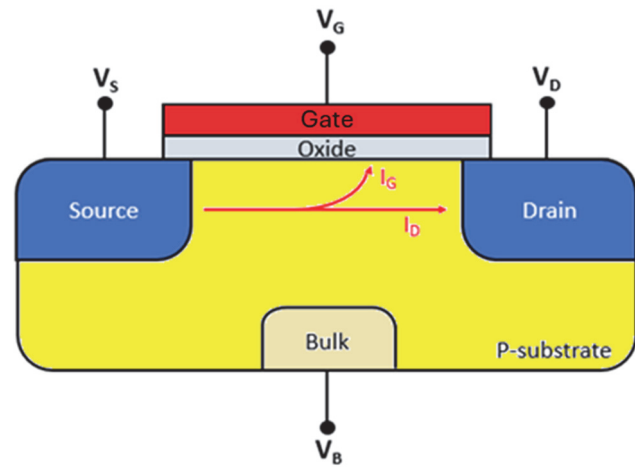


Fig. 2. A channel hot carrier

Tests are conducted on specific models provided by semiconductor factories and under well-defined working settings to account for the aging phenomena of the IC. These conditions represent a variation of +10% from the nominal value of the supply voltage and an operating temperature of +125°C [7].

Designers research and apply a variety of techniques to address the issues that have been found. The impacts of aging phenomena can be avoided in a variety of ways. By using technical and circuit solutions, the impact can be lessened or

eliminated [8]. Using regulatory protrusions found in certain contemporary IS, it is possible to document the aging phenomenon's presence and offset the detrimental effects of technological deviations [9]. However, the cost of adding each protrusion is significant. As a result, control, accounting, and compensation methods that are part of the IS must be developed [10].

Nowadays, low power systems and digital circuits are a big problem in circuit design. Short-circuit power, dynamic power, and static power are all greatly decreased by lowering the supply voltage. Low supply voltages, however, restrict the circuit's speed and have an impact on the sub-block's linearity and internal gain [11]. Utilizing the multi-voltage supply system, where each segment has its own local voltage source, is the main focus of recent and developing applications [12].

To create an interface between sub-blocks, the voltage level converter uses a variety of supply voltage approaches. Low-level voltages can be changed into higher-level voltages suitable for later stages by using voltage level converters. Voltage level converters are therefore employed as an intermediate and auxiliary block. These voltage level converters must be high-speed, low-power, and have a smaller silicon area to minimize their total performance impact. However, current architectures make it impossible to construct voltage level converters without using transistors with a high dielectric layer because stress voltage causes aging effects that reach detectable levels.

The problem description. The issues mentioned are typical for a level shifter since the high (V_{DDH}) and low (V_{DD}) supply levels can be somewhat distant from one another (Fig. 3). Not all technologies have thick oxide devices or are designed to withstand the high voltage differentials between transistor terminals that generate stress.

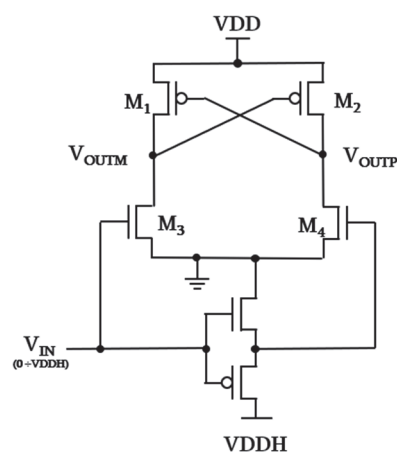


Fig. 3. Level converter modern architecture

Understanding the circuit's weak points is crucial when examining the level shifter's overall architecture. The input signal is controlled by the M3 and M4 control transistors. The VDDH level, the design's high supply level, creates the input signal, and the VDD level creates the output signal. Transistor M3 is opened by the logic 1 level at the input (VDDH), whereas transistor M4 is in the off mode. The gate of M2 opens as a result of M3 being open, bringing it to the zero level. The output (OUTP) in this instance is brought to the logic 1 level by M2, but its level is VDD. On the flip side, outm approaches level 0 and outp shuts off transistor M1[13].

Since the maximum voltage difference between the terminals of all transistors is VDD, it should be noted that when the VDDH signal reaches the circuit's input and transistor M3's source is grounded, the potential difference between the gate and source of M3 is VDDH, which is unacceptable.

The proposed solution. A circuit that converts VDDH to Vnbias without stress voltage for the transistor can be used to address the issue of transistor overvoltage and to provide suitable operating conditions for the transistor (Fig. 4). This approach ensures that the transistors will have a significantly longer service life and work under the manufacturer-specified settings (without overvoltage).

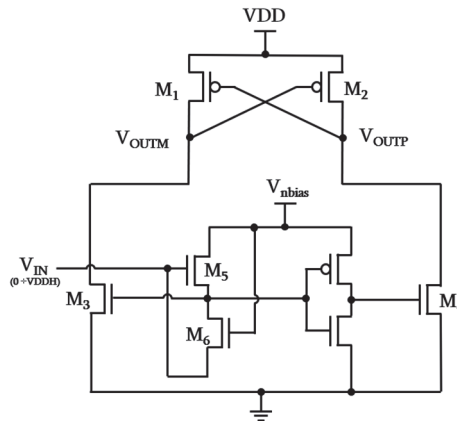


Fig. 4. Level converter proposed architecture

The principle of operation of the first stage is the same as the inverter. Since the M6 transistor's source is also linked to V_{in} and the gate to V_{nbias} , the conditions for opening the M6 transistor are satisfied. When V_{in} is connected to the gate of the M5 transistor, it has a low level, and the M5 transistor is closed. As a result, M4's gate is high and M3's gate is low. The output is a logical zero. When V_{in} is high, the transistor M6's terminal that is connected to V_{in} turns into a drain, and the transistor M6's terminal that is connected to the gate of M3 turns into a source. The gate of VDDH and the source of transistor M5 are both subjected to potential V_{nbias} at the same time. When V_{gs} exceeds V_{th} and transistor M5 opens,

M6 is consistently closed because there is no potential difference between the source and the gate, both of which have potential V_{nbias} . Transistor M3's gate is thus brought up to the potential V_{nbias} , whereas transistor M4's gate is pulled to zero by the inverter output.

Depending on the input level, the OUTN and OUTP outputs give a steady voltage. The logic 1 level for this output is V_{DD} , or $0.8 V$, and it is $1.2 V$ for a high input voltage level. Bandgap circuits or voltage dividers can be used to determine the V_{nbias} value; given the right matching techniques in the designs, the voltage shouldn't fluctuate by more than 5%.

Simulation results. Aging simulation is done for the V_{DDH} level $1.2 V$ and $125^\circ C$ temperature. This is stress conditions that are applied for 10 years aging.

With the proposed approach, the maximum current degradation is less than 10% as opposed to 52% in modern architecture, and the maximum threshold voltage degradation is less than $50 mV$ as opposed to $250 mV$ in modern architecture (Fig. 5).

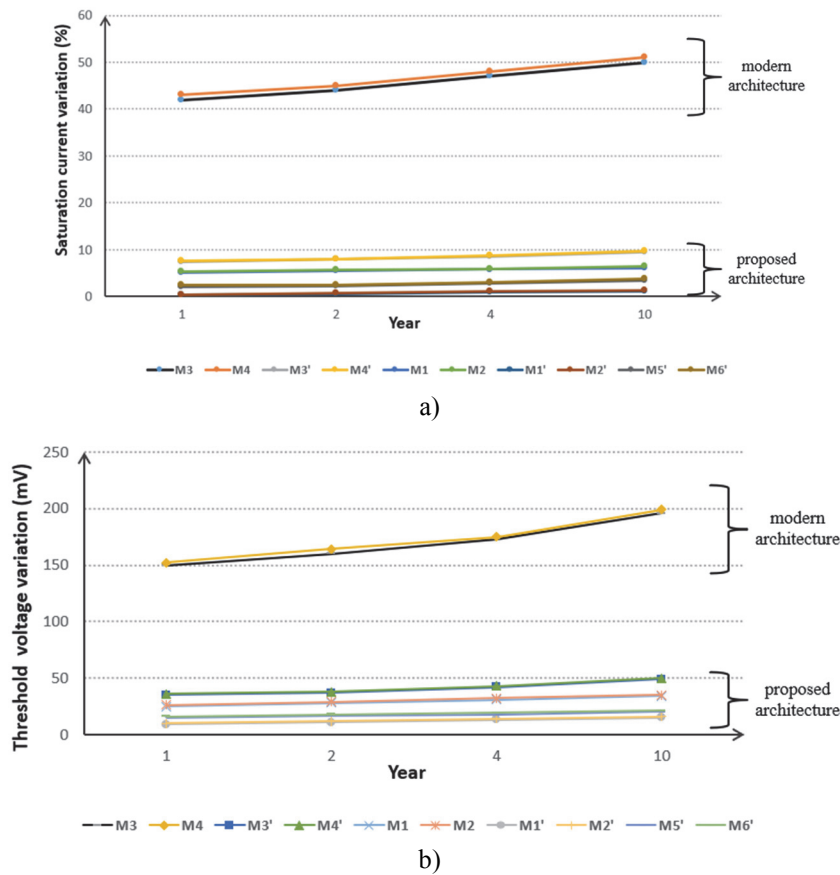


Fig. 5. The transistor saturation current (a) and the threshold voltage (b) variation in 10 years for modern and proposed architectures of a level converter

The plot for the proposed method (Fig.6) show that the voltage level is settling at VDD level for the OUTP. The rising time remains relatively constant, but the degradation of transistors M3 and M4's characteristics results in a significant increase in the switching time from high to the low logic level.

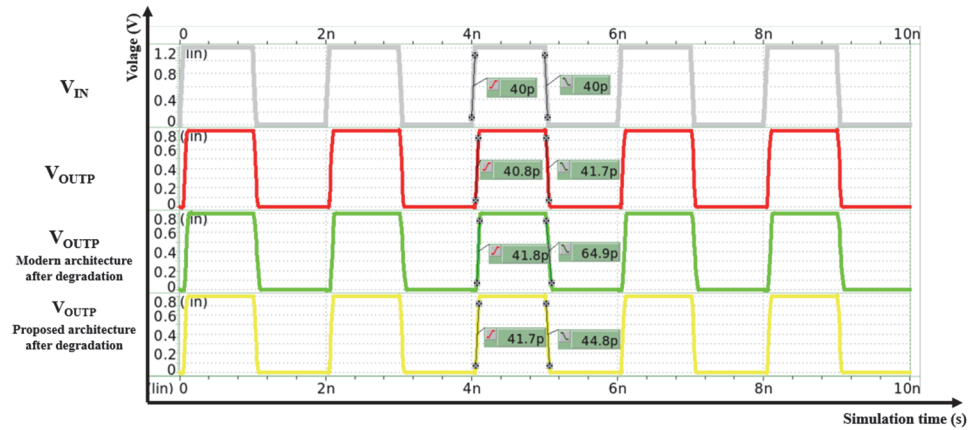


Fig. 6. Transient analysis of level converters

Conclusion. A level converter with a modern architecture has been designed with the SAED 14 nm FinFet technology [14]. Overvoltage is observed on transistors, resulting in excessively fast aging. To lessen the aging effect, an architecture upgrade has been proposed. The findings show that the saturation current and threshold voltage degradation are lessened, not exceeding 10 percent and 50 mV, respectively. This has an effect on the level converter's primary parameters, particularly rise and fall times. However, the circuit area and the number of transistors employed rose somewhat, but this increase is acceptable for the intended outcomes. The SAED 14 nm FinFet technology libraries have been used during the HSPICE simulations, and outputs have been exported by Galaxy Custom Designer tool [15]. □

REFERENCES

1. **Boyd J.** Is the Future of Moore's Law in a Particle Accelerator?: Wiggling Electrons Could Turbocharge EUV Lithography // In IEEE Spectrum. - July 2024. - Vol. 61, no. 7.- P. 28-33, doi: 10.1109/MSPEC.2024.10589684.
2. **Morita S., Bian S., Shintani M., and Sato T.** Efficient Analysis for Mitigation of Workload-Dependent Aging Degradation // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. - Dec. 2022. - Vol. 41, no. 12. - P. 5515-5525, doi: 10.1109/TCAD.2022.3149856

3. **Amrouch H., Ehsani S.B., Gerstlauer A., and Henkel J.** On the Efficiency of Voltage Overscaling under Temperature and Aging Effects // IEEE Transactions on Computers. - 1 Nov. 2019. -Vol. 68, no. 11. - P. 1647-1662, doi: 10.1109/TC.2019.2916869.
4. **Lorenz D.** Aging analysis of digital integrated circuits: Doctoral dissertation / Technische Universität München, 2012.
5. **Baker R.J.** CMOS Circuit Design, Layout and Simulation. - 3rd Edition. - John Wiley & Sons, 2010. - 1214 p.
6. **Mahato S., & Gielen G.** Impact of transistor aging on RF low noise amplifier performance of 28nm technology: Reliability assessment // In 2013 IEEE 20th International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). – Dec. 2013. - P. 413-416.
7. The Gold Standard for Accurate Circuit Simulation. – Synopsys, 2019. - 4p.
8. **Kalluru H.S., Saha P., Zahra A., and Abbas Z.** PVT and Aging Degradation Invariant Automated Optimization Approach for CMOS Low-Power High-Performance VLSI Circuits // 2021 22nd International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED). - Santa Clara, CA, USA, 2021. - P. 1-6, doi: 10.1109/ISQED51717.2021.9424366.
9. **Pallavi J., and Mohan N.** Improved BIST Design for Detecting Ageing Faults in Automotive ICs // 2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC). - Coimbatore, India, 2021. - P. 1701-1706, doi: 10.1109/ICESC51422.2021.9532812.
10. **Khachatryan A., and Mirzoyan D.** A novel approach to detect temperature variation // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). - Yerevan, Armenia, 2016. - P. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807715.
11. **Gosatwar P., and Ghodeswar U.** Design of voltage level shifter for multi-supply voltage design // 2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). - 2016. – P. 853-857.
12. **Chavan S.B., and Chavan A.P.** Ultra-Low Power, Area Efficient and High-Speed Voltage Level Shifter based on Wilson Current Mirror // 2021 IEEE Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon). - Hassan, India, 2021. - P. 108-113, doi: 10.1109/MysuruCon52639.2021.9641657.
13. **Halak B., Tenentes V., Rossi D.** The Impact of BTI Aging on the Reliability of Level Shifters in Nano-scale CMOS Technology // Microelectronics Reliability. - Nov. 2016. - Vol. 67. - P. 1-14, doi: 10.1016/j.microrel.2016.10.018.
14. **Melikyan V., Martirosyan M., and Piliposyan G.** 14nm Educational Design Kit // Capabilities Deployment and Future Small Systems Simulation Symposium. - 2018. – P. 37-41.aut.
15. Galaxy Custom Designer Schematic Editor User Guide. - Synopsys Inc. - 2014.- 236p.

National Polytechnic University of Armenia, “Synopsys Armenia” CJSC. The material is received on 14.01.2025.

Ս.Ա. ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ, Է.Տ. ՊԱՊՅԱՆ, Ռ.Ա. ԻՎԱՆՅԱՆ, Ս.Ս. ՄԿՐՏՅԱՆ,
Գ.Ա. ՈՍԿԱՆՅԱՆ

**ԲԱՐՁՐԻՑ ՑԱԾԴ ԼԱՐՄԱՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՓՈԽԱԿԵՐՊՉՈՒՄ
ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ԾԵՐԱՑՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ**

Տարբեր բնագավառների գործունեության մեծ մասն անհնարին կլինեի պատկերացնել՝ առանց ներկայումս արտադրվող ինտեգրալ սխեմաների: Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաները հասել են ինտեգրման շատ բարձր մակարդակի՝ ըստ Մուրի օրենքի: Նանուկեկտրոնիկայի ոլորտում նվաճումների շնորհիվ՝ տարրերի տեղաբաշխման խտությունը շարունակում է աճել: Տրանզիստորների համար անհրաժեշտ աշխատանքային լարումների նվազեցումը, որն ավելի արագ է կատարվում, քան տրանզիստորների մասշտաբավորումը, հանգեցնում է դրանց ելուստների միջև կիրառվող ոչ ցանկալի լարման արժեքների: Հաստ դիէլեկտրական շերտերով տրանզիստորներ արտադրելու գործարանների անկարողությունը հանգեցնում է գերլարման խնդիրների, որոնք արագացնում են ծերացումը և վտանգում համակարգի ֆունկցիոնալությունը հետագա տարիներին: Առաջարկվում է մշակել լարման մակարդակի փոխարկիչ՝ օգտագործելով առաջարկվող մեթոդը՝ ծերացման երևույթի խնդիրը լուծելու համար:

Առանցքային բառեր. լարման մակարդակի փոխարկիչ, բազմավոլտ սնուցում, ծերացման երևույթ, էներգասպառում, գերլարում:

С.А. ГУКАСЯН, Е.Т. ПАПЯН, Р.А. ИВАНЯН, С.С. МКРТЧЯН,
Г.А. ВОСКАНЯН

**МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ЯВЛЕНИЯ СТАРЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ В
КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ВЫСОКОГО
УРОВНЯ НА НИЗКИЙ**

Большинство видов деятельности было бы невозможно представить без интегральных схем, которые производятся сегодня. Современные интегральные схемы достигли чрезвычайно высокого уровня интеграции, следуя закону Мура. Плотность размещения элементов на пластине может быть значительно увеличена благодаря достижениям в области нанoeлектроники. Снижение рабочих напряжений, необходимых для транзисторов, не поспевает за масштабированием транзисторов, что приводит к появлению нежелательных значений напряжения между выводами транзистора. Неспособность заводов производить транзисторы с толстым диэлектрическим слоем приводит к проблемам с перенапряжением, которые ускоряют старение и ставят под угрозу функциональность системы в последующие годы. Предлагается разработать преобразователь уровней с использованием предлагаемого метода для решения проблемы связи с эффектом старения.

Ключевые слова: преобразователь уровня напряжения, мультинапряжение, эффект старения, энергопотребление, перенапряжение.

UDC 621.3.049.77

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.3-331

A.A. GHAZARYAN

THE SKEW MINIMIZATION METHOD USING DIFFUSION MODELS

Integrated circuit (IC) functionality increases significantly, which force to have more strict requirements, especially in fast systems. In digital methodology the clock tree synthesis has crucial importance, which affects the IC's performance. One of the clock tree parameters is clock skew, which should be minimum, otherwise it will affect the IC's performance. Minimal skew development is the tradeoff between timing margins, routing congestion, etc. Currently, there are different methodologies integrated in physical design tools, which are aimed at parameters to find good trade-off points. Some of the algorithms do not work properly in current processes, and human should act manually, which makes electronic design automated tools work not automatically. Fix such issues, a skew minimization method with the use of diffusion models is presented. With the proposed method, the runtime has increased by 5% in respond to EDA tools integrated methodologies, and decreased in terms of AI tools, and skew decreased by 28%.

Keywords. clock tree synthesis, skew, routing congestion, machine learning, diffusion models.

Introduction. Clock tree synthesis (CTS) is a crucial component in IC design that guarantees the performance and functionality of digital integrated circuits. As seen in Fig. 1, the clock signal, also referred to as a chip's "heartbeat," synchronizes all the design's operations.

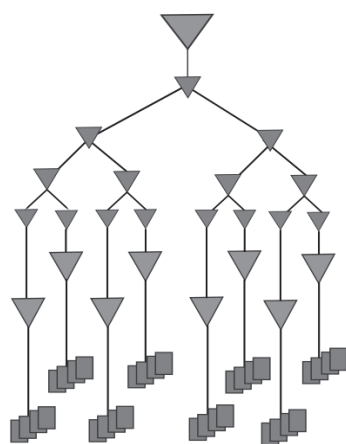


Fig. 1. The general view of a clock tree

One of the main objectives of clock tree synthesis is skew minimization, which minimizes the variation in the arrival times of the clock signal at different components. A clock skew example for two registers is shown in Fig. 2. The skew is critical for maintaining synchronization and optimal performance in synchronous digital circuits [1,2].

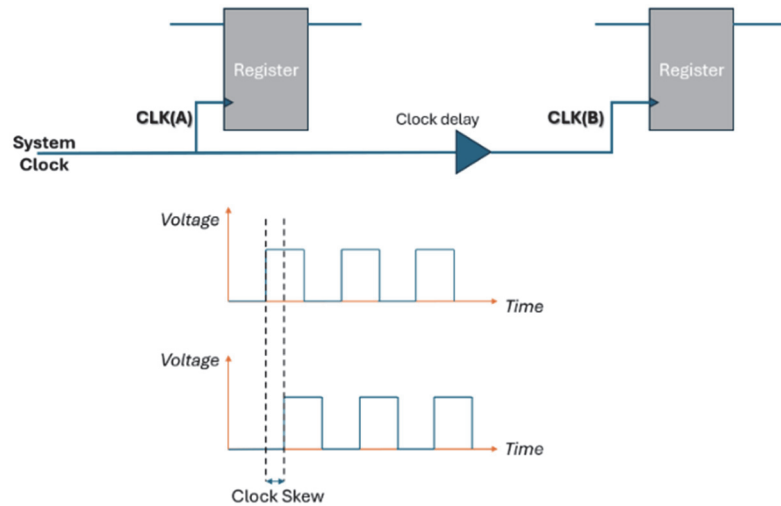


Fig. 2. A clock skew

Even a small clock skew can cause serious timing problems in high-frequency modern systems, such as setup and hold times. Therefore, attaining a well-balanced clock tree is crucial to meet timing standards, which will become more stringent as technology advances. CTS also has difficulties in controlling power usage, routing congestion, and clock latency. Because clock networks frequently consume a significant amount of integrated circuit power, performance and energy efficiency must be carefully optimized and balanced [3].

To overcome these obstacles, the clock tree must be efficiently optimized using techniques and tools that ensure all clocked elements receive the clock signal at the same time, preserving synchronization and improving the system performance. But there are trade-offs associated with each strategy that need to be considered. The most widely used approaches, which can be found in the references are listed below:

- Buffered clock tree synthesis.

According to the method, buffers (used inverter pairs) are used to balance the delays and reduce the skew. By placing buffers, it is possible to achieve zero skews while minimizing the total wire length, which improves timing performance. The main picture of the buffered clock tree synthesis is shown in Fig 3.

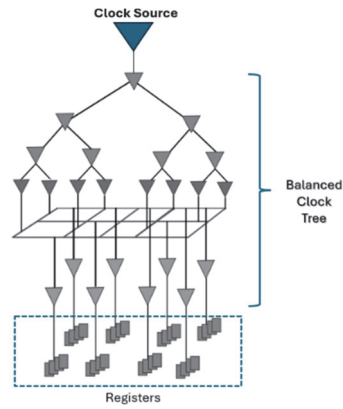


Fig. 3. The balanced clock tree example

The buffers increase the overall power consumption of the clock network. Additionally, the buffer insertion process can introduce routing congestion, especially in dense designs [4].

- Buffer Resizing and relocation.

The method adjusts buffer sizes and positions to optimize the clock arrival times, reduces the insertion delay and minimizes the skew. It enhances the timing performance of design by improving the setup and hold time margins. An example of design before and after optimization is shown in Fig. 4.

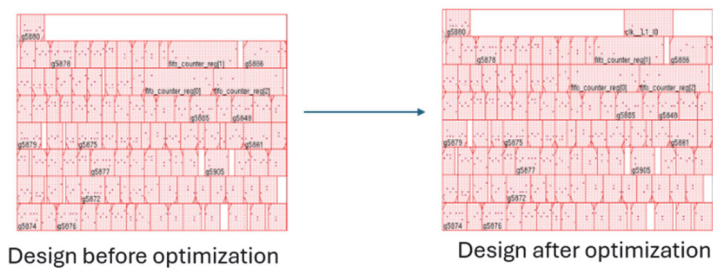


Fig. 4. Design before and after optimization

The method requires more resources in terms of routing and wire length compared to pure tree-based structures. The corresponding will be a reason for overlaps, as a result, the re-placement will be needed, in Fig 4, notably, replacement after CTS optimization has been done. And, achieving the optimal buffer configuration can be computationally expensive, especially for large designs [5].

- Mixed tree-mesh clock distribution networks

Fig. 5 illustrates an overview of those networks, which combine the benefits of mesh and tree topologies to reduce the local clock skew and increase robustness against the process shifts. Networks of the mixed tree-mesh are especially good at

minimizing the effects of manufacturing variations. Compared to completely tree-based topologies, mixed tree-mesh networks demand higher wirelength and routing resources. Because of the large mesh wiring, there may be a significant IR drop and increased power usage. Furthermore, creating such networks is more complicated and might not be appropriate for designs with limited resources [6].

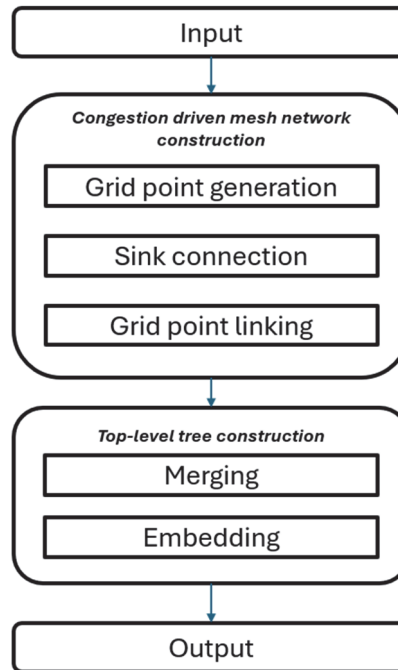


Fig. 5. The overview of mixed tree-mesh clock distribution networks

- DSO.ai – A distributed system to optimize the physical design flows.

In the method with DSO.ai, the distributed system has been built, for the optimization of the physical design flows, and correspondingly for CTS optimization. In the methodology, multiple iterations of parallel runs are used to optimize the enormous design parameters search space. The methodology provides a Pareto optimization opportunity, which opposes too long a runtime and a big CPU usage in terms of memory and cores [7,8].

Proposed method. To decrease the skew and fix the issues described in references, which are: routing congestion (result is short and opens), setup hold margins and runtime, machine learning especially diffusion models have been used. The main algorithm for the proposed method shown in Fig. 6.

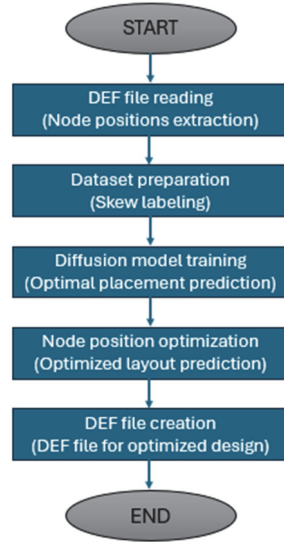


Fig. 6. The proposed method's algorithm

At the initial stages of optimization required to have the design's DEF file where CTS has been done without any optimization. During the DEF file reading process, the design's component placement has been extracted, at the end of the methodology output, a DEF file has been generated for the optimized design, both functions implemented with the help of python, and the implementation shown in Fig. 7.

```

def parse_def_file(def_file_path):
    """
    Parses a DEF file to extract node placement.
    """
    node_positions = []
    node_lines = []
    with open(def_file_path, 'r') as file:
        for line in file:
            if line.startswith('-') and 'PLACED' in line:
                parts = line.split()
                node_name = parts[1]
                x = float(parts[3])
                y = float(parts[4])
                node_positions.append((node_name, x, y))
                node_lines.append(line)
    return node_positions, node_lines
  
```

a)

```

def write_optimized_def_file(input_def_path, output_def_path, optimized_positions):
    """
    Writes an optimized DEF file with new node placements.
    """
    with open(input_def_path, 'r') as infile:
        lines = infile.readlines()

    optimized_lines = copy.deepcopy(lines)
    node_idx = 0

    for i, line in enumerate(optimized_lines):
        if line.startswith('-') and 'PLACED' in line:
            parts = line.split()
            parts[3] = str(int(optimized_positions[node_idx][0]))
            parts[4] = str(int(optimized_positions[node_idx][1]))
            optimized_lines[i] = ' '.join(parts) + '\n'
            node_idx += 1

    with open(output_def_path, 'w') as outfile:
        outfile.writelines(optimized_lines)
  
```

b)

Fig. 7. The input DEF reading (a) and output DEF (b) creation

For Dataset preparation, the instances initialize as a class, and there is generates random floats between 0 and 0.5 to simulate the skew, after this Diffusion model has been defined. Diffusion models are a class of generative models that transform simple noise distributions into complex data distributions through an iterative process. They work by simulating a forward process, which teaches to remove the noise step by step to generate realistic samples. The created

model is designed to encode input data, reconstruct it and predict a skew value from the encoded representation. For diffusion model, a training function is created, be using a dataset of node positions. The training epocha number specified 20 and the initialized total loss for epochs specified as 0, the 20 is a common practice in machine learning, and 0 at the beginning of each epoch to accumulate the loss over all batches within that epoch. This helps in monitoring the training process by providing a measure of how well the model is performing after each epoch. All above-described functions are shown in Fig. 8.



Fig. 8. The dataset class (a), the diffusion model class (b) and the model training (c) implementation

At the end of optimization, the result is the skew improved design's DEF file, whose generation part is shown in Fig. 7b.

Results. To provide the best and worst sides of the proposed method 3 test designs have been implemented with different parameters and clock frequencies. The results are shown in Table below.

Table

Results

	Gate count	Clock frequency	Reference 1-3 methods			Design with DSO.ai			Proposed method		
			Runtime	Short count/ open count	Max skew	Runtime	Short count/ open count	Max skew	Runtime	Short count/ open count	Max skew
Design 1	~600K	8G	2.7h	15/2	0.252	26.4h	0/0	0.201	2.79h	1/0	0.198
Design 2	~1.5M	16G	46.03h	169/3	0.546	142.42h	141/1	0.430	47.5h	141/2	0.352
Design 3	~1.5M	20G	38.87h	78/1	0.601	121.28h	65/0	0.501	38.25h	67/1	0.402

Conclusion. Skew minimization is an important factor during the clock tree synthesis. Current CTS optimization methods have trade-off between the runtime, skew minimization and routing congestion. In the article, the skew minimization method with the use of diffusion models of machine learning. With the proposed method, the runtime has increased by ~5% in respond to EDA tools integrated methodologies, and decreased in terms of AI tool usage, as a result skew decreased by ~28%.

REFERENCES

1. **Micheli G. D.** Synthesis of Digital Circuits.- McGraw-Hill, 1994.
2. **Raju Gorla.** What is Clock Tree Synthesis (CTS), and why is it critical? - VLSI Web, November 29 2024.
3. **Peddi Anusha, K. Satish Babu.** Clock Tree Synthesis Analysis and Optimization in Physical Design Flow of Serial Peripheral Interconnect (SPI) // International Journal of VLSI System Design and Communication Systems.- October 2014.- P. 465-471.
4. **Anju Rose T., Gnana Sheela K.** A Survey on Buffered Clock Tree Synthesis for Skew Optimization // International Journal of Science and Research.- November 2014.- Vol. 3, issue 11.- P. 659-666.
5. Minimizing Skew and Delay with Buffer Resizing and Relocation during Clock Tree Synthesis / **P. Punia, Rouble, Shuka Kr. Neeraj, et al** // International Journal of Computer Applications.- June 2014.- Vol. 95 No.23.- P. 30-35.
6. Local Clock Skew Minimization Using Blockage-aware Mixed Tree-Mesh Clock Distribution Network / **L. Xiao, X. Zignag, Z. Qian, et** // Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design.- Nov. 2010.- P. 458-462.
7. **Piyush Verma.** DSO.ai - A Distributed System to Optimize Physical Design Flows // 2024 International Symposium on Physical Design (ISPD '24). Association for Computing Machinery.- New York, NY, USA, 2024.- P. 115–116, <https://doi.org/10.1145/3626184.3639780>
8. What is Design Space Optimization (DSO)? – How It Works? | Synopsys

National Polytechnic University of Armenia. “Synopsys Armenia” CJSC. The material is received on 14.01.2025.

Ա.Ա. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

ՏԱԿՏԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՇԵՂՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼԱՑՈՒՄԸ ԴԻՖԴՈՒԶԻՈՆ ՄՈԴԵԼՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ

Ինտեգրալ սխեմաների ֆունկցիոնալությունը զգալիորեն մեծանում է, ինչը ստիպում է ունենալ ավելի խիստ սահմանափակումներ և պահանջներ, հատակապես բարձր հաճախականային համակարգերում: Թվային ինտեգրալ սխեմաների նախագծման ավտոմատացված հոսքերում սինթրոագդանշանի ծառի սինթեզը հանդիսանում է կարևոր կետերից

մեկը, որն էականորեն ազդում է ինտեգրալ սխեմաների պարամետրերի վրա: Տակտային ազդանշանի շեղումը սինքրոազդանշանի ծառի սինթեզի որակական պարամետրերից է, որը պետք է հնարավորինս փոքր լինի, հակառակ դեպքում՝ այն կազդի ինտեգրալ սխեմայի աշխատանքի վրա: Տակտային ազդանշանի շեղման նվազագույն արժեքի հայտնաբերումը ներկայացնում է միջմիացումների ուղիներ ծանրաբեռնվածության, ժամանակային պաշարների և մի շարք այլ պարամետրերի փոխզիջման կետ: Ներկայումս կան տարբեր մեթոդներ, որոնք ինտեգրված են ֆիզիկական նախագծման գործիքներում, որոնք նպատակ ունեն պարամետրերի միջև գտնել հնարավորինս օպտիմալ փոխզիջման կետեր: Որոշ ալգորիթմներ ընթացիկ գործընթացներում ճշգրիտ չեն, ինչը ստիպում է նախագծողին գործել ավտոմատացված հոսքուղուց դուրս: Նման խնդիրները շտկելու համար ներկայացվել է դիֆուզիոն մոդելների օգտագործմամբ տակտային ազդանշանի շեղումը նվազագույնի հասցնելու մեթոդ: Նպատակային մեթոդով գործարկման ժամանակն ավելացել է ~5%-ով՝ ի պատասխան EDA գործիքների ինտեգրված մեթոդաբանության, և նվազել է AI գործիքների առումով, իսկ շեղումը նվազել է ~28%-ով:

Առանցքային բառեր. սինքրոազդանշանի ծառի սինթեզ, տակտային ազդանշանի շեղում, ծրագծման ծանրաբեռնվածություն, մեքենայական ուսուցում, դիֆուզիոն մոդելներ

А.А. КАЗАРЯН

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ПЕРЕКОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ДИФФУЗИИ

Функциональность интегральных схем (ИС) значительно возрастает, что заставляет предъявлять более строгие требования, особенно к быстрым системам. В цифровой методологии синтез дерева тактовых импульсов имеет решающее значение, что влияет на производительность ИС. Одним из параметров дерева тактовых импульсов является перекос тактовых импульсов, который должен быть минимальным, в противном случае - он повлияет на производительность ИС. Минимальное развитие перекоса - это компромисс между запасами по времени, перегрузкой маршрутизации и т.д. В настоящее время существуют различные методологии, интегрированные в инструменты физического проектирования, которые стремятся найти хорошие точки компромисса между параметрами. Некоторые из алгоритмов не работают должным образом в текущих процессах, и человек должен действовать вручную, что делает работу автоматизированных инструментов электронного проектирования неавтоматизированной. Для устранения таких проблем представлен метод минимизации перекоса с использованием моделей диффузии. При использовании целевого метода время выполнения увеличилось примерно на 5% в ответ на интегрированные методологии инструментов EDA и сократилось в отношении инструментов ИИ, а перекос уменьшился примерно на 28%.

Ключевые слова: синтез дерева синхросигнала, перекос, перегрузка маршрутизации, машинное обучение, модели диффузии.

G.A. VOSKANYAN

**THE RELIABILITY IMPROVEMENT METHOD FOR THE BANDGAP
REFERENCE WITH THIN OXIDE TRANSISTORS**

Nowadays the sizes of CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) technology elements are shrinking to critical dimensions. As a result, previously negligible physical phenomena begin to manifest, whose effects are insignificant at higher technology levels. Supply voltage does not scale proportionally, and the gate dielectric thickness decreases, subjecting devices to stronger electric fields, thus causing stress on transistors and decreasing reliability.

A method is proposed for designing of bandgap reference with usage of only thin oxide devices, which are improved reliability of circuit and protected from stress conditions.

Keywords: CMOS, stress, reliability, aging, thin oxide device, bandgap reference.

Introduction. Continued scaling in modern submicron technologies makes ensuring the reliable and uninterrupted operation of integrated circuits (ICs) more challenging. The reliability of system operation is influenced by both internal and external factors. To anticipate such effects, it is necessary to model systems correctly during the design process [1].

One phenomenon that leads to a deterioration in the reliability of blocks is aging. Therefore, ignoring the impact of aging effects will lead to a decrease in the production of reliable ICs.

The deterioration of circuit characteristics over time is known as aging. This is primarily due to the degradation of the gate oxide layer and the interface between the gate dielectric and silicon over time [2]. The two main aging effects are Hot Carrier Injection (HCI) and Bias Temperature Instability (BTI). This work presents methods to reduce the circuit degradation and proposes alternatives to the existing solutions.

In technological processes below 5nm, semiconductor manufacturers face difficulties in fabricating transistors with thick gate oxide layers. This necessitates replacing all transistors with devices featuring thin gate oxide layers, complicating the IC design stages.

Analog components, which play a significant role in modern ICs, are responsible for receiving, processing, and transmitting signals (information) from one system to another. These are also the most sensitive parts of ICs. A significant portion of such systems consists of operational amplifiers that use high supply

voltages to ensure a high DC gain and a wide input signal frequency range. Analog circuits include voltage and current systems. In some analog circuits, such as voltage regulators, digital-to-analog and analog-to-digital converters, it is necessary to have bandgap reference with high precision. In other words, the accuracy of such circuits depends on the precision of the bandgap reference. Ideally, Bandgap reference should be independent of the technological process, supply voltage, and temperature changes. However, it is impossible to isolate the system from environmental influences. From this perspective, it is necessary to have temperature-independent bandgap reference.

The proposed solution and simulation results. The concept behind a traditional bandgap reference voltage source involves combining two voltages: one with a positive temperature coefficient (the voltage difference between the base and emitter of two bipolar transistors) and the other with a negative temperature coefficient (the base-emitter voltage, V_{BE}). This combination produces a stable reference voltage. Its expression is:

$$V_{ref} = V_{BE} + KV_T.$$

Among them, V_{BE} represents the forward bias voltage from the base to the emitter of the bipolar transistor, K is a constant, and the V_T thermal voltage.

The traditional bandgap reference power supply structure is shown in Fig.1.

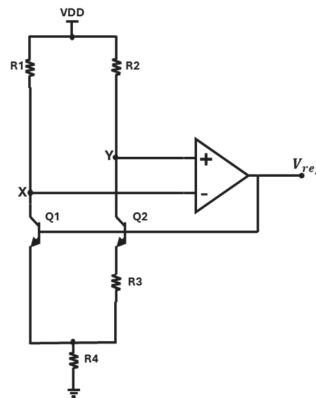


Fig. 1. A traditional bandgap reference voltage source

As shown in Fig. 1, this design employs an operational amplifier to equalize the voltages at points X and Y. The amplifier's output reference voltage is then fed back to the bases of transistors Q1 and Q2 [3].

For the development and analysis of the bandgap reference and to test the methods for reducing the effects of aging on transistor parameters, Synopsys' Galaxy Custom Designer [4] schematic editor is used.

Operational amplifier. In the first stage, an operational amplifier with an embedded cascode is designed. Folded-cascode operational amplifiers are widely used inside bandgap reference to provide high DC gain. In addition to the main constituent transistors, the circuit also includes transistors that enable power the operation down. These transistors are marked with dashed lines: M41, M42, M43, M44, and M54.

The schematic view (Fig. 2) and the HSPICE simulation results (Fig. 3) of the folded-cascode operational amplifier designed by SAED14nm FinFET technology are presented below [5-7].

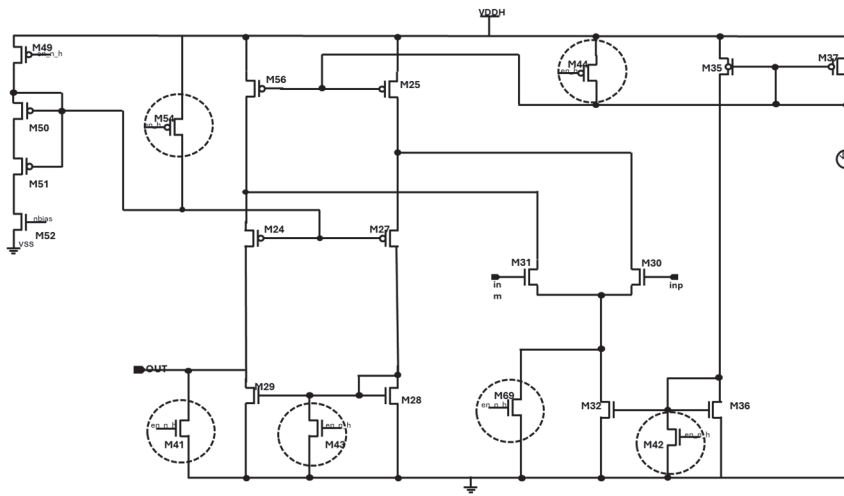


Fig. 2. Schematic view of the folded-cascode op-amp



Fig. 3. The AC characteristic of the designed folded-cascode op-amp

- Transistor M41 in power down mode sets the output of the operational amplifier to 0 (VSS) while also setting the same value on the drains of transistors M29 and M24.

- Transistor M43 sets a value of 0 on the gate of transistor M29, on the gate and drain of transistor M29, and on the drain of transistor M27.

- Transistor M42 sets a value of 0 on the gate of transistor M32, on the gate and drain of transistor M36, and on the drain of M35.

- Transistor M44 sets the VDD value on the gates of transistors M56, M25, and M35, as well as on the gate and drain of M37.

- Transistor M54 sets the VDD value on the gates of M24, M27, and M51, on the drain of transistor M49, and on the source and gate of transistor M50.

When the circuit is switched to the power down mode, overvoltages occur on the following transistors: M41, M42, M43, M44, M54.

To prevent overvoltages in the circuit, an operational amplifier circuit is developed with added transmission gates and transistors (Fig. 4), setting 0 and VDD values on all terminals of the n-channel and p-channel transistors, respectively.

The effect of the added transistors preventing overvoltages is implemented as follows:

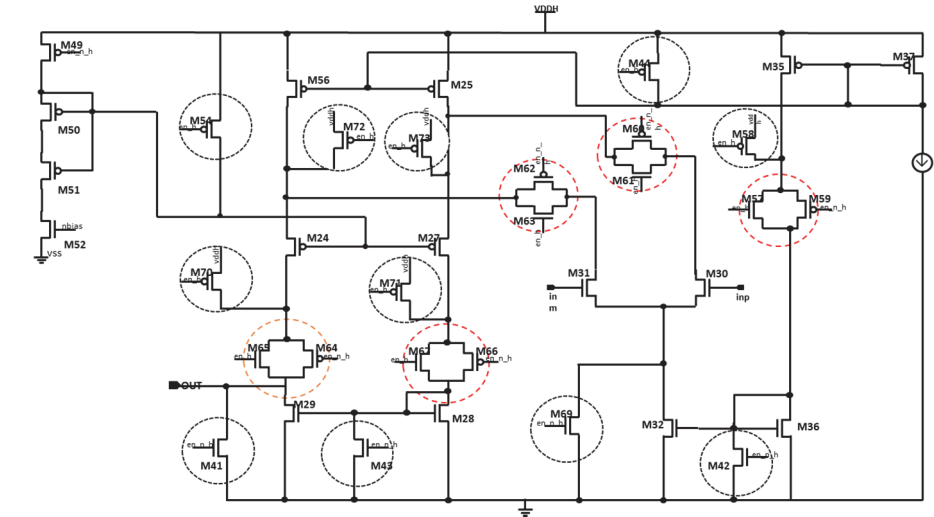


Fig. 4. The schematic view of the folded-cascode op-amp after modifications

- Transistor M35 before the modifications, in the power down mode, the drain value of transistor M35 was 0. Now, transistor M58 sets the drain value to VDD. A transmission gate, consisting of transistors M57 and M59, acts as a switch

that disconnects the connection between the drains of M35 and M36 during power down mode. Without the transmission gate, this connection would cause a short between VDD and VSS.

- Transistors M71 and M73 set the drain and source values of transistor M27 to VDD in the power down mode. Consequently, the voltage between the terminals of M27 equals zero, as transistor M54 sets the gate value to VDD. To avoid a short, a transmission gate consisting of transistors M66 and M67 disconnects the connection between the drains of M27 and M28 during the power down mode.

- Transistors M70 and M72 set the drain and source values of transistor M24 to VDD in power down mode, preventing overvoltages between the transistor's terminals. Transistors M64 and M65 serve as transmission gates to disconnect the connection between the drains of M24 and M29, avoiding a short between VDD and VSS.

- Transistors M72 and M73 set the drain values of M56 and M25 transistors to VDD, while transmission gates, consisting of transistor pairs M62-M63 and M60-M61, disconnect the drains from transistors M31 and M30, respectively.

- Modifications to the M30 and M31 input differential pair transistors are made at a higher level.

- Transistor M69 sets the drain value of M32 to VSS in the power down mode.

- In this way we also protect transistors M27 M24, M56, M25, M32, M30 and M31.

- After those changes, aging simulations are performed, and it is found that problems are solved and there is no significant degradation in the power down mode (Table 1).

Table 1

V_{th} and I_c values of devices for folded-cascode operational amplifier before and after modifications

Transistors Name	Power down mode before modifications		Power down mode after modification	
	$\Delta V_{th} (mV)$	$\Delta I_c (\%)$	$\Delta V_{th} (mV)$	$\Delta I_c (\%)$
M35	197	19,9	0,9	1,4
M31, M30	200	20,7	1,1	1,9
M25, M56	243	23,7	25	3,5
M27, M24	245	23,9	27	3,9

Bandgap reference. Some of the critical components of the bandgap reference (Fig. 5) are the transistors serving as current sources. It is essential to reduce the aging effects on transistors M6, M7, and M8. The pair of transistors M6 and M7 equalizes the input voltages of the operational amplifier, thereby creating a voltage independent of absolute temperature. Transistor M8 copies the current flowing through M6 and M7 and, using a voltage divider, provides different reference voltage values. Aging in bipolar transistors often occurs due to bias temperature instability. However, in this case, the base of the bipolar transistors is connected to the collector, preventing reverse bias. Even so, possible degradation should not be ruled out. If resistors degrade, the parameter shifts will be identical, so resistor degradation will not affect the reference voltage value. Nevertheless, to fully protect against aging phenomena, the likelihood of resistor degradation must also be reduced.

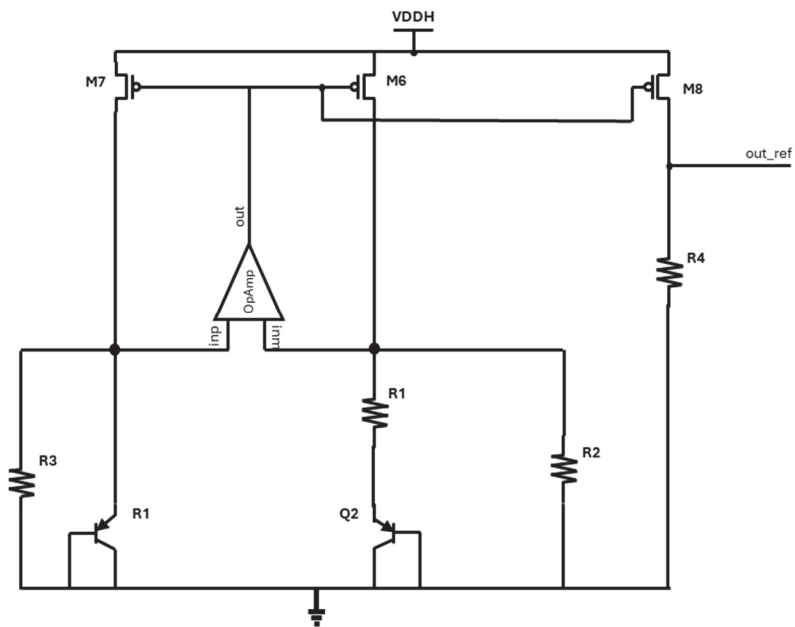


Fig. 5. The scheme of the bandgap reference

- The sources of M6, M7 and M8 transistors are connected to the high-voltage source VDD. The drain voltage varies during operation, but in the power down mode, the drains are set to 0. The output of the operational amplifier, which is set to 0 in the power down mode, is connected to the gates of the transistors. In the power down mode, this causes an overvoltage between the source and the gate. Additionally, the voltage difference between the source and the gate is sufficient to keep the transistors in the ON state.

- The bases and collectors of Q1 and Q2 bipolar transistors are connected to the low-voltage source VDD, whose value is 0. The emitter of Q1 is connected to the operational amplifier input, while the emitter of Q2 is connected to a resistor whose other terminal is connected to the other operational amplifier input. The floating value at the inputs of the operational amplifier in the power the down mode occurs due to the bipolar transistors.

- One terminal of the R4 resistor (or the terminal of the last resistor in a parallel connection) is connected to VSS, which is 0, while the other terminal is connected to the drain of transistor M8, which, in the power down mode, has a floating value. This can result in leakage current, albeit small. However, for designing circuits that minimize the aging-induced degradation, it is necessary to eliminate the potential floating values on conductors.

To prevent overvoltages in the proposed bandgap reference (Fig. 6), transmission gates and transistors which are added set VDD values on all terminals of p-channel transistors and set 0 values on the operational amplifier inputs and circuit output in the power down mode.

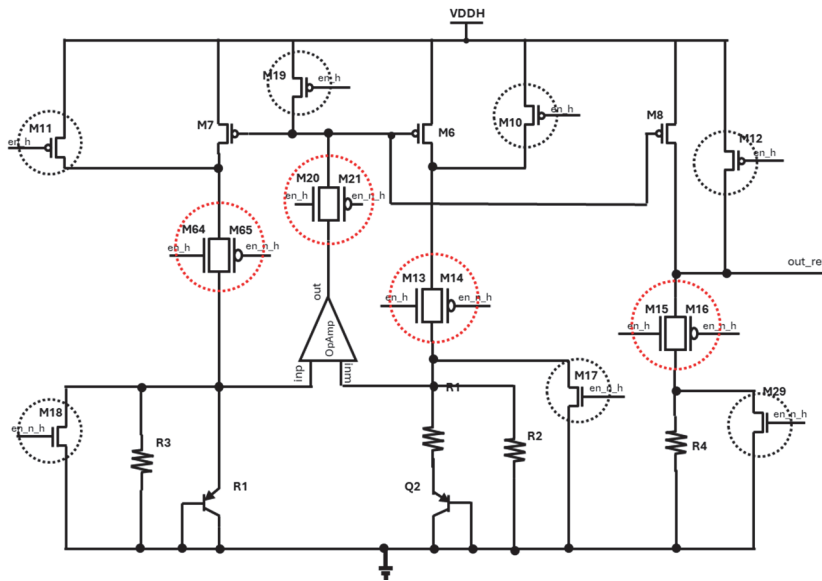


Fig. 6. The scheme of the bandgap reference after modification

The effect of the added transistors preventing overvoltages is implemented as follows:

- Transistor M19 sets the gates of M6, M7, and M8 transistors to VDD in the power down mode, disabling them. Transistors M10, M11, and M12 set the drains of M6, M7, and M8 to VDD, respectively.

- Transistor M18 sets the emitter of the Q1 bipolar transistor to 0 in the power down mode. Additionally, the transistor pair M64-M65, serving as a transmission gate, disconnects the connection between the drain of M7 and the emitter of Q1 and resistor R3, preventing a short between VDD and VSS.

- Transistor M17 sets the second terminal of resistor R1 to 0 in the power down mode, while the transmission gate, consisting of transistors M13-M14, disconnects the drain of M6 from resistors R1 and R2, preventing a short between VDD and VSS.

- With transistor M29, the voltage drops across resistor R4 in the power down mode equalling to zero. The transistor pair M15-M16 disconnects the resistor from transistor M8, preventing a short.

At the output of the operational amplifier, a value of 0 is set in the power down mode using transistor M41 (Fig. 4). Additionally, the output of the operational amplifier is connected to the gates of transistors M6, M7, and M8 which in the power down mode are set to VDD by transistor M19 (Fig. 4), leading to a short between VDD and VSS. To address this, a transistor pair M20-M21 (transmission gate) is added to disconnect the connection between the operational amplifier output and the gates of transistors M6, M7, and M8.

The gates of the input differential pair transistors M30 and M31 are set to 0 in the power down mode using transistors M17 and M18. Transmission gates, consisting of transistor pairs M13-M14 and M64-M65, disconnect the inputs of the operational amplifier from transistors M6 and M7, respectively.

Conclusion. Circuits have been developed only using thin oxide devices. The aging effects are studied on a bandgap reference, operating in the power-down mode. It is observed that, with the standard architecture, aging seriously impacted the primary parameters of the amplifier, particularly in the power-down mode, due to the stress conditions affecting the thin oxide devices. New schematic solutions have been implemented to prevent the stress conditions on the devices due to aging degradation in a 10-year lifetime.

The summary table of the designed bandgap reference before and after the proposed design updates, with a 10-year aging is summarized in Table 2.

Table 2

Results of bandgap reference before and after the proposed design updates

Parametrs	Initial	Before modification	After modification
Gain (dB)	60.5	42.3	56.1
V_{ref} (mV)	800 ± 8	600 ± 40	750 ± 12
I_{ref} (mA)	0,25	0,19	0,24

REFERENCES

1. **Deutschmann B., Magrini F., & Klotz F.** Internal IC protection structures in relation to new automotive transient requirements // In 2011 8th Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits: IEEE. -2011, November. -P. 47-52. 2.
2. **Lorenz D.** Aging Analysis of Digital Integrated Circuits: Ph.D. Thesis / Technische Universitat Munchen. - Germany, 2012.
3. Design of Bandgap Reference Voltage Source with Low Temperature Drift and Low Offset / **Z. Li, M. Su, Y. Hu,** et al // 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. -2022. -P. 868 -872.
4. Galaxy Custom Designer Schematic Editor User Guide. - Synopsys Inc, 2014. - 236p.
5. **Razavi B.** Design of Analog CMOS Integrated Circuits.- 2nd edition. - Mc Graw Hill India, 2017. – 782p.
6. Hspice Reference Manual. Synopsys Inc, 2017. -846p.
7. **Melikyan V., Martirosyan M., Piliposyan G.** 14nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future // Proceedings of the 7th Small Systems Simulation Symposium.- 2018. - Niš, Serbia, February 12-14, 2018. - P. 37-41.

Yerevan state university. “Synopsys Armenia” CJSC. The material is received on 29.01.2025.

Գ.Ա. ՈՍԿԱՆՑԱՆ

ԲԱՐԱԿ ՕՓՄԻՂԻ ՇԵՐՏՈՎ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐՆԵՐՈՎ ՀԵՆԱԿԱՅԻՆ ԼԱՐՄԱՆ ԱՂԲՅՈՒՐԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ

Ներկայումս ԿՄՕԿ (կոմպլեմենտար մետաղ-օքսիդ կիսահաղորդիչ) տեխնոլոգիայի տարրերի չափերը հասել են կրիտիկականի: Արդյունքում սկսում են ի հայտ գալ նախկինում աննշան ֆիզիկական երևույթներ, որոնց ազդեցությունը ավելի բարձր տեխնոլոգիական մակարդակներում աննկատ էր: Սնման լարումները համապատասխան կերպով չեն մասշտաբավորվում, փականի դիելեկտրիկի հաստությունը փոքրանում է, ինչի արդյունքում սարքերը ենթարկվում են ուժեղ էլեկտրական դաշտի ազդեցության՝ առաջացնելով սթրես տրանզիստորներում և հուսալիության նվազում:

Առաջարկվում է նախագծման մեթոդ, որը թույլ է տալիս ստեղծել հենակային լարման աղբյուր՝ օգտագործելով միայն բարակ օքսիդի շերտով տրանզիստորներ, որոնք պաշտպանված են սթրեսային պայմաններից և ապահովում են սխեմայի բարձր հուսալիություն:

Առանցքային բառեր. ԿՄՕԿ, սթրես, հուսալիություն, ծերացում, բարակ օքսիդի շերտով տրանզիստոր, հենակային լարման աղբյուր:

Г.А. ВОСКАНИЯ

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО
НАПРЯЖЕНИЯ С ТОНКИМИ ОКСИДНЫМИ СЛОЯМИ
ТРАНЗИСТОРОВ**

В настоящее время размеры элементов технологии КМОП (комплементарный металл-оксид-полупроводник) уменьшаются до критических размеров. В результате начинают проявляться ранее незначительные физические явления, влияние которых было несущественным на более высоких размерах технологий. Питательное напряжение не уменьшается пропорционально, а толщина диэлектрика затвора уменьшается, подвергая устройства более сильным электрическим полям, что вызывает напряжение на транзисторах и снижает их надежность.

Предлагается метод проектирования опорного источника напряжения с использованием только тонких оксидных приборов, которые обладают улучшенной надежностью схемы и защищены от условий напряжения.

Ключевые слова: КМОП, стресс, надежность, старение, транзистор с тонким оксидом, опорный источник напряжения.

H.H. SAHAKYAN

A NOVEL PVT-TRACKING POWER SUPPLY DETECTION CIRCUIT FOR RELIABLE LEVEL SHIFTER OPERATION IN MULTI-VOLTAGE ICs

In modern integrated circuits (ICs) operating across multiple supply voltage domains, precise power sequencing is essential to ensure reliable system initialization and prevent undefined behavior during power-up and transient conditions. Power-On Reset (POR) and Power-Good (PG) circuits are commonly employed to monitor supply voltages and signal when power levels are stable and within operational ranges. These signals gate critical functions such as level shifter enabling, state machine initialization, and downstream circuit activation. However, the conventional design of POR and PG circuits often involves significant overdesign to guarantee robust performance across the wide range of Process, Voltage, and Temperature (PVT) variations present in advanced semiconductor manufacturing nodes. A novel power detection approach is proposed with simplified design and PVT resilient behavior that ensures the reliable operation of the level shifting circuits with defined failure states. The proposed methodology is implemented and verified using the SAED 14nm FinFET technology.

Keywords: power detection, reliability, level shifter, multi-voltage IC.

Introduction. In mixed-signal and analog integrated circuits, level shifters play a crucial role in converting low-voltage digital control signals into high-voltage signals required for driving key analog functions [1-3]. These level shifters interface between distinct voltage domains, ensuring that digital control logic can effectively interact with high-voltage analog circuitry (Fig. 1) [4-6].

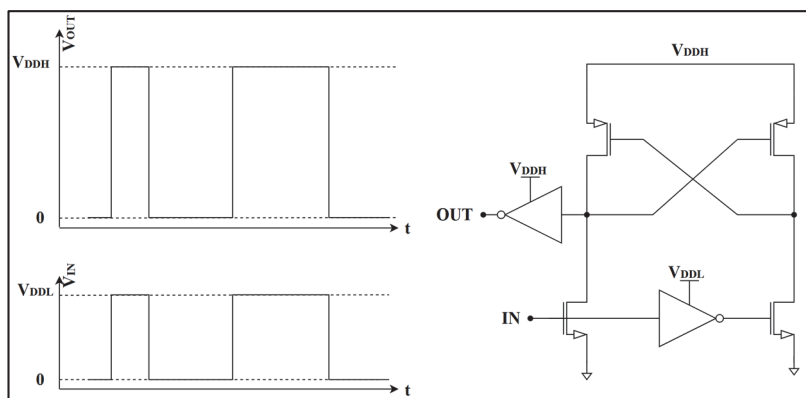


Fig. 1. The classical level shifter topology (right) and its normal operation (left)

However, for level shifters to operate correctly, both the high-voltage supply (VDDH) and low-voltage supply (VDDL) must remain within a specific operational range [7]. If either voltage deviates too far from its intended level, the level shifter can enter an undefined state, where the output does not reliably correspond to the input. This can lead to scenarios where a logic ‘0’ at the input results in a logic ‘1’ at the output, inadvertently enabling sensitive analog blocks and causing unpredictable circuit behavior.

Traditional level shifters are highly sensitive to PVT variations due to their simple design; hence the failure conditions can vary significantly (Fig. 2). Adjusting the Power-Good level for the worst failure case is generally a necessary compromise of design efficiency in favor of reliability.

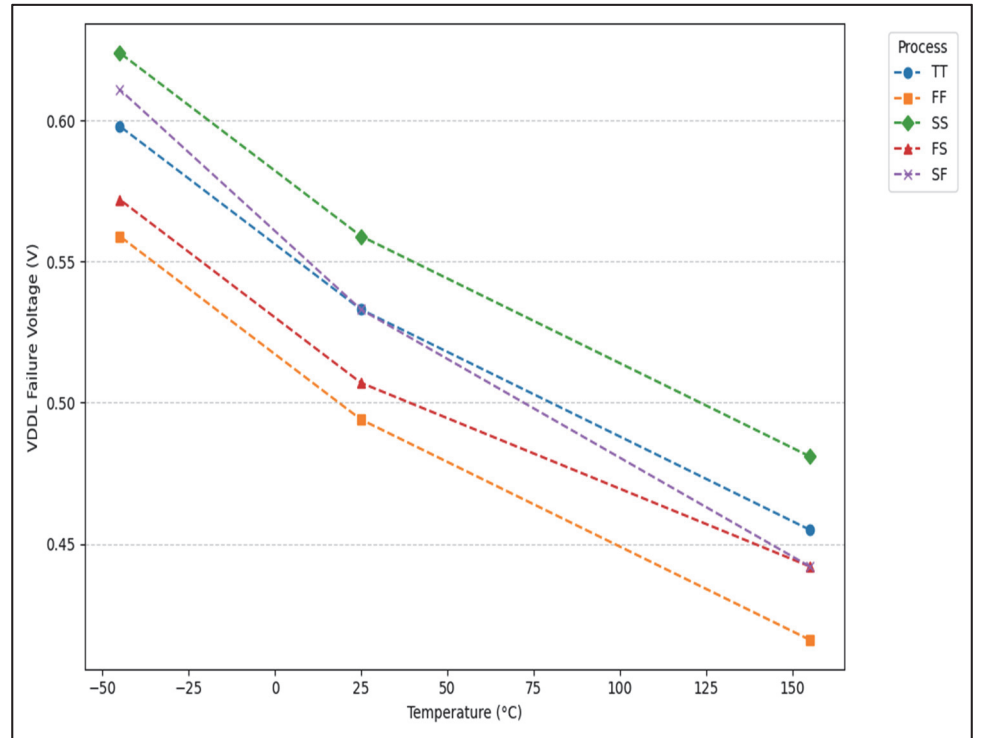


Fig. 2. VDDL failure voltage of the level shifter for VDDH=1.8V

To mitigate these risks, it is necessary to establish a well-defined operating range for both VDDH and VDDL that guarantees the correct functionality of level shifters under all conditions. A robust power detection system must be designed to monitor these supply voltages and ensure that level shifters are only enabled when both VDDH and VDDL are within their reliable operational range [8,9]. When the supply conditions fall outside this range - whether due to power-up sequencing

variations, brownout events, or transient power glitches - the power detection circuit must disable the level shifters, preventing them from outputting erroneous signals. This ensures that, regardless of power sequencing order or supply fluctuations, the level shifters will either function correctly or remain safely disabled, thereby enhancing the reliability of the entire analog subsystem and preventing unintended activation of sensitive analog circuits.

The proposed approach. To minimize the overhead, the power detection system can utilize a detection level with a negative temperature slope. This will offer less overcompensating detection at higher temperatures, while still maintaining large overhead at fast process corners (Fig. 3) [10,11].

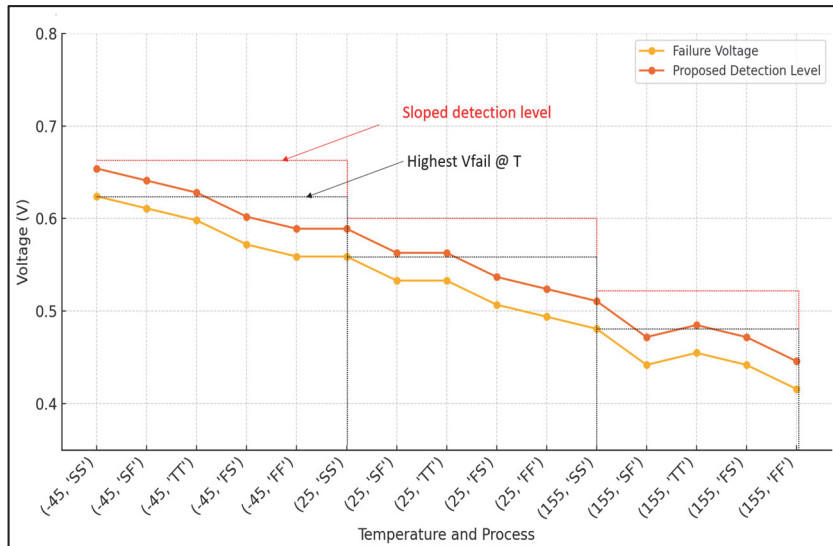


Fig. 3. Failure voltage and the proposed PVT tracking detection level

Following not only temperature but also process variations is necessary in order to minimize the voltage overhead completely. The proposed circuit does this by introducing minimal modifications in the existing level shifter circuit (Fig. 4). The modifications should ensure the predictable failure state of the circuit, whilst maintaining the PVT response of the level shifter.

The addition of N3 adds slight asymmetry in the DC characteristics of the circuit and ensures that it will fail at marginally higher voltages than the symmetric level shifter structure. N4 and N5 thick gate oxide transistors ensure that the N1, N2 and N3 core devices are not subjected to overvoltage stress. The P<100:7> chain of p-channel transistors in series acts as a weak pull-up path for the pre-buffered output. The gates of these devices are controlled by VDDL, so that as the difference between high and low supply voltages grow – the pull up path

conductance increases and accelerates the PG release. The input signal can either be tied high to VDDL or controlled by an enable signal. The design is implemented in SAED 14nm FinFET technology but the proposed approach is not unique to this process and can be used universally [12].

Fig. 4. The proposed power detection circuit

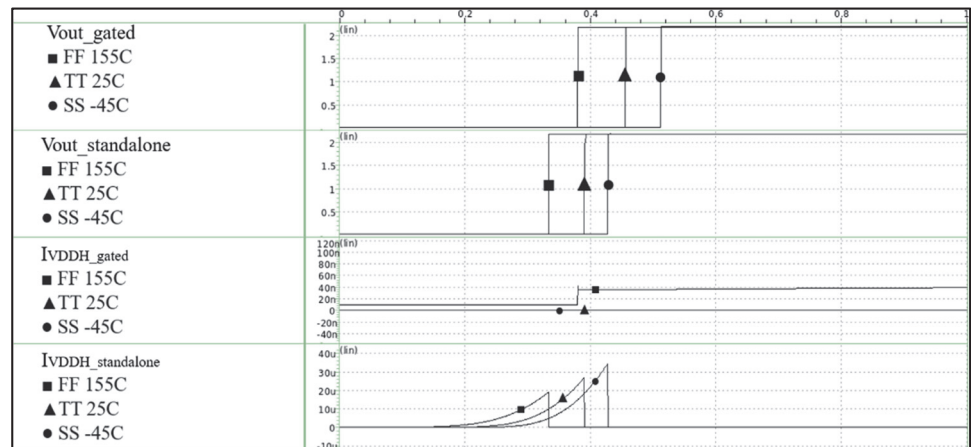


Fig. 5. DC response of standalone and gated level shifters

the desired PVT tracking behavior and enough headroom to account for mismatch variations (Fig. 6).

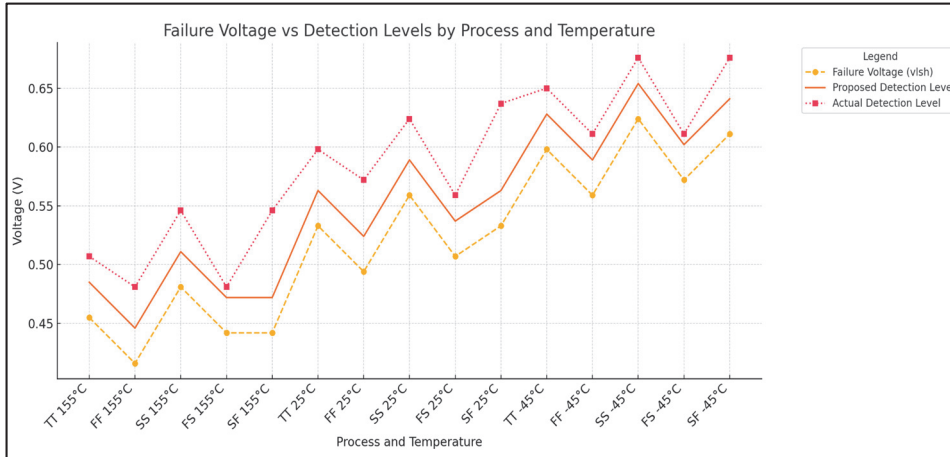


Fig. 6. Failure voltage, the proposed and simulated detection levels

Monte Carlo statistical mismatch simulations are performed using sigma amplification targeting 5 σ coverage. This ensures over 99.9999% yield or less than 1 defective part per million. The difference between failure detection voltage and level shifter failure voltage are positive in all iterations (Fig. 7).

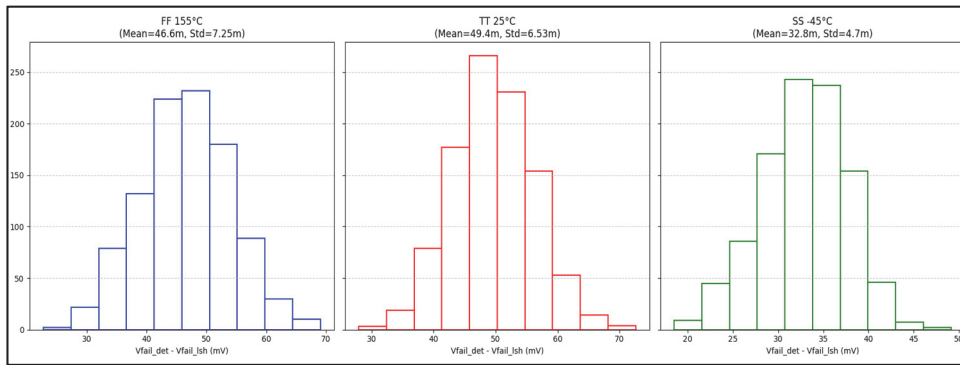


Fig. 7. 5 σ mismatch simulation results

Results. The implemented design achieves the desired PVT tracking behavior, accurately detecting failure conditions and gating the level shifters before they get the chance to form an erroneous output. This is achieved by occupying an area roughly the size of three level shifters. Considering the commonality of level shifters in mixed-signal IPs, the addition of the detection circuit will not be a noticeable footprint increase next to the dozens if not hundreds of level shifters.

The main downside of the proposed approach is that it consumes static current during normal operation, meaning that the power supplies are within the operational range and PG=1 (Table).

Table

Power Timing and Area of the proposed power detection circuit

Process Corner	Area (μm^2)	Delay (ps)	Power (μW)
Fast	180	18.2	12.4
Nominal		30.1	7.2
Slow		74.8	3.8

Conclusions. A novel PVT tracking power supply detection circuit is proposed and implemented in the SAED 14nm FinFET technological process. The proposed circuit consumes moderate static power in order to maintain simple topology while offering robust power detection. The detector tracks the PVT behavior of level shifters and unlike traditional systems which offer robust performance by overdesigning the circuit for the worst corner performance. This is achieved by introducing slight asymmetries in the level shifter design via weak pull up paths and mismatched input transistors. The design is verified against PVT and also industry grade 5σ mismatch variation. Compared to traditional power detection circuits it's also smaller in size as it does not employ reference voltage generators or differential amplifiers.

REFERENCES

1. **Li Y., Zhao J., Liu Y., and Wang G.** A Comprehensive Study on the Design Methodology of Level Shifter Circuits // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. - Jan. 2023. - Vol. 70, no. 1. - P. 302-314, doi: 10.1109/TCSI.2022.3213981.
2. **Li, Qinqin & Xing, Caiting & Tong, Xingyuan.** Voltage Detection Circuit with Delay for Power Management Circuits. - 2022. - P. 72-75. 10.1109/ICICM56102.2022.10011273.
3. **Manoj, Kumar & Arya, Sandeep & Pandey, Sujata.** Level Shifter Design for Low Power Applications // International Journal of Computer Science & Information Technology. 2. - 2010. - 10.5121/ijcsit.2010.2509.
4. **Hong, Jiwoo & Kim, Sunghoon & Jeon, Dongsuk.** An Automatic Circuit Design Framework for Level Shifter Circuits // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. - 2022. - P. 1-1. 10.1109/TCAD.2022.3155444.
5. **Vaishnavi S., Abbas T.M., and Ragesh A.** Design and Analysis of Level Shifter in High Voltage Transmitter // International Journal of Scientific and Research Publications. - Jan. 2014. - Vol. 4, no. 1. - P. 1-5
6. **Bandil Kishan, Sharma K.K.** Design and Implementation Low Power Consumption Level Shifter // International Journal of Scientific Research & Engineering Trends. - 2020. - Vol. 6, issue 6, ISSN (Online): 2395-566X

7. **Sudhakar, Muppidi Venkata, and Ovidiu Petru Stan.** Implementation of High-Speed Compact Level-Up Shifter for Nano-Scale Applications // Electronics. - 2023. – 12, no. 24: 5015. <https://doi.org/10.3390/electronics12245015>
8. **Taraporewalla, Jehan & Saha, Dipankar.** A New 22 nm ULPLS Architecture to Detect 70 mV Minimum Input, Suitable for IOT Applications. - 2023. - 10.48550/arXiv.2302.08553.
9. **Tankimanova A., Maan A. K. and James A. P.** Level-shifted neural encoded analog-to-digital converter // 2017 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). - Batumi, Georgia, 2017. - P. 377-380, doi: 10.1109/ICECS.2017.8292026.
10. **Sahithi, P & Kakarla, Hari & Raghuvveera, Ediga & Krishna, Gopi.** Design of voltage level shifter for power-efficient applications using 45nm technology // International Journal of Engineering & Technology. - 2018. - 7103.10.14419/ijet.v7i2.8.10339.
11. **Reato, Eros & Palacios Mahave, Paula & Uzlu, Burkay & Elsayed, Mohamed.** Zero Bias Power Detector Circuits based on MoS 2 Field Effect Transistors on Wafer - Scale Flexible Substrates // Advanced Materials. - 2022. - 34.-2108469. 10.1002/adma.202108469.
12. **Melikyan Vazgen, Martirosyan Meruzhan, Melikyan Anush, Piliposyan Gor.** 14nm Educational Design Kit: Capabilities, Deployment and Future // Proceedings of the 7th Small Systems Simulation Symposium. Niš, Serbia, February, 2018. - P. 37-41.

National Polytechnical University of Armenia. “Synopsys Armenia” CJSC. The material is received on 03.02.2025.

Հ.Հ. ՄԱՀԱԿՅԱՆ

ԼԱՐՄԱՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՓՈԽԱՐԿԻՉՆԵՐԻ ՀՈՒՍԱԼԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԸ ԲԱԶՄԱԼԱՐՈՒՄՄԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐՈՒՄ ԱՊԱՀՈՎՈՂ, ԳԼՋ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻՆ ՀԵՏԵՎՈՂ ՄՆՈՒՑՄԱՆ ԼԱՐՄԱՆ ՀԱՅՏՆԱԲԵՐՄԱՆ ՇՂԹԱ

Ժամանակակից ինտեգրալ սխեմաներում (ԻՍ), որոնք աշխատում են բազմաթիվ սնուցման լարումների միջոցով, հստակ սնուցման լարման հաջորդականությունը կարևոր է համակարգի հուսալի մեկնարկի, սնուցման և անցումային պայմանների դեպքում անորոշ վարքագծի կանխարգելման համար: Սովորաբար կիրառվում են սխեմաներ, որոնք վերահսկում են սնուցման լարումները և ազդանշան տալիս, երբ լարման մակարդակները կայուն են և գտնվում են գործառության սահմաններում: Այս ազդանշանները կառավարում են կարևոր գործառույթներ, ինչպիսիք են լարման մակարդակի փոխարկիչների ակտիվացումը և ներքին շղթաների միացումը: Մակայն այս գործառույթներն ապահովող ավանդական սխեմաների նախագծումը հաճախ պահանջում է նախագծման զգալի կրկնակներ՝ ապահովելու հուսալի աշխատանքը արտադրական գործընթացի, լարումային և ջերմաստիճանային (ԳԼՋ) փոփոխությունների լայն տիրույթում, որոնք առկա են առաջավոր կիսահաղորդչային արտադրական հանգույցներում: Առաջարկվում է նորարարական սնուցման լարման հայտնաբերման մեթոդ, որն ունի պարզեցված կառուցվածք և ԳԼՋ շեղումներին հետևող վարքագիծ, ապահովելով լարման մակարդակի փոխարկիչների հուսալի աշխատանքը: Առաջարկվող շղթան նախագծվել և մոդելավորվել է ՄԱՈՒԴ 14nm FinFET տեխնոլոգիայի կիրառմամբ:

Առանցքային բաներ. սնուցման լարման հայտնաբերում, հուսալիություն, լարման մակարդակի փոխարկիչ, բազմալարումային ԻՍ:

Г. Г. СААКЯН

**ПНТ-ОТСЛЕЖИВАЮЩАЯ СХЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ
ПИТАНИЯ ДЛЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УРОВНЯ
НАПРЯЖЕНИЯ**

В современных интегральных схемах (ИС), работающих в условиях нескольких доменов напряжения питания, точное управление последовательностью подачи питания имеет решающее значение для надежной инициализации системы и предотвращения неопределенного поведения во время включения и переходных процессов. Схемы Power-On Reset (POR) и Power-Good (PG) обычно используются для мониторинга напряжений питания и формирования сигнала, когда уровни напряжения стабильны и находятся в рабочих диапазонах. Эти сигналы управляют важными функциями, такими как включение уровневых преобразователей, инициализация конечных автоматов и активация последующих схем. Однако традиционное проектирование схем POR и PG часто требует значительного запаса по проектированию для обеспечения надежной работы в широком диапазоне изменений технологического процесса, напряжения и температуры (ПНТ), характерных для современных полупроводниковых производств. В данной работе предлагается новый подход к детектированию напряжения питания с упрощенной конструкцией и устойчивостью к ПНТ-изменениям, который обеспечивает надежную работу уровневых преобразователей с предсказуемым поведением в условиях отказа. Предложенная методология была реализована и проверена с использованием САУД $14nm$ FinFET технологии.

Ключевые слова: детектирование напряжения питания, надежность, преобразователь уровня напряжения, многовольтовая ИС.

UDC 621.3.049

MICROELECTRONICS

DOI: 10.53297/0002306X-2024.v77.3-357

V.A. SAHAKYAN, R.M. SOGHOMONYAN, M.K. BAGRATUNYAN,
D.K. MARUKHYAN, V.J. MARTIROSYAN

A HIGH PRECISION CMOS CURRENT SOURCE WITH EXTERNAL COMPONENTS

This paper presents a novel design technique aimed at improving the accuracy of on-chip reference current sources. The proposed approach leverages innovative circuit design methodologies to achieve enhanced precision and reliability in reference current generation. The proposed design technique offers a significant advancement in the field of on-chip reference current sources, providing a robust and accurate solution for various applications. The novel design technique has far-reaching implications for various applications, including analog-to-digital converters, digital-to-analog converters, and other mixed-signal systems. The improved accuracy and precision of on-chip reference current sources enabled by this approach can significantly enhance the overall performance and reliability of these systems. The proposed technique has been implemented in the design of on-chip reference current source circuit in 14 nm FinFet technology. Spice simulations performed for the developed circuit show less than 7% variation of the reference current in the $-40...125^{\circ}\text{C}$ temperature range considering the process variations in ± 3 sigma range.

Keywords: on-chip current source, current generators, calibration, initial current.

Introduction. In contemporary electronic systems, the need for high-precision and thermally stable current sources has become paramount, particularly in applications such as sensor signal conditioning, analog signal processing, and high-accuracy measurement systems [1]. High-precision current sources are indispensable components that deliver a constant current output with minimal deviation, thereby ensuring reliable performance in sensitive electronic circuits [2-4]. A crucial technical specification for modern complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) integrated circuits (ICs) is to guarantee high stability of the primary parameters, independent of ambient temperature, supply voltage, and technology-related deviations [5-7]. The main parameters of the elements can deviate from their typical characteristics by values ranging from tens of percent to multiples [1]. To mitigate these variations, high-precision current sources are designed to maintain a consistent output despite fluctuations in load resistance or supply voltage, thereby enhancing the overall accuracy of the system [8,9]. High-precision current sources are distinguished by their low noise, high stability, and excellent temperature

coefficients, rendering them suitable for applications in instrumentation, telecommunications, and industrial automation. The proliferation of portable devices has led to stringent requirements for energy consumption and IC surface area, thereby limiting the use of circuits with large surface areas and high energy consumption [2,3]. The design of high-precision current sources can be accomplished through various methods, including the utilization of operational amplifiers, transistor-based configurations, and integrated circuit solutions. Each approach presents distinct advantages and challenges, contingent upon the specific requirements of the application [4,5]. The availability of precision voltage sources does not guarantee the design of stable current sources. This is because the combination of resistance and a reference voltage source in the MOS structure is susceptible to resistance variation [6,7]. As technology advances, the integration of high precision current sources into compact and efficient designs continues to evolve, enabling new possibilities in the fields of electronics and instrumentation.

Statement of the problem. In the realm of electronic circuit design, achieving high precision in current sourcing remains a significant challenge. To mitigate the effects of temperature variations on the reference current, a mathematical model is proposed. This model enables to make accurate prediction and compensation of temperature-induced deviations, ensuring a stable and reliable reference current. The mathematical model takes into account the temperature-dependent behavior of the current, allowing for accurate prediction of current variations across different temperatures (Fig. 1). The model's ability to compensate for temperature variations ensures that the reference current remains accurate across a wide range of temperatures. The accurate and stable reference current provided by the mathematical model allows optimal system performance, even in the presence of temperature variations.

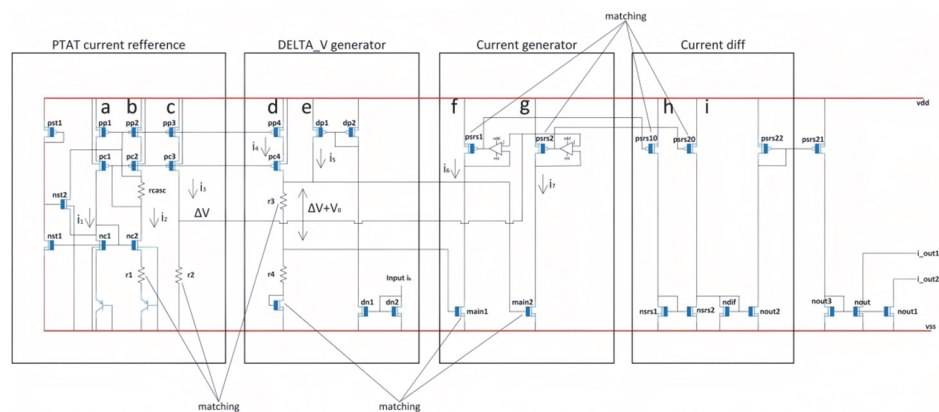


Fig. 1. The block diagram of a high-precision DC current source

Furthermore, the main two N-MOS transistors are deliberately sized to be larger than nominal to ensure robustness against fabrication-related deviations. In general, the implementation of two N-MOS transistors with increased dimensions can be an effective strategy to mitigate the effects of process variations encountered during semiconductor fabrication. This approach aims to enhance the robustness and reliability of the circuit by ensuring that the transistors can maintain their performance characteristics despite fluctuations in manufacturing parameters. However, while this method may provide a degree of improvement in performance consistency, it is not considered an optimal solution. The enlargement of transistor dimensions can lead to several trade-offs, including increased power consumption, larger die area, and potentially slower switching speeds due to increased capacitance. Therefore, while utilizing larger NMOS transistors can serve as a practical measure to address the process variations, it is essential to explore alternative design methodologies and optimization techniques that can achieve a more balanced performance profile. These may include the use of adaptive biasing, advanced layout techniques, or the incorporation of process compensation circuits, which can provide enhanced performance without the drawbacks associated with simply increasing the transistor size.

The proposed solution. The proposed method works by utilizing a simple current source and capacitor and a quartz or PLL generated stable frequency clock to provide a precise timing reference.

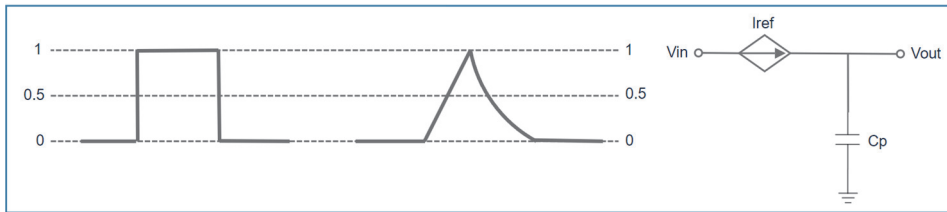


Fig. 2. A simple current source and capacitor in series

The equation for the output voltage in the proposed method for improving the accuracy of on-chip reference current sources is a crucial aspect of the design. The output voltage, $V_{out}(t)$, is given by the following equation (Fig. 2):

$$V_{out} = \frac{I_{ref} \times t}{C}.$$

The time required to charge the capacitor to a voltage of 0.5 V is expressed as:

$$t = \frac{C \times V_{ref}}{I_{ref}},$$

where I_{ref} represents the reference current that requires calibration.

Consider a scenario in which the capacitance (C) is specified as 57 pF , and the reference voltage V_{ref} is set to 0.5 V . In this case, the capacitor will be charged utilizing a current source. Given that the clock period (T) is constant, the reference voltage V_{ref} serves as the output voltage of a bandgap reference circuit, which is characterized by its high accuracy and stability. The capacitor in question exhibits high performance with respect to variations in temperature, supply voltage, and manufacturing process discrepancies. This stability is crucial for ensuring that the charging process remains consistent and reliable under varying operational conditions. The charging of the capacitor can be mathematically described by the relationship between the current supplied by the current source and the voltage across the capacitor. The precise calibration of the current source is essential to achieve the desired voltage level of 0.5 V across the capacitor within the specified time frame, thereby ensuring optimal performance of the overall system. This choice should however be adjusted based on two factors. The comparator must have high gain and low offset at the chosen reference level, and the bigger the capacitor area, the smaller its mismatch variation.

The block diagram of the current source consists of the following blocks:

Reference current generator which generates a stable reference current that is insensitive to temperature and supply voltage variations, digital controller which generates control signals to regulate the output current, current mirrors and capacitor with high accuracy (Fig. 3).

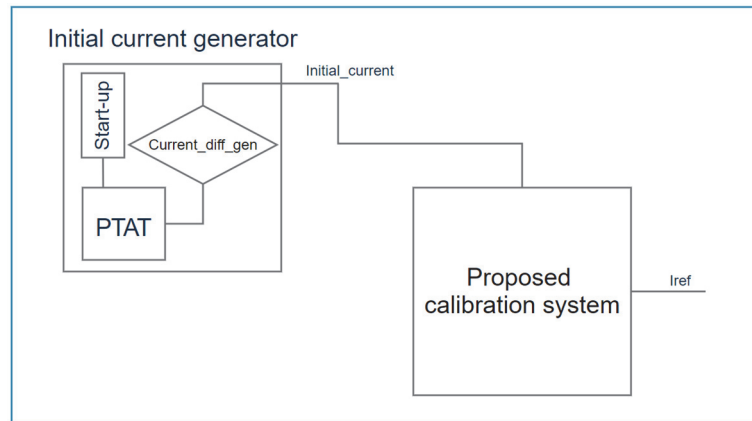


Fig. 3. The block diagram of the proposed high-precision current source

The proposed system incorporates a digitally programmable current source circuit, an 8-bit digital controller, a high-speed comparator, and an integrated capacitor. The current source transistors, highlighted in red, comprise eight binary-weighted parallel cascade current sources, with each branch controlled by a distinct

digital bit, thereby providing a programmable current value with high accuracy and resolution. The digital controller is a Mealy finite state machine (FSM) (Fig. 4).

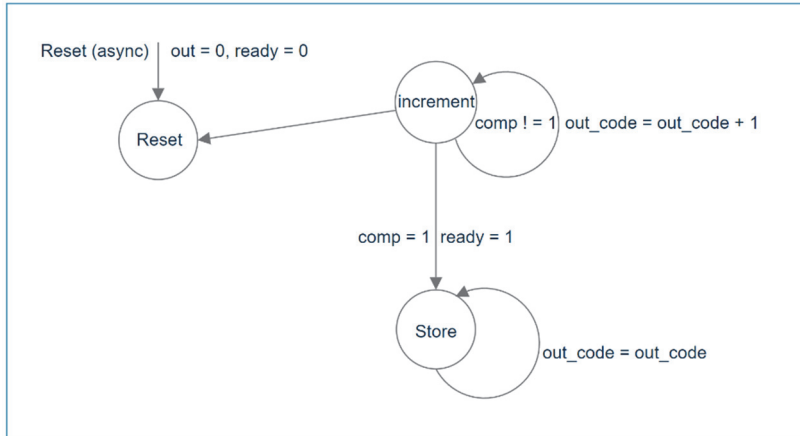


Fig. 4. The Mealy machine base for the digital controller

The controller clk, reset and comp as inputs and code_up[7:0], code_dn[7:0] and ready as outputs. It starts with a default code of zero, meaning that all the parallel current sources are disabled and the cap is charged with the current coming from internal current generator block. If the cap voltage reaches the desired value sooner than 128 input clock cycles, which is assumed to be a 128 MHz clock, then the current is larger than needed, dn_code is increased, cap voltage is reset and it starts charging with a smaller current. If the cap voltage reaches the desired value later than 128 input clock cycles then the current is smaller than needed, up_code is increased and the cap is charged with a larger current. This goes on until it takes exactly 128 clock cycles to charge the cap. After that the calibration process is stopped and the digital controller outputs 1 at its ready output and the code is held constant. Full implementation of the proposed method (Fig. 5).

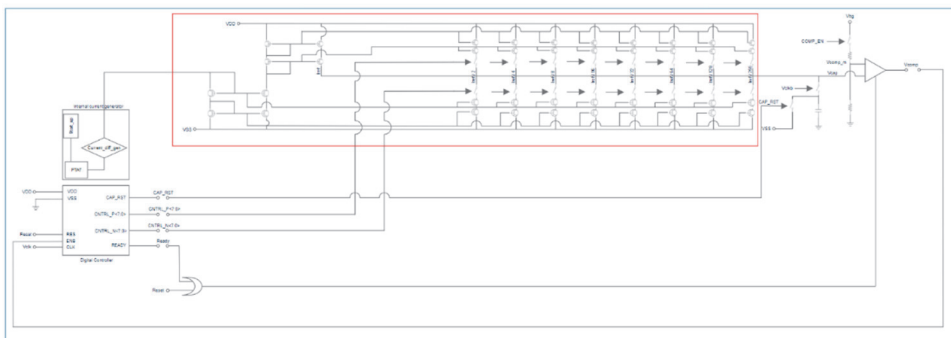


Fig. 5. The proposed current source and calibration system

The current source transistors are connected to the capacitor with switches facing the clock so that the parasitic capacitances don't add up and skew the calibration. To avoid wasting power during the idle period of operation, the comparator and the resistive divider that provides reference are disabled with COMP_EN signal. This signal is derived from $\neg(\text{Ready} \vee \text{Reset})$ and the comparator will only be enabled when both inputs are passive. The designed circuit requires 128 Mhz input clock. The capacitance value with these frequency and resistance in mind will be 57 pF, which is roughly 10200 μm^2 in this process:

$$C = \frac{28.5 \times 10^{-6} \times 10^{-6}}{0.5} = 5.7 \times 10^{-11} \text{ F}.$$

The digital controller is implemented in Verilog and synthesized and verified using Design Compiler and VCS respectively [6,7]. Physical design is implemented using IC Compiler 2 tool [8]. The rest of the proposed system consists of analog blocks and is implemented in Custom Compiler using schematic and layout editors. The capacitance is chosen to be significantly larger than the rest of the circuitry so that the parasitic capacitances will not have significant contribution to the total capacitance. The layout is designed according to all recommended design rules in order to minimize the variation and offset. The switches in the resistance bank are connected to the clock signal, while the other end is connected to the capacitor so as to minimize the added parasitic capacitance on the Vcap node.

Simulation results. To substantiate the findings derived from the theoretical analysis, a series of SPICE simulations have been conducted specifically for the 14 nm FinFET technology node. The dependence of the reference current of initial current generator on various stabilization factors has been thoroughly analyzed and evaluated. This investigation encompasses a comprehensive examination of the key parameters that influence the stability and accuracy of the reference current within the circuit design. The results show that the reference current variation for the -40...125°C temperature range considering the process variations in ± 3 sigma range and supply voltage variation in $\pm 10\%$ range is less than 12% (Fig. 6).

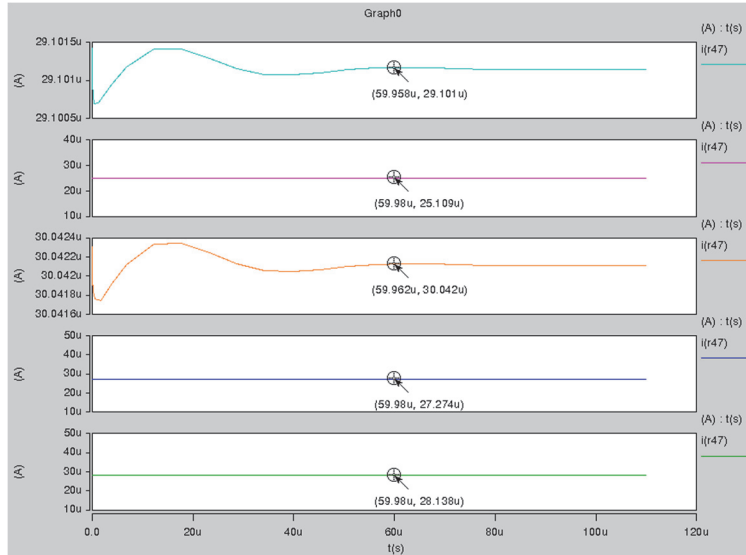


Fig. 6. The dependence of the output current on temperature, as well as supply voltage and technological changes

The simulation of the proposed circuit, utilizing a digital controller, is conducted under typical operating conditions. In this specific scenario, it is observed that the initial current output is measured at $15 \mu A$ (Fig. 7).

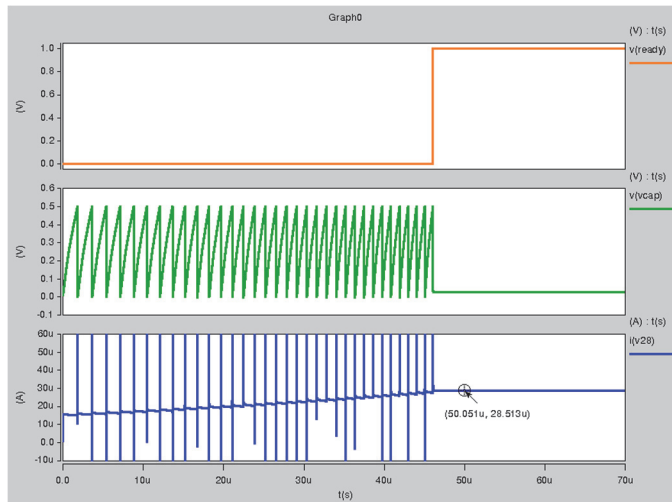


Fig. 7. The dependence of the reference current on the ambient temperature variation

The results show that the reference current variation for the $-40...125^{\circ}C$ temperature range considering the process variations in ± 3 sigma range and supply voltage variation in $\pm 10\%$ range is less than 7% (Fig. 8).

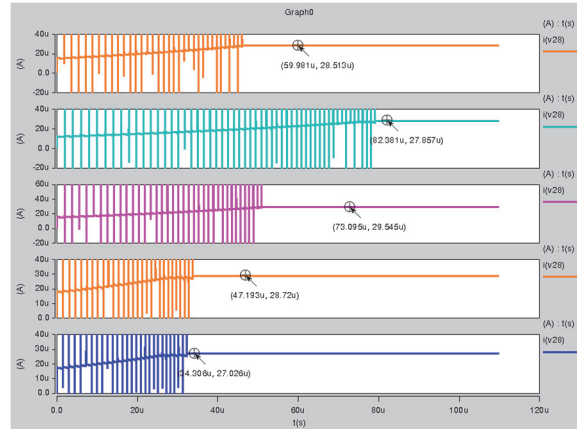


Fig. 8. The dependence of the output current on temperature, as well as supply voltage and technological changes

In summary, the findings confirm that the reference current variation remains below 7% across the specified temperature range, considering both process and supply voltage variations. This performance underscores the circuit's reliability and suitability for integration into a wide range of electronic applications, where maintaining accurate current levels is essential for optimal functionality.

Conclusion

In this paper, we present a novel design technique for on-chip current sources that has been proposed meticulously designed, and subjected to comprehensive simulation analysis. The results of these simulations indicate that the newly developed circuit is capable of delivering precise reference currents while maintaining operational stability across a wide temperature range of $-40\ldots125^{\circ}\text{C}$ and accommodating supply voltage variations of $\pm 10\%$. The innovative design approach focuses on enhancing the accuracy and reliability of the current source, addressing common challenges associated with temperature-induced drift and supply fluctuations. The simulations demonstrate that the proposed circuit can effectively limit the variation in output current to approximately $\pm 6\%$, thereby ensuring that the reference currents remain stable and within acceptable limits under varying environmental and operational conditions. The primary limitation of the proposed technique lies in the reliance on a digital controller, which introduces certain complexities and potential drawbacks in the overall circuit design. The integration of a digital controller necessitates additional components and circuitry, which can complicate the design process and may require careful consideration of timing and synchronization issues. Both requirements are deemed acceptable, particularly when considering the more relaxed specifications typically associated with certain segments of integrated circuits ICs.

REFERENCES

1. **Razavi B.** Design of Analog CMOS Integrated Circuits. - International Edition. -2001. - 928 p.
2. **Chen Zhao, Randall Geiger, Degang Chen.** A Compact Low-Power SupplyInsensitive CMOS Current Reference // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. - Seoul, Korea, 2012. -P. 2825 – 2828.
3. **Yoo C., and Park J.** CMOS current reference with supply and temperature compensation // ELECTRONICS LETTERS.- 6th December, 2007. - Vol. 43, No. 25. - P. 1422 -1424□
4. **Ilkka Nissinen, Juha Kostamovaara** A Low Voltage CMOS Constant Current - Voltage Reference Circui // International Symposium.- Volume 1: Circuits and Systems. – 2004. – P. 381 - 384.
5. Precision CMOS Current Reference with Process and Temperature Compensation/ **C. Azcona, B. Calvo, S. Celma, N. Medrano, M. Sanz** // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 2014. – P. 910 - 913.
6. **Rasoul Dehghani, and Atarodi S.M.** A New Low Voltage Precision CMOS Current Reference with No External Components // Engineering 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. – 2003. – Vol.1. – P. 156 - 159.
7. **Yu Peng, Yanchao Xia, Shaojun Wang.** Design of a High Precision Current Source // 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. – 2009. – Vol.1. – P. 1065 - 1069.
8. **Chen J.** A High-Precision On-Chip Current Source for Analog and Mixed-Signal Applications // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2018. – Vol. 53. – P. 931-941.
9. **Zhang Y.** A Low-Power On-Chip Current Source with High Accuracy and Stability // IEEE Transactions on Circuits and Systems.– 2018. –Vol. 65. –P. 1231-1240.

1-National Polytechnic University of Armenia, Institute of Radio Phisics and Electronics. “Synopsys Armenia” CJSC.

2-National Polytechnic University of Armenia. “Synopsys Armenia” CJSC.

3-Euopen University of Armenia, “Synopsys Armenia” CJSC. 4- Disgo Armenia CJSC. 5-RA Defence Ministry Academy named after V. Sargsyan. The material is received on 14.01.2025.

Վ.Ա. ՄԱՀԱԿՅԱՆ, Ռ.Մ. ՍՈՂՈՄՈՆՅԱՆ, Մ.Կ. ԲԱԳԴՍՏՈՒՆՅԱՆ,

Ղ.Կ. ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ, Վ.Զ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

**ԱՐՏԱՔԻՆ ԲԱՂԱԴՐԻՉՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ ԲԱՐՁՐ ՃՇԳՐՏՈՒԹՅԱՆԲ ԿՄՕԿ
ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՂԲՅՈՒՐ**

Առաջարկվել է ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրների ճշգրտության բարձրացման նոր եղանակ: Առաջարկվող եղանակով կիրառվում են սխեմաների նախագծման նորարարական մեթոդներ՝ ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրների ճշգրտության և հուսալիության

բարձրացման նպատակով: Առաջարկվող եղանակը զգալի առաջընթաց է ապահովում ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրների ոլորտում՝ ապահովելով կայուն և ճշգրիտ լուծում տարբեր համակարգերի համար: Բարձր ճշգրտությամբ ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրները զգալի ազդեցություն ունեն տարբեր համակարգերում, ինչպիսիք են անալոգաթվային և թվանալոգային ձևափոխիչները և այլ խառը ազդանշանային համակարգեր: Առաջարկվող եղանակով նախագծված ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուրը կարող է զգալիորեն բարձրացնել թվարկված համակարգերի ֆունկցիոնալությունը և հուսալիությունը: Առաջարկված եղանակն իրականացվել է 14նմ FinFet տեխնոլոգիական գործընթացով՝ ներբյուրեղային հենակային հոսանքի աղբյուրի մշակման համար: Կատարված spice նմանակման արդյունքում, ջերմաստիճանի $-40 \dots 125^{\circ}\text{C}$ միջակայքում, տեխնոլոգիական գործընթացի ± 3 սիգմա շեղումների դեպքում, մշակված սխեման ապահովել է հենակային հոսանքի 7%-ից պակաս շեղումներ:

Առանցքային բառեր. ներբյուրեղային հոսանքի աղբյուր, հոսանքի գեներատոր, հենակային հոսանք:

**В.А. СААКЯН, Р.М. СОГОМОНЯН, М.К. БАГРАТУНЯН,
Д.К. МАРУХЯН, В.Д. МАРТИРОСЯН**

ИСТОЧНИК КМОП ТОКА ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕШНИХ КОМПОНЕНТОВ

Представлена новая технология проектирования, направленная на повышение точности интегрированных источников опорного тока. Предлагаемый подход использует инновационные методы проектирования схем для достижения повышенной точности и надежности при генерации опорного тока. Предложенный метод проектирования обеспечивает значительный прогресс в области внутрикристалльных источников опорного тока, предоставляя надежное и точное решение для различных приложений. Новая технология проектирования имеет далеко идущие последствия для различных приложений, включая аналого-цифровые преобразователи, цифроаналоговые преобразователи и другие системы со смешанными сигналами. Повышенные точность и достоверность встроенных в кристалл источников опорного тока, обеспечиваемые этим подходом, могут значительно повысить общую производительность и надежность этих систем. Предложенный метод был реализован при проектировании схемы опорного источника тока на кристалле, выполненном по технологии FinFet 14 нм. Моделирование Spice, выполненное для разработанной схемы, показало менее 7% отклонения опорного тока в диапазоне температур $-40 \dots 125^{\circ}\text{C}$ с учетом отклонений процесса в диапазоне ± 3 сигма.

Ключевые слова: внутрикристалльный источник тока, генераторы тока, калибровка, начальный ток.

A.G. MANUKYAN

DESIGN AND UVM BASED VERIFICATION OF FTL MEMORY CONTROLLER

This paper presents the design and implementation of a memory controller based on FIFO-to-FIFO transfer level (FTL) design methodology, which lifts the abstraction level from RTL to value-passing semantics of FIFO to FIFO transactions, or mixed model where global communication is done with FTL and local modules can be implemented with lower level abstractions such as RTL. While FTL architectures provide a powerful framework for handling complex data transactions, verifying these designs poses significant challenges due to their intricate communication patterns and timing violations. For the functional verification of such systems, a special testing environment is needed where the data transfers with FIFO modules will be calculated. To create such a testing environment, the Universal Verification Methodology (UVM) is used, which makes it possible to perform testing that meets the modern requirements of digital circuits. The proposed method makes it is possible to test the FTL memory controller by increasing the test coverage to 100%.

Keywords: functional verification, UVM testbench, Memory Controller, Random access memory, FIFO-to-FIFO transfer level.

UMV. The Universal Verification Methodology is a standardized framework for functional verification that provides a comprehensive approach to verifying complex digital designs [1]. Developed to address the increasing complexity of modern semiconductor designs, UVM is built upon the IEEE 1800 SystemVerilog standard and incorporates the best practices in verification methodology. UVM emphasizes key principles such as reusability, standardization, and automation, making it a powerful tool for creating scalable and maintainable testbenches [2-5].

Introduction to FTL. FTL (FIFO to FIFO Transfer Level) transactions represent a design model that specifies data transactions through sequential processes, utilizing message-passing interfaces for non-blocking communication [6,7]. This model is particularly suited for managing complex data flows in digital systems by leveraging FIFO (First-In, First-Out) queues. In the FIFO Transfer Level (FTL) abstraction, FIFO queues replace traditional registers to handle data storage and transfer between various components. This design approach is advantageous in scenarios where data flow must be managed sequentially, ensuring that data is processed in the exact order it was received [8].

A key advantage of the FTL approach is its support for asynchronous data transfer. When transferring data from one module to another, the initiating module does not need to wait for a response from the receiving module. Instead, it can simply push data into the FIFO queue and continue processing other transactions or interacting with different modules. This asynchronous mechanism allows for greater flexibility and efficiency in data management, as the module can proceed with other tasks without being blocked by the data transfer process.

The use of FIFOs in the FTL abstraction streamlines data flow, enhances modularity, and allows for scalable system design. It supports precise control over data processing and reduces the risk of data corruption or loss, making it ideal for complex systems requiring reliable and efficient data handling.

One more advantage of FTL is its correct by constructions design pattern where design functionality is separated from data communication, which gives strong modularity to the design. Utilizing the FIFO-2-FIFO data transactions between the modules gives flexibility in design customization at every stage [9].

FTL Memory Controller. The FTL Memory Controller is a crucial component responsible for managing the flow of data between the system's FIFO (First-In-First-Out) buffer and the memory modules. It operates based on a finite state machine (FSM) with six distinct states: **IDLE**, **WAIT_ADDRESS_MODE**, **GET_ADDRESS_MODE**, **WAIT_TO_PUSH_DATA**, **WAIT_DATA**, and **GET_DATA**. The controller's primary functions include handling read and write operations, setting appropriate control signals, and managing data flow to and from the memory modules. The FSM diagram of FTL MEMORY CONTROLLER is shown in Fig. 1.

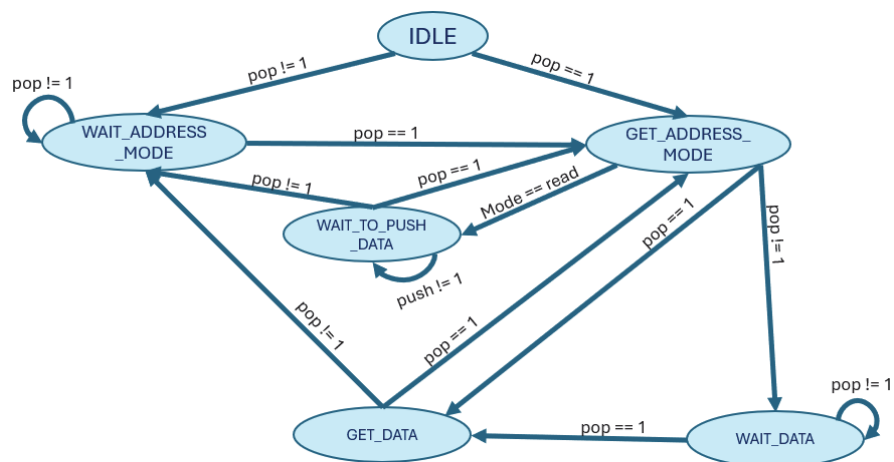


Fig. 1. FTL Memory Controller FSM

IDLE: The initial state where the controller inactivates MemoryEnable ports for all memories and awaits the arrival of a packet in the RX FIFO. If the RX FIFO is empty, the controller remains in the **WAIT_ADDRESS_MODE** state. Once the RX FIFO contains data, the controller transfers to the **GET_ADDRESS_MODE** state.

WAIT_ADDRESS_MODE: In this state, the controller waits for the first packet from the RX FIFO, which contains the MODE (either READ or WRITE) and the target memory address. If the RX FIFO remains empty, the controller stays in the **WAIT_ADDRESS_MODE** state. Upon receiving the packet, it transfers to the **GET_ADDRESS_MODE** state.

GET_ADDRESS_MODE: The controller processes the MODE and addresses information from the first packet. Based on the MODE:

- **WRITE Mode:** The controller sets the WriteEnable signal for the target memory module. If the RX FIFO has more data, the controller transitions to **GET_DATA**. If the RX FIFO is empty, it transfers to the **WAIT_DATA** state.

- **READ Mode:** The controller sets both MemoryEnable and ReadEnable signals for the target memory module and will move to **WAIT_TO_PUSH_DATA** state.

WAIT_TO_PUSH_DATA: In this state if the TX FIFO is full, the controller stays in the **WAIT_TO_PUSH_DATA** state. When TX fifo becomes not full controller will move to **GET_ADDRESS_MODE** state if RX FIFO is not empty or will move to **WAIT_TO_PUSH_DATA** when RX fifo is empty. Upon receiving the packet, it transitions to the **GET_ADDRESS_MODE** state.

WAIT_DATA: If the RX FIFO is empty, the controller remains in the **WAIT_DATA** state. Once the RX FIFO contains data, the controller transitions to the **GET_DATA** state.

GET_DATA: In this state, the controller retrieves the data packet from the RX FIFO for writing to the memory. After setting the MemoryEnable to 1, the controller writes the data into the designated memory module. If additional data packets are available in the RX FIFO, the controller transfers to the **GET_ADDRESS_MODE** state otherwise controller transfers to the **WAIT_ADDRESS_MODE** state.

Architecture of Memory Controller with multi memories. The memory controller is designed to interface with a ROM module as Instruction register and two RAM module as Stack and Data register of varying sizes and configurations:

- **Instruction Segment:** 128x8 ROM
- **Stack Segment:** 1024X32 SRAM
- **Data Segment:** 2048X32 SRAM

The memory controller is connected to the following three ROM and RAM memory modules, each with a unique configuration as shown in Fig. 2. Each of

these modules is independently controlled by the memory controller through dedicated control signals such as MemoryEnable and WriteEnable. The architecture is centered around efficiently managing read and write operations to these memory modules, using a combination of an address decoder, control logic, and a FIFO buffer to streamline data transactions.

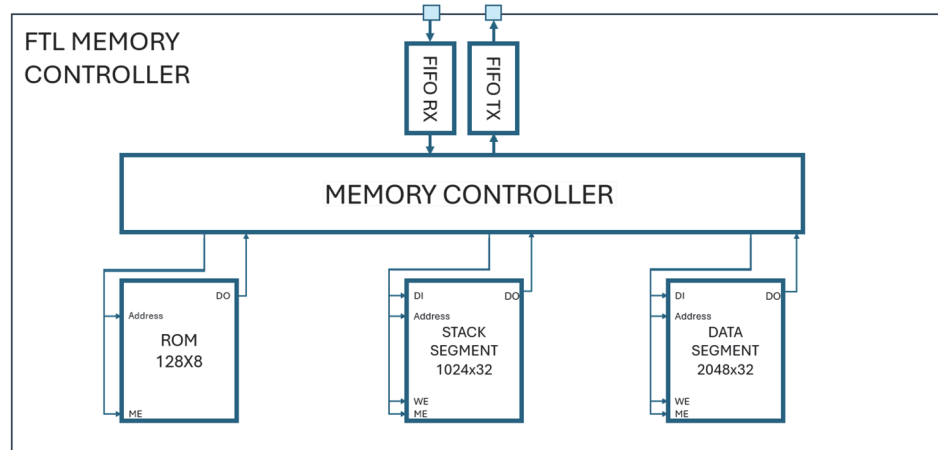


Fig. 2. Architecture of Memory controller with multi memories

UVM Testbench Architecture for FTL Memory Controller. The proposed testbench consists of an UVM environment and interface components to connect with the RX and TX FIFOs of the memory controller. Within the environment, an UVM Agent component is responsible for driving the verification process, which includes a UVM Driver that sends data packets to the RX FIFO, a UVM Sequencer that generates the sequences, and a UVM Monitor components that collects inputs and outputs from the RX and TX FIFO interfaces as shown in figure. These collected signals are then sent to the Scoreboard for comparison with expected data and to the Coverage component to evaluate the test coverage using UVM analysis ports.

The testbench is designed to generate random address and data sequences for comprehensive memory testing. It creates sequences to write data into and read data from memory, while also managing FIFO operations through push and pop signals. To ensure thorough validation of all aspects of the memory controller's functionality, multiple sequencers are utilized. These sequencers are responsible for managing the different types of memory operations and are started to manipulate the ROM and RAM memories. In Fig.3, a UVM-based testbench architecture of FTL memory controller is shown.

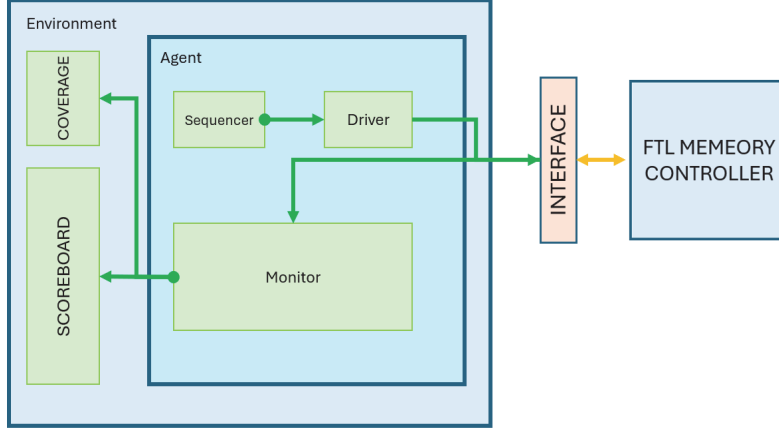


Fig. 3. UVM Environment Architecture of Memory Controller

For simulation different packets were created to validate all RX and TX FIFOs memory controller and sub memories. Using traditional methods to push WRITE_ADDRESS, WRITE_DATA and READ_ADDTESS packets to RX FIFO then pop read data from TX FIFO and compare with written data in scoreboard, we can achieve about 40% present of coverage:

$$read_data_{address(N)} = writte_data_{address(N)}.$$

To increase coverage by 20%, we used randomization to generate random address and push WRITE_ADDRESS, WRITE_DATA to RX FIFO multiple time to write all addresses in memories, then pushed READ_ADDRESS to RX FIFO with randomly generated addresses, then pop read the data from TX FIFO and compared with the written data kept in scoreboard. Using this techniques we can cover only about 60%. The remaining 40% are the cases where RX and TX FIFOs are full and the pushed data are in fifo queue:

$$read_data_{address(N)} = memory_{core[address]}.$$

The main challenge is to keep the written data in scoreboard for further comparison during read operation taking into account the number of the sent write/read packets to the DUT which can be data that can lead to overwritten of data in the same address. To do this the new mechanism is developed in scoreboard. The 2 dimensional SystemVerilog queue primitive was initiated with N+1 bit data width and M address length to keep the written data of the corresponding address in queue if the write packet has been sent or n+1 length of sequence of 1s if the read packet has been sent. The illustration of 2 dimensional SystemVerilog queue primitive is shown in Fig. 4.

Address N		READ	Data5	READ	Data4	Data3	Data2	Data1
Address N+1	Data4	READ	READ	READ	Data3	READ	Data2	Data1
Address N+2				READ	READ	READ	Data2	Data1

Fig. 4. Illustration of data packet keeping in scoreboard

$$read_data_{address(N)} = memory_{core[address][i]}, if i + 1 = READ.$$

When Pop is send to TX FIFO the popped data should be sent to the scoreboard where it will be compared with the last WRITTEN after the last READ data from the corresponding address queue. The address is also sent to the scoreboard via systemverilog queue primitive.

The simulation was conducted in edaplayground.com platform with Synopsys VCS, leveraging various techniques tailored to different aspects of the test cases. Random test cases are used to explore a broad spectrum of input conditions and validate the robustness of the memory controller, while directed test cases focus on specific scenarios to verify critical functionality and edge cases. This mixed approach is ensured thorough validation of the memory controller's performance and accuracy across diverse operating conditions. The System Verilog code of design and UVM implementation could be found in edaplayground.com/x/GVWx link. The simulation results are shown in Fig. 5.

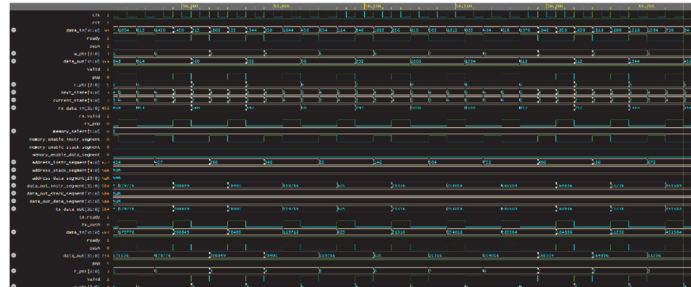


Fig. 5. Simulation Results

Table below shows a brief summary of features supported by ARMX generator comparing with other generators.

Table

Summary comparison of coverage and spend time of the used method

METHOD NAME	COVERAGE	TESTBANCH CREATION TIME
Direct Inputs	40%	VERY LONG
Randomization	60%	LONG
Purposed Method	100%	SHORT

Conclusion. Traditional verification methods often face challenges in addressing stringent timing constraints and achieving comprehensive functional coverage. In contrast, the proposed testbench effectively utilizes UVM's support for constraint randomization to accelerate testing and achieve high functional coverage in validation of FTL memory controller. By employing a combination of random and directed test cases, our methodology ensures, thorough validation, the FTL memory controller's functionality. Our results demonstrate that this approach not only meets verification requirements but also achieves 100% functional coverage for FTL memory controllers. The application of UVM randomization and its comprehensive framework significantly enhances both the reliability and efficiency of the verification process.

REFERENCES

1. Universal Verification Methodology (UVM) Class Reference Manual. - June 2014.
2. **Petrosyan O. and Manukyan A.** Functional Verification of Multiport SRAM Memories Based on UVM //2023 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – Batumi, Georgia, 2023.-P. 1-4.
3. **Melikyan V., Harutyunyan S., Kirakosyan A. and Kaplanyan T.** Uvm verification ip for axi // 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). - 2021.-P. 1-4.
4. Constructing Effective UVM Testbench by Using DRAM Memory Controllers / **R. Kabilan, R. Ravi, J.M. Esther, U. Muthuraman, et al** // 2022 Second International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS).-Coimbatore, India, 2022. – P. 1034-1038.
5. **Khalifa K. and Salah K.** Implementation and verification of a generic universal memory controller based on UVM // 2015 10th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS).- Napoli, Italy, 2015. P. 1-2.
6. Supradeep Narayana. On-chip communication hardware resources for globally asynchronous and locally synchronous systems // 8th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks (ISPAN'05). - Las Vegas, NV, USA, 2005. - P. 6.
7. "Taming heterogeneity - the Ptolemy approach" / **Johan Eker, Jorn Janneck, Edward A. Lee, Jie Liu, et al** // Proceedings of the IEEE.- 91(1). - 2003. - P. 127-144.
8. **Nagy L., Koscelánsky J. and Stopjaková V.** Design of a globally asynchronous locally synchronous digital system // 2014 IEEE 12th IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA).- Sary Smokovec, Slovakia, 2014. – P. 529-533.
9. Optimization of GALS CMP architecture with DCT as case study / **A.S. Menon, J.R. Gini, B. Aishwarya, C.C.G. Balaji, et al** // 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. - Kanyakumari, India, 2011. - P. 330-333.

National Polytechnical University of Armenia. “Synopsys Armenia” CJSC. The material is received on 07.10.2024.

Ա.Գ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

FTL ՀԻՇԱՍՏԱՐՔԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐԻՉԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ ԵՎ ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ՍՏՈՒԳՈՒՄԸ UVM ՄԵԹՈՂԱԲԱՆՈՒԹՅԱՄԲ

Ներկայացվում են հերթային բուֆերացվող տարրերի փոխանցման մակարդակով (ՀՖՏՓՄ) նախագծման մեթոդաբանության վրա հիմնված հիշողության կարգավորիչի նախագծումը և իրականացումը, որը բարձրացնում է ռեգիստրների փոխանցման մակարդակից (ՌՓՄ) FIFO մոդուլների վրա հիմնված փոխանցման վերացականության մակարդակը, որտեղ գլոբալ հաղորդակցությունը կատարվում է հերթային բուֆերացնող տարրերով, իսկ տեղական մոդուլներում՝ ՌՓՄ-ով: Այսպիսի համակարգերի ֆունկցիոնալ ստուգման համար անհրաժեշտ է հատուկ թեստավորման միջավայր, որտեղ հաշվարկված կլինեն տվյալների տեղափոխությունները հերթային բուֆերացնող մոդուլներով: Այդպիսի թեստավորման միջավայր ստեղծելու համար օգտագործվել է UVM մեթոդաբանությունը, որը հնարավորություն է տալիս կատարել թվային սխեմաների արդիական պահաջներին համապատասխանող թեստավորում: Առաջարկված մեթոդը հնարավորություն է տալիս ստուգելու ՀՖՏՓՄ հիշողության կարգավորիչը՝ թեստավորման ծածկույթը հասցնելով 100%:

Առանցքային բառեր. Ֆունկցիոնալ ստուգում, UVM թեստավորման միջավայր, հիշողության կարգավորիչ, օպերացիոն հիշողություն, FIFO-FIFO փոխանցման մակարդակ:

Ա.Գ. МАНУКЯН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ КОНТРОЛЛЕРА ПАМЯТИ FTL НА ОСНОВЕ UVM

Представлены проект и реализация контроллера памяти на основе методологии проектирования FTL (уровень передачи FIFO-to-FIFO), которая переводит уровень абстракции с RTL до семантики передачи значений транзакций FIFO-FIFO или смешанной модели, где глобальная связь осуществляется с помощью FIFO, а локальные модули могут быть реализованы с помощью абстракций более низкого уровня, таких как RTL. Хотя архитектуры FTL обеспечивают мощную структуру для обработки сложных транзакций, проверка этих конструкций создает значительные проблемы из-за их сложных схем связи и проблем своевременных транзакций. Для функциональной проверки таких систем необходима специальная тестовая среда, в которой будут рассчитываться передачи данных с помощью модулей FIFO. Для создания такой тестовой среды была использована методология UVM, которая позволяет выполнять тестирование, отвечающее современным требованиям цифровых схем. Предлагаемый метод позволяет тестировать контроллер памяти FTL, увеличивая покрытие до 100%.

Ключевые слова: функциональная верификация, тестовая среда UVM, контроллер памяти, оперативная память, FTL.

ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ս.Գ., ՎԱՍԻԼՅԱՆ Գ.Ա., ՄԻՄՈՆՅԱՆ Վ.Ա., ԱՂԲԱԼՅԱՆ Ա.Ս. ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ ՀԱԿԱՇՓԱԿԱՆ ՓՈՇԵԿՈՄՊՈԶԻՏԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ	
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ.....	255
ՄԵԼԻՔՍԵԹՅԱՆ Ն.Գ., ԱՍՉՅԱՆ Գ.Հ., ԹԱՂԵՎՈՍՅԱՆ Տ.Շ. ՊԱՀԱՆՋՎՈՂ ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ ՇՓԱԿԱՆ ԱՍԲԵՍՏԱԶԵՐԾ ՆԵՐԴԻՐՆԵՐԻ ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ.....	272
ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Լ.Ա., ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ Կ.Վ. ԳԵՏԱՅԻՆ ՏԻՊԻ ԿՈՆՍԵՐՎԱՅՎԱԾ ՊՈԶԱՄԲԱՐՆԵՐԻՑ ՊՈԶԵՐԻ ՀԵՌԱՅՄԱՆ ՄԱՐՔԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄԸ.....	283
ՄԱՐՈՒԹՅԱՆ Ո.Զ., ԴԱՎԹՅԱՆ Ն.ՅՈՒ. ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐԻ ՊԻՏԱՆԻՈՒԹՅԱՆ ԱՐԱՏՈՐՈՇՄԱՆ ՏԵՍԱՆԿՅՈՒՆԻՑ.....	293
ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Ա.Ա., ԱՎՈՅԱՆ Ռ.Հ., ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ Գ.Պ. ԴՅՈՒՐԱԿԻՐ ԶՐԱԾՆԱՅԻՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄԸ.....	301
ԱՎՈՅԱՆ Ռ.Հ. ԶՐԱԾԱՆՅԻՆ ԿՈՒՏԱԿԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՆ ՀԱՄԱԿՑՎԱԾ ԻՆՔՆԱՎԱՐ ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԿԱՅԱՆԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ.....	308
ԳԱԼՍՏՅԱՆ Դ.Ս. ՀԻԵՐԱՐԽԻԿ ԲԱԶՄԱՍՈՂԱԼ ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐ՝ ՆՇԱՆՆԵՐԻ ԼԵԶՎԻ ՃԱՆԱՉՄԱՆ ՀԱՄԱ.....	315
ՂՈՒԿԱՍՅԱՆ Ս.Ա., ՊԱՊՅԱՆ Է.Տ., ԻՎԱՆՅԱՆ Ռ.Ա., ՄԿՐՏՉՅԱՆ Ս.Ս., ՈՍԿԱՆՅԱՆ Գ.Ա. ԲԱՐՁՐԻՑ ՑԱԾՐ ԼԱՐՄԱՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՓՈԽԱԿԵՐՊՉՈՒՄ ՏՐԱՆՁԻՍՏՈՐՆԵՐԻ ԾԵՐԱՑՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐԻ ՆՎԱԶԵՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ.....	322
ՂԱԶԱՐՅԱՆ Ա.Ա. ՏԱԿՏԱՅԻՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ՇԵՂՄԱՆ ՕՊՏԻՄԱԼԱՅՈՒՄԸ ԴԻՖԴԵՐԵՆՑԻԱԼ ՄՈԴԵԼՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ.....	331
ՈՍԿԱՆՅԱՆ Գ.Ա. ԲԱՐԱԿ ՕՔՍԻԴԻ ՇԵՐՏՈՎ ՏՐԱՆՁԻՍՏՈՐՆԵՐՈՎ ՀԵՆԱԿԱՅԻՆ ԼԱՐՄԱՆ ԱՂԲՅՈՒՐԻ ՀՈՒՍԱԼԻՈՒԹՅԱՆ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ՄԵԹՈԴ.....	339

ՄԱՀԱԿՅԱՆ Հ.Հ.

ԼԱՐՄԱՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿԻ ՓՈԽԱՐԿԻՉՆԵՐԻ ՀՈՒՍԱԼԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԸ ԲԱԶՄԱԼԱՐՈՒՄԱՅԻՆ ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՆԵՐՈՒՄ ԱՊԱՀՈՎՈՂ, ԳԼՋ ՇԵՂՈՒՄՆԵՐԻՆ ՀԵՏԵՎՈՂ ՍՆՈՒՑՄԱՆ ԼԱՐՄԱՆ ՀԱՅՏՆԱԲԵՐՄԱՆ ՇՂԹԱ.....	349
--	-----

**ՄԱՀԱԿՅԱՆ Վ.Ա., ՍՈՂՈՄՈՆՅԱՆ Ռ.Մ., ԲԱԳՐԱՏՈՒՆՅԱՆ Մ.Կ.,
ՄԱՐՈՒԽՅԱՆ Դ.Կ., ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ Վ.Զ.**

ԱՐՏԱՔԻՆ ԲԱՂԱԴԻՉՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՍԲ ԲԱՐՁՐ ՃՇԳՐՏՈՒԹՅԱՆԲ ԿՍՕԿ ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՂԲՅՈՒՐ.....	357
---	-----

ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ Ա.Գ.

FTL ՀԻՇԱՍՍԱՐՔԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐԻՉԻ ՆԱԽԱԳԾՈՒՄԸ ԵՎ ՖՈՒՆԿՑԻՈՆԱԼ ՍՏՈՒԳՈՒՄԸ ՍՎՄ ՄԵԹՈԴԱԲԱՆՈՒԹՅԱՄԲ.....	367
---	-----

СОДЕРЖАНИЕ

АГБАЛЯН С.Г., ВАСИЛЯН Г.А., СИМОНЯН В.А., АГБАЛЯН А.С. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ОСОБЕННОСТИ.....	255
МЕЛИКСЕТАН Н.Г., АСЧЯН Г.О., ТАДЕВОСЯН Т.Ш. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЗАСБЕСТОВЫХ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК С ТРЕБУЕМЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ	272
МАНУКЯН Л.А., АРУТЮНЯН К.В. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА УДАЛЕНИЯ ХВОСТОВ ИЗ ЗАКОНСЕРВИРОВАННЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ РЕЧНОГО ТИПА	283
МАРУХЯН В.З., ДАВТЯН Н.Ю. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА ПОВЕРХНОСТНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИГОДНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ	293
ВАРДАНИЯН А.А., АВОЯН Р.О., ВАРДАНИЯН Г.П. РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ПОРТАТИВНОГО ВОДОРОДНОГО ГЕНЕРАТОРА.....	301
АВОЯН Р.О. РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ С ВОДОРОДНОЙ СИСТЕМОЙ НАКОПЛЕНИЯ	308
ГАЛСТЯН Д.М. ИЕРАРХИЧЕСКИЙ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМЕР ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЯЗЫКА ЖЕСТОВ	315
ГУКАСЯН С.А., ПАПЯН Е.Т., ИВАНЯН Р.А., МКРТЧЯН С.С., ВОСКАНЯН Г.А. МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ЯВЛЕНИЯ СТАРЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ В КОНСТРУКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ВЫСОКОГО УРОВНЯ НА НИЗКИЙ	322
КАЗАРЯН А.А. МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ПЕРЕКОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ДИФФУЗИИ.....	331
ВОСКАНЯН Г.А. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИСТОЧНИКА ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ТОНКИМИ ОКСИДНЫМИ СЛОЯМИ ТРАНЗИСТОРОВ	339
СААКЯН Г. Г. ПНТ-ОТСЛЕЖИВАЮЩАЯ СХЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ДЛЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ	349
СААКЯН В.А., СОГОМОНЯН Р.М., БАГРАТУНЯН М.К., МАРУХЯН Д.К., МАРТИРОСЯН В.Д. ИСТОЧНИК КМОП ТОКА ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕШНИХ КОМПОНЕНТОВ.....	357
МАНУКЯН А.Г. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ КОНТРОЛЛЕРА ПАМЯТИ FTL НА ОСНОВЕ UVM.....	367

CONTENTS

AGHBALYAN S.G., VASILYAN G.A., SIMONYAN V.A., AGHBALYAN A.S. DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING ALUMINUM ANTIFRICTION POWDER COMPOSITE MATERIALS AND THEIR CHARACTERISTICS	255
MELIKSETYAN N.G., ASCHYAN G.H., TADEVOSYAN T.Sh. DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR OBTAINING ASBESTOS-FREE BRAKE PADS WITH REQUIRED FUNCTIONAL PROPERTIES	272
MANUKYAN L.A., HARUTYUNYAN K.V. IMPROVEMENT OF THE DEVICE FOR REMOVING TAILINGS FROM DECOMMISSIONED RIVER-TYPE TAILING DAMS	283
MARUKHYAN V.Z., DAVTYAN N.YU. ANALYSIS OF THERMAL CALCULATION METHODS OF SURFACE CAPACITORS FROM THE PERSPECTIVE OF DETERMINING THE SUITABILITY OF CAPACITORS	293
VARDANYAN A.A., AVOYAN R.H., VARDANYAN G.P. DEVELOPMENT AND TESTING OF A PORTABLE HYDROGEN GENERATOR	301
AVOYAN R.H. DEVELOPMENT OF AN OFF-GRID SOLAR POWER PLANT INTEGRATED WITH A HYDROGEN STORAGE SYSTEM	308
GALSTYAN D.M. HIERARCHICAL MULTIMODAL TRANSFORMER FOR SIGN LANGUAGE RECOGNITION	315
GHUKASYAN S.A., PAPYAN E.T., IVANYAN R.A., MKRTCHYAN S.S., VOSKANYAN G.A. A MINIMIZATION METHOD FOR TRANSISTOR AGING INFLUENCE IN HIGH-TO-LOW VOLTAGE LEVEL CONVERTER DESIGN	322
GHAZARYAN A.A. THE SKEW MINIMIZATION METHOD USING DIFFUSION MODELS	331
VOSKANYAN G.A. THE RELIABILITY IMPROVEMENT METHOD FOR THE BANDGAP REFERENCE WITH THIN OXIDE TRANSISTORS	339
SAHAKYAN H.H. A NOVEL PVT-TRACKING POWER SUPPLY DETECTION CIRCUIT FOR RELIABLE LEVEL SHIFTER OPERATION IN MULTI-VOLTAGE ICs	349
SAHAKYAN V.A., SOGHOMONYAN R.M., BAGRATUNYAN M.K., MARUKHYAN D.K., MARTIROSYAN V.J. A HIGH PRECISION CMOS CURRENT SOURCE WITH EXTERNAL COMPONENTS	357
MANUKYAN A.G. DESIGN AND UVM BASED VERIFICATION OF FTL MEMORY CONTROLLER	367

ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

1. Աղբայան Ալլա Սուրենի կրտսեր գիտաշխատող, ՀԱՊՀ
Էլ. հասցե - aghbalyan@gmail.com
2. Աղբայան Սուրեն Գևորգի տ.գ.դ., պրոֆեսոր, Մետալուրգիայի և նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ
Էլ. հասցե - metalsur@polytechnic.am
3. Ասյան Գրիգոր Հովհաննեսի տ.գ.թ., ՀԱՊՀ
Էլ. հասցե - grigor_aschyan@rambler.ru
4. Ավոյան Ռոմիկ Հովհաննեսի ՀԱՊՀ ասպիրանտ
Էլ. հասցե - rom.avoyan@polytechnic.am
5. Բազրատունյան Մարիամ Կարապետի ՀԵՀ, Միկրոէլեկտրոնային սխեմաներ և համակարգեր, մասնագիտացված ինտեգրալ սխեմաների ֆիզիկական նախագծման փորձագետ ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - bagratun @synopsys.com
6. Գալստյան Դավիթ Մարատի ՀԱՊՀ ասպիրանտ, Ավտոմատացման համակարգերի ամբիոն, «Քելվոդ Սփերասոֆթ» ընկերության ծրագրավորող
Էլ. հասցե - galstyandavid1998@gmail.com
7. Դավթյան Նվարդ Յուրիկի ՀԱՊՀ ասպիրանտ, ՋԷ և ՇՄՊ ամբիոն
Էլ. հասցե - davtyannvard8@gmail.com
8. Թադևոսյան Տիգրան Շալիկոյի ՀԱՊՀ ասպիրանտ
Էլ. հասցե - tigtadevosyan84@gmail.com
9. Իվանյան Ռոման Արկադի ՀԱՊՀ մագիստրոս, Անալոգային նախագծման ավագ ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - ivanyan@synopsys.com
10. Հարությունյան Կարեն Վալերիկի ՀԱՊՀ հայցորդ, Լեռնային գործի և շրջակա միջավայրի պահպանության ամբիոն, «Զանգեզուրի պղնձամուխիթենային կոմբինատ» ՓԲԸ, ֆինանսական տնօրինության կապիտալ ներդրումների կառավարման գծով մենեջեր
Էլ. հասցե - harutyunyan.karen.v@gmail.com
11. Ղազարյան Արթուր Արայիկի ՀԱՊՀ ասպիրանտ
Էլ. հասցե - gartur@synopsys.com
12. Ղուկասյան Սևակ Արշակի տ.գ.թ., Միկրոէլեկտրոնային սխեմաների և համակարգերի ամբիոն, ՀԱՊՀ, անալոգային նախագծման ավագ վերահսկիչ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - ghukasya@synopsys.com

13. Մանուկյան Արման Գևորգի
 ՀԱՊՀ ասպիրանտ
Էլ. հասցե - arman.manukyan277@gmail.com
14. Մանուկյան Լևոն Անդրանիկի
 տ.գ.դ., դոցենտ, Լեոնային գործի և շրջակա միջավայրի պահպանության ամբիոն, ՀԱՊՀ
Էլ. հասցե - manukyanlevon-a@rambler.ru
15. Մարտիրոսյան Վարդգես Զիվանի
 ՀՀ ՊՆ Վ. Սարգսյանի անվան ռազմական ակադեմիայի դասախոս
Էլ. հասցե - mesropmartirosyan@gmail.com
16. Մարուխյան Դավիթ Կարենի
 ծրագրային ապահովման ճարտարագետ, «Դիսկո Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - marukh@gmail.com
17. Մարուխյան Ոստանիկ Զավենի
 տ.գ.թ., պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ պատվավոր պրոֆեսոր
Էլ. հասցե -
18. Մելիքսեթյան Նորիկ Գալուստի
 տ.գ.դ., պրոֆեսոր, ՀԱՊՀ Վանաձորի մասնաճյուղ
Էլ. հասցե - n_meliksetyan@mail.ru
19. Մկրտչյան Սոնա Մամվելի
 ՀԱՊՀ մագիստրոս, Անալոգային նախագծման ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - msona@synopsys.com
20. Ոսկանյան Գառնիկ Արմենի
 ԵՊՀ ասպիրանտ, անալոգային նախագծման փորձագետ ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - garnikv@synopsys.com
21. Պապյան Էդգար Տիգրանի
 ՀԱՊՀ մագիստրոս, Ֆիզիկական նախագծման ավագ ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա», ՓԲԸ
Էլ. հասցե - papyan@synopsys.com
22. Սահակյան Հրայր Հրաչյայի
 ՀԱՊՀ ասպիրանտ
Էլ. հասցե - hraysahakian@gmail.com
23. Սահակյան Վահան Ապրեսի
 ՀՀ ԳԱԱ, Ռադիոֆիզիկայի և էլեկտրոնիկայի ինստիտուտ, մասնագիտացված ինտեգրալ սխեմաների ֆիզիկական նախագծման փորձագետ ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - vahans@synopsys.com
24. Սիմոնյան Վիգեն Արմենի
 ՀԱՊՀ ասպիրանտ
Էլ. հասցե - vigensimonyan2017@gmail.com
25. Սողոմոնյան Ռազմիկ Մանվելի
 ՀԱՊՀ, Միկրոէլեկտրոնային սխեմաների և համակարգերի ամբիոն, մասնագիտացված ինտեգրալ սխեմաների ֆիզիկական նախագծման փորձագետ-ճարտարագետ, «Սինոփսիս Արմենիա» ՓԲԸ
Էլ. հասցե - razmiks@synopsys.com

- 26. Վասիլյան Գայանե Արտաշի** տ.գ.թ., դոցենտ, Մետալուրգիայի և
նյութագիտության ամբիոն, ՀԱՊՀ
Էլ. հասցե - gayavasi@gmail.com
- 27. Վարդանյան Արման Արամի** տ.գ.թ., դոցենտ, ՀԱՊՀ
Էլ. հասցե - vardanyan_arman@hotmail.com
- 28. Վարդանյան Գոր Պատվականի** տ.գ.թ., ՀԱՊՀ
Էլ. հասցե - gor.vardanyan@polytechnic.am

СПИСОК АВТОРОВ

- | | |
|--|--|
| 1 Авоян Ромик Оганнесович | аспирант, НПУА,
Эл. почта - rom.avoyan@polytechnic.am |
| 2 Агбальян Алла Суреновна | младший научный сотрудник, НПУА,
Эл. почта - aghbalyan@gmail.com |
| 3 Агбальян Сурен Геворкович | д.т.н., профессор, кафедра Металлургии и
материаловедения, НПУА,
Эл. почта - metalsur@polytechnic.am |
| 4 Арутюнян Карен Валерикович | соискатель, кафедра Горного дела и охраны
окружающей среды, НПУА; менеджер по
управлению капитальных вложений финансовой
дирекции, ЗАО "Зангезурский медно-молибденовый
комбинат"
Эл. почта - harutyunyan.karen.v@gmail.com |
| 5 Асчян Григор Ованесович | к.т.н., НПУА,
Эл. почта - grigor_aschyan@rambler.ru |
| 6 Багратунян Мариам
Карапетовна | ЕУ Армении, инженер по физическому
проектированию специализированных интегральных
схем, ЗАО "Синописис Армения",
Эл. почта - bagratun @synopsys.com |
| 7 Варданын Арман Арамович | к.т.н., доцент, НПУА,
Эл. почта - vardanyan_arman@hotmail.com |
| 8 Варданын Гор Патваканович | к.т.н., ректор НПУА,
Эл. почта - gor.vardanyan@polytechnic.am |
| 9 Василян Гаяне Арташевна | к.т.н., доцент, кафедра Металлургии и материало-
ведения, НПУА,
Эл. почта - gayavasi@gmail.com |
| 10 Восканян Гарник Арменович | аспирант, ЕГУ, штатный инженер по
конструированию аналоговых систем, ЗАО
"Синописис Армения",
Эл. почта - garnikv@synopsys.com |
| 11 Галстян Давид Маратович | Аспирант, кафедра Систем автоматизации, НПУА;
программист в компании "Кейвордс Спреасофт",
Эл. почта - galstyandavid1998@gmail.com |
| 12 Гукасян Севак Аршакович | к.т.н., кафедра микроэлектронных схем и систем
НПУА, старший руководитель конструирования
аналоговых систем, ЗАО "Синописис Армения",
Эл. почта - ghukasya@synopsys.com |
| 13 Давтян Нвард Юриковна | аспирант, кафедра ТЭ и ООС, НПУА,
Эл. почта - davtyannvard8@gmail.com |
| 14 Иванян Роман Аркадиевич | магистрант, НПУА; старший инженер по
конструированию аналоговых систем, ЗАО
"Синописис Армения",
Эл. почта - ivanyan@synopsys.com |
| 15 Казарян Артур Араикович | аспирант, НПУА,
Эл. почта - gartur@synopsys.com |

16 Манукян Арман Геворгович	аспирант, НПУА, Эл. почта - arman.manukyan277@gmail.com
17 Манукян Левон Андраникович	д.т.н., доцент, кафедра Горного дела и охраны окружающей среды, НПУА, Эл. почта - manukyanlevon-a@rambler.ru
18 Марухян Востаник Завенович	к.т.н. профессор, НПУА, Эл. почта - davtyannvard8@gmail.com
19 Марухян Давит Каренович	инженер по программному обеспечению "Disgo Armenia" CJSC Эл. почта - marukh@gmail.com
20 Мартиросян Вардгес Дживанович	преподаватель Военной академии им. В. Саргсяна МО РА, Эл. почта - mesropmartirosyan@gmail.com
21 Меликсетян Норик Галустович	д.т.н., профессор, Ванадзорский филиал, НПУА, Эл. почта - n_meliksetyan@mail.ru
22 Мкртчян Сона Самвеловна	магистрант, НПУА; инженер по конструированию аналоговых систем, ЗАО "Синописис Армения", Эл. почта - msona@synopsys.com
23 Папян Эдгар Тигранович	магистрант, НПУА; старший инженер по физическому конструированию ЗАО "Синописис Армения", Эл. почта - papyan@synopsys.com
24 Саакян Ваан Апресович	институт радиофизики и электроники, НАН РА, штатный инженер физического проектированию специализированных интегральных схем, ЗАО "Синописис Армения", Эл. почта - vahans@synopsys.com
25 Саакян Грайр Грачьевич	аспирант, НПУА, Эл. почта - hrayrsahakian@gmail.com
26 Симонян Виген Арменович	аспирант, НАПУ, Эл. почта - vigensimonyan2017@gmail.com
27 Согомонян Размик Манвелович	аспирант, НПУА; штатный инженер по физическому проектированию специализированных интегральных схем в ЗАО "Синописис Армения", Эл. почта - razmiks@synopsys.com
28 Тадевосян Тигран Шаликович	аспирант кафедры металлургии и материаловедения, НПУА, Эл. почта - tigtadevosyan84@gmail.com

LIST OF THE AUTHORS

1. **Aghbalyan Alla Suren** Junior Scientific Worker, NPUA
E-mail - aghbalyan@gmail.com
2. **Aghbalyan Suren Gevorg** Dr. of tech. sci., Prof. of Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA
E-mail - metalsur@polytechnic.am
3. **Aschyan Grigor Hovhannes** Cand. of tech. sci.
E-mail - grigor_aschyan@rambler.ru
4. **Avoyan Romik Hovhannes** Post-graduate student, NPUA
E-mail - rom.avoyan@polytechnic.am
5. **Bagratunyan Mariam Karapet** Engineer, EUA, Microelectronic circuits and systems, Analog Design, “Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - bagratun @synopsys.com
6. **Davtyan Nvard Yurik** Graduate Student, Chair of Heat-Power Engineering and Environmental Protection, NPUA
E-mail - davtyannvard8@gmail.com
7. **Galstyan David Marat** Post-graduate student of the Chair “Automation Systems”, developer at “Keywords Sperasoft”, NPUA
E-mail - galstyandavid1998@gmail.com
8. **Ghazaryan Artur Arayik** Post-graduate student, NPUA, Enigneer of Physical Design of Integrated Circuits in Synopsys Armenia CJSC, NPUA
E-mail - gartur@synopsys.com
9. **Ghukasyan Sevak Arshak** Lecturer of the Chair Microelectronic Circuits and Systems, NPUA, Cand. of tech. sci., Analog design Senior Supervisor “Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - ghukasya@synopsys.com
10. **Harutyunyan Karen Valerik** Post-graduate Student, “Chair of Mining and Nature Protection, Institute of Mining and Metallurgy and Chemical Technologies”, NPUA. “Zangezur copper molybdenum combine” CJSC, Capital investment manager, Finance Directorate, External
E-mail - harutyunyan.karen.v@gmail.com
11. **Ivanyan Roman Arkadi** Graduate student of NPUA, Analog design Senior Engineer “Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - ivanyan@synopsys.com
12. **Manukyan Arman Gevorg** Post-graduate student, NPUA
E-mail - arman.manukyan277@gmail.com
13. **Manukyan Levon Andranik** Dr. of tech. sci., “Chair of Mining and Nature Protection, Institute if Mining and Metallurgy and Chemical Technologies”, Assoc. Prof., NPUA
E-mail - manukyanlevon-a@rambler.ru
14. **Marukhyan Vostanik Zaven** Cand. of tech. sci., Honorary Prof. of NPUA
15. **Marukhyan David Karen** Software Engineer “Disqo Armenia CJSC
E-mail - marukh@gmail.com

- 16. Martirosyan Vardges Jivan** RA Defense Ministry Military Academy named after V. Sargsyan
E-mail - mesropmartirosyan@gmail.com
- 17. Meliksetyan Norik Galust** Dr. of tech. sci., Prof., Vanadzor Branch of NPUA
E-mail - n_meliksetyan@mail.ru
- 18. Mkrtchyan Sona Samvel** Graduate student of NPUA, Analog design Engineer
“Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - msona@synopsys.com
- 19. Papyan Edgar Tigran** Graduate student of NPUA, Layout design Senior Engineer
“Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - papyan@synopsys.com
- 20. Sahakyan Hrayr Hrachya** Post-graduate student, NPUA.
E-mail - hraysahakian@gmail.com
- 21. Sahakyan Vahan Apres** Senior Engineer, NAS RA, Institute of Radio Physics and Electronics, Analog Design, “Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - vahans@synopsys.com
- 22. Simonyan Vigen Armen** Post-graduate student of the Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA
E-mail - vogensimonyan2017@gmail.com
- 23. Soghomonyan Razmik Manvel** Senior Engineer of the Chair Microelectronic circuits and systems, Analog Design, NPUA, “Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - razmiks @synopsys.com
- 24. Tadevosyan Tigran Shaliko** Post-graduate student of the Chair Metallurgy and Material Science, NPUA
E-mail - tigtadevosyan84@gmail.com
- 25. Vardanyan Arman Aram** Cand. of tech. sci., Assoc. Prof., NPUA
E-mail - vardanyan_arman@hotmail.com
- 26. Vardanyan Gor Patvakan** Cand. of tech. sci., NPUA
E-mail - gor.vardanyan@polytechnic.am
- 27. Vasilyan Gayane Artash** Cand. of tech. sci., Assoc. Prof. of the Chair “Metallurgy and Material Science”, NPUA
E-mail - gayavasi@gmail.com
- 28. Voskanyan Garnik Armen** Post-graduate student of YSU, PhD candidate, Analog design Staff Engineer “Synopsys Armenia” CJSC
E-mail - garnikv@synopsys.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 equepment, 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 զետեղման էջերը, գրքերի դեպքում՝ հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը, վերնագիրը, հրատարակման վայրը, հրատարակչությունը, թվականը, էջերի քանակը:

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

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

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

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Материал представляется в редакцию в соответствии со следующими правилами:

1. Статья в двух экземплярах и файл статьи в формате Microsoft Office Word. Объем статьи не должен превышать 10 страниц, объем сообщений – до 4-х страниц. Формат страницы – А4. Рабочее поле: Top – 5cm, Bottom – 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

2024

3

ՀԱՏՈՐ

ТОМ 77
VOLUME

ՀՈՒԼԻՍ - ՍԵՊՏԵՄԲԵՐ

ИЮЛЬ - СЕНТЯБРЬ
JULY - SEPTEMBER

Հրատ. Խմբագիր՝

Խմբագիրներ՝

ԺԱՆՆԱ Ս. ՄԵՅՐԱՆՅԱՆ

Հ.Ց. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

Հ.Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

Ստորագրված է տպագրության՝ 14.04.2025

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

Շարվածքը՝ համակարգչային:

Տառատեսակը՝ Sylfaen, Times New Roman: 8.75 տպ. մամ.:

Պատվեր՝ 96: Տպաքանակ՝ 150

Հայաստանի Ազգային
Պոլիտեխնիկական
Համալսարանի
«Պոլիտեխնիկ»
տպագրահրա-
տարակչություն
Երևան, Տերյան 105

Типографско-
издательский центр
«Политехник»
Национального
политехнического
университета Армении
Ереван, ул. Теряна 105,

“Polytechnic” Publishing – House
National Polytechnic University of
Armenia
105 Teryan str. Yerevan

polytechpolygraph@gmail.com